



4. International World Energy Conference FULL TEXT BOOK

EDITORS

Mustafa Serdar GENÇ

Gamze GENÇ

Şükrü Taner AZGIN

Saltuk Buğra SELÇUKLU



ISBN: 978-625-378-043-2

INTERNATIONAL WORLD ENERGY CONFERENCE-IV

December 06-08, 2024 / Kayseri, Türkiye



FULL TEXT BOOK

EDITORS

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ
Prof. Dr. Gamze GENÇ
Assoc. Prof. Şükrü Taner AZGIN
Assist. Prof. Saltuk Buğra SELÇUKLU

by
IKSAD PUBLISHING HOUSE®

All rights of this book belong IKSAD Publishing House
Authors are responsible both ethically and juridically
IKSAD Publications – 2024©
Issued: 25.12.2024

ISBN: 978-625-378-043-2

CONFERENCE ID

CONFERENCE TITLE

4th International World Energy Conference

DATE and PLACE

December 06-09, 2024 / Kayseri, Türkiye

ORGANIZATION

Erciyes University, Energy Conversions Research and Application Center, Türkiye
Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Türkiye
IKSAD-Institute of Economic Development and Social Research, Türkiye
WEAR-Wind Engineering and Aerodynamics Research Group, Türkiye
MSG Teknoloji-Multi Science Gate, Türkiye
Kayseri UCTEA Chamber of Mechanical Engineers

ORGANIZING COMMITTEE HEADS

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ

HEAD OF CONFERENCE

Erciyes University, Director of the Energy Conversions Research and Application Center

Prof. Dr. Gamze GENÇ

HEAD OF THE SCIENTIFIC BOARD

Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering

Assoc. Prof. Şükrü Taner AZGIN

HEAD OF ORGANIZING COMMITTEE

Erciyes University, Vice Director of the Energy Conversions Research and Application Center

Assist. Prof. Saltuk Buğra SELÇUKLU

HEAD OF ORGANIZING COMMITTEE

Erciyes University, Vice Director of the Energy Conversions Research and Application Center

COORDINATORS

Atabek MOVLYANOV

Erciyes University, Faculty of Engineering Energy Systems Eng. department, Türkiye

NUMBER of ACCEPTED ORAL PAPERS-220 (Türkiye-105, Other Countrys-115)

NUMBER of REJECTED PAPERS-37

PARTICIPANTS COUNTRY

Algeria, Azerbaijan, Bangladesh, Belarus, Georgia, India, Indonesia, Iraq, Iran, Lebanon, Lithuania, Morocco, Nigeria, North Macedonia, Pakistan, Romania, Thailand, Türkiye, UK, Ukraine, USA, Uzbekistan

PRESENTATION

Oral presentation

EVALUATION PROCESS

All applications have undergone a double-blind peer review process

ORGANIZING BOARD MEMBERS

Prof. Dr. Enise AYYILDIZ – Erciyes University, Faculty of Science, Department of Physics
Prof. Dr. Şaban PATAT – Erciyes University, Faculty of Science, Department of Chemistry
Prof. Dr. Jean-Vasile ANDREI- President, Research Network on the Resource Economics and Bioeconomy Association (RebResNet)
Assoc. Prof. Ahmet Turan ÖZDEMİR – Erciyes University, Faculty of Engineering Electrical-Electronics Eng. department
Assoc. Prof. Gülşah ELDEN – Erciyes University, Faculty of Engineering Energy Systems Eng. department
Assist. Prof. Dr. Uzma NADEEM - University of Delhi, Mata Sundri College for Women, Department of Environmental Studies
Dr. Mohamed EL MALIKI - Mohammed First University, Faculty of Sciences, Oujda, Morocco

SCIENTIFIC BOARD MEMBERS

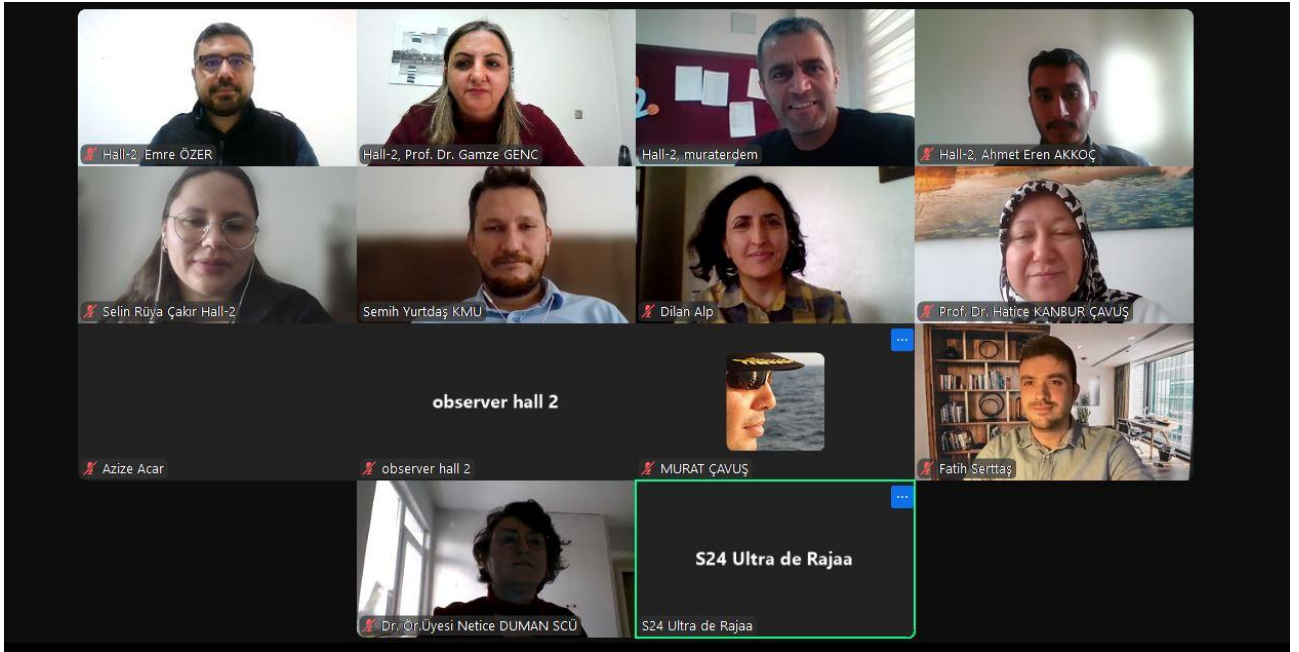
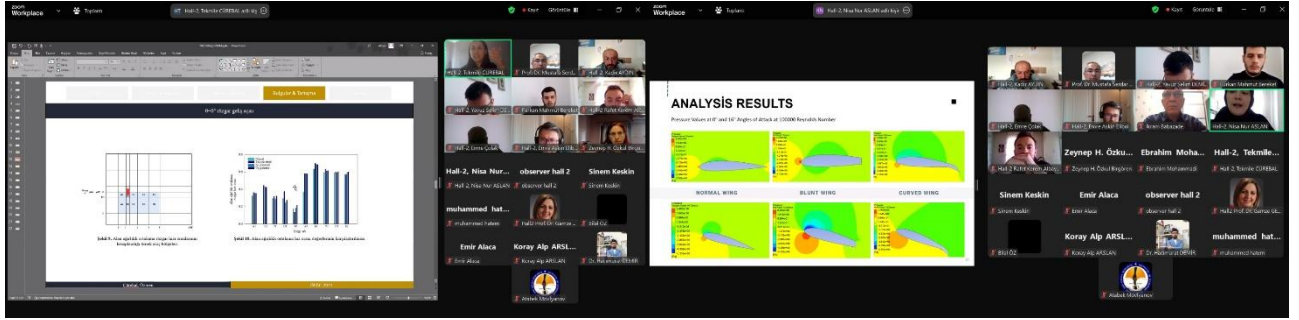
Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR – Erciyes University, Faculty of Engineering Energy Systems Eng. department
Prof. Dr. Bilal DEMİREL – Erciyes University, Faculty of Engineering, Materials Eng. department
Prof. Dr. David W. COIT - Rutgers University, Industrial & Systems Engineering Department
Prof. Dr. Faik BİLGİLİ – Erciyes University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Economics
Prof. Dr. Fatih DUMAN – Erciyes University, Faculty of Science, Department of Biology
Prof. Dr. Ferhat DALDABAN – Erciyes University, Faculty of Engineering Electrical-Electronics Eng. department
Prof. Dr. Chivu LUMINITA - National Institute for Economic Research “Costin C. Kirişescu” (NIER), Romanian Academy
Prof. Dr. İsmail SOLMAZ - Ataturk University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering department
Prof. Dr. K. SELLAMI - Military Technological College Muscat, Sultanate of Oman
Prof. Dr. Mehmet ARI – Erciyes University, Faculty of Science, Department of Physics
Prof. Dr. Oğuz ARSLAN - Bilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering department
Prof. Dr. Oktay ÖZKAN – Erciyes University, Faculty of Engineering Environmental Eng. department
Prof. Dr. Orhan TÜRKOĞLU – Erciyes University, Faculty of Science, Department of Chemistry
Prof. Dr. Zülküf KAYA – Erciyes University, Faculty of Engineering Civil Eng. department
Dr. Shahzad ASHRAF - DHA Suffa University, Department of Computer Science, Pakistan
Assoc. Prof. Doğan ERDEMİR – Yıldız Teknik University, Faculty of Engineering Mechanical Eng. department
Assoc. Prof. İlyas KARASU - Samsun University, Aerospace eng. department
Assoc. Prof. Mehmet Fatih KAYA – Erciyes University, Faculty of Engineering Energy Systems Eng. department
Assoc. Prof. Nurettin ÜSTKOYUNCU – Erciyes University, Faculty of Engineering, Electrical-Electronics Eng. department
Research Assoc. Prof. Abdülaziz ATABANI – Mechanical engineering, Yuan Ze University, Taiwan
Assist. Prof. Mark RODGERS - Rutgers Business School, Supply Chain Management, USA
Assist. Prof. Serkan BAHÇECİ – Erciyes University, Faculty of Engineering Electrical-Electronics Eng. department
Assist. Prof. Muhammet ÇELİK - Aksaray University Mechanical Eng. department
Assist. Prof. Hacımurat DEMİR - Aksaray University Mechanical Eng. department
Assist. Prof. Dr. Uzma NADEEM - University of Delhi, Mata Sundri College for Women, Department of Environmental Studies
Assist. Prof. Halil Hakan AÇIKEL – Erciyes University, Faculty of Engineering Energy Systems Eng. department
Assist. Prof. Hatice Sinem ŞAŞ ÇAYCI - Sabancı University, Department of Materials Engineering
Assist. Prof. Ramazan ÖZKAN - Muğla Sıtkı Koçman University Energy Systems Eng. department
Dr. Anna Maria VASILE - National Institute for Economic Research “Costin C. Kirişescu” (NIER), Romanian Academy, Romania

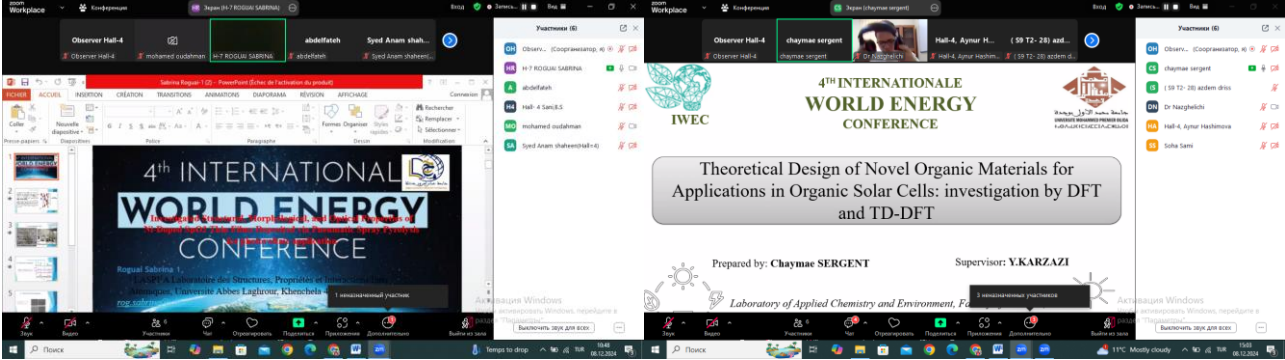
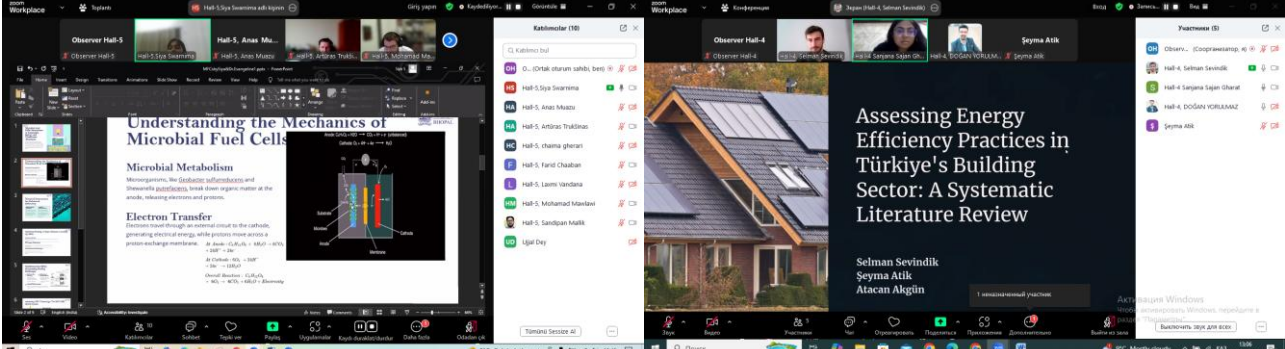
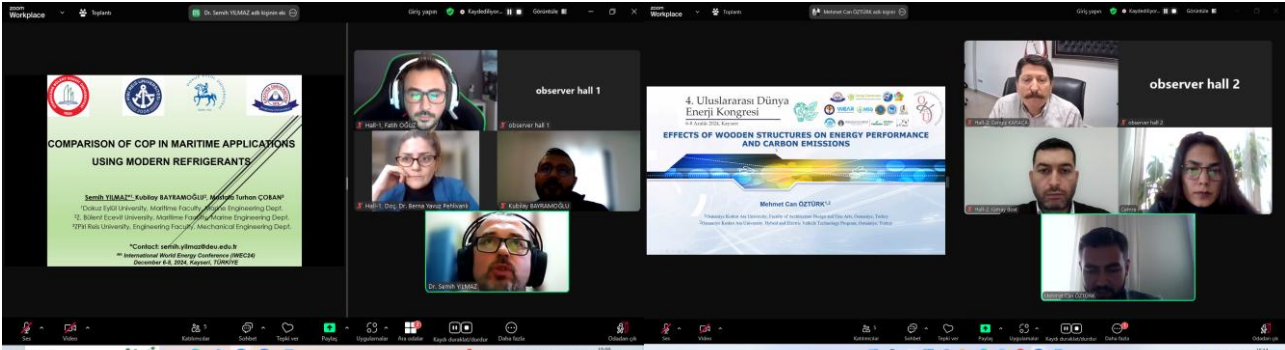
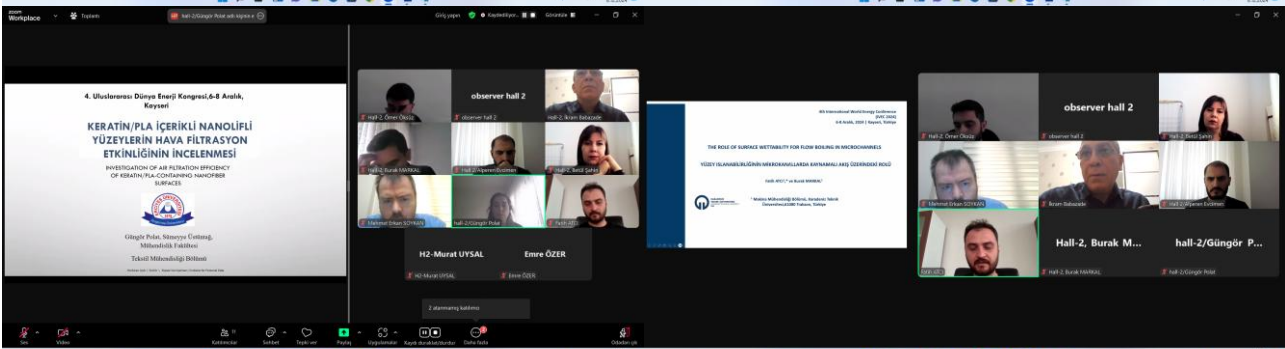
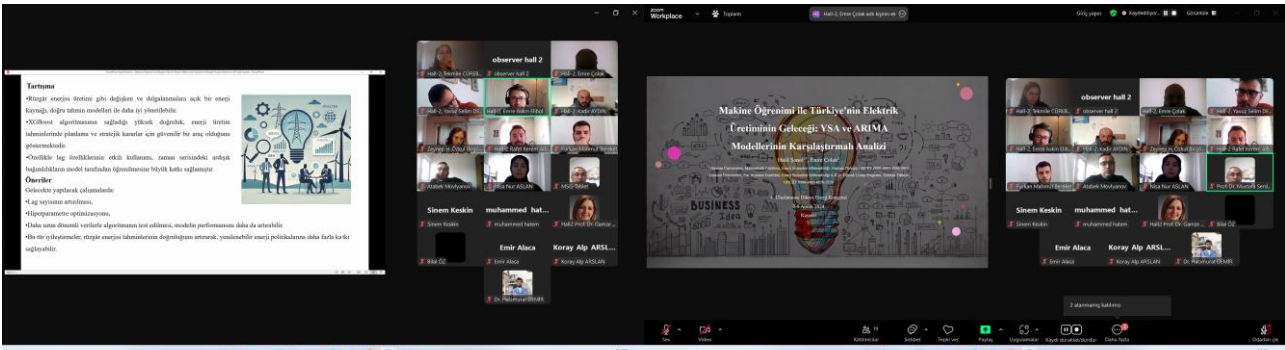
PHOTO GALLERY













4th INTERNATIONAL

WORLD ENERGY

CONFERENCE

06-08 / DECEMBER / 2024 / KAYSERI / TÜRKİYE



+902166063275



contact@worldenergyconference.org



www.worldenergyconference.org



Conference Program

Online & In-person

Participant Countries: Algeria, Azerbaijan, Bangladesh, Belarus, Georgia, India, Indonesia, Iraq, Iran, Lebanon, Lithuania, Morocco, Nigeria, North Macedonia, Pakistan, Romania, Thailand, TRNC, Türkiye, UK, Ukraine, USA, Uzbekistan

Important, Please Read Carefully

- To be able to attend a meeting online, login via <https://zoom.us/join> site, enter ID "Meeting ID or Personal Link Name" and solidify the session.
- The Zoom application is free and no need to create an account.
- The Zoom application can be used without registration.
- The application works on tablets, phones and PCs.
- The participant must be connected to the session 5 minutes before the presentation time.
- All congress participants can connect live and listen to all sessions.
- Moderator is responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session.

Points to Take into Consideration - TECHNICAL INFORMATION

- Make sure your computer has a microphone and is working.
- You should be able to use screen sharing feature in Zoom.
- Attendance certificates will be sent to you as pdf at the end of the congress.
- Requests such as change of place and time will not be taken into consideration in the congress program.

Before you login to Zoom please indicate your hall number, name and surname

exp. Atabek Movlyanov



4th INTERNATIONAL WORLD ENERGY CONFERENCE



Prof. Dr. Oktay ÖZKAN
Vice Rector of
Erciyes University
HONORARY BOARD MEMBER



Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER
Dean of Faculty of Engineering,
Erciyes University
HONORARY BOARD MEMBER



Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ
Director of the Energy Conversions Research
and Application Center, Erciyes University
HEAD OF CONFERENCE



Prof. Dr. Hakkı BALTACI
Institute of Earth & Marine Sciences,
Gebze Technical University
KEYNOTE SPEAKER



Assoc. Prof. Şükür Taner AZGIN
Sustainability Coordinator
Erciyes University
KEYNOTE SPEAKER

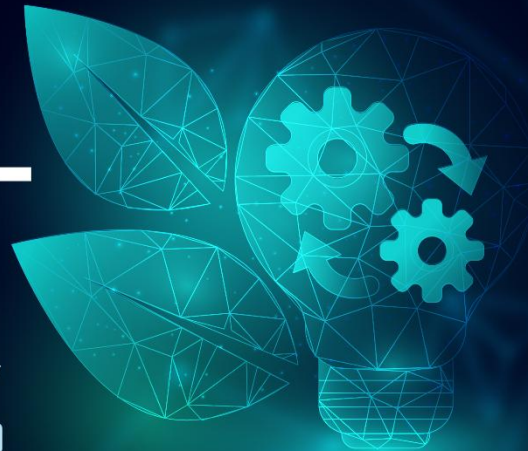


ZOOM MEETING

OPENING CEREMONY

09:00-10:40 06.12.2024
KAYSERİ / TÜRKİYE

VENUE: FACULTY OF ENGINEERING, ERCIYES UNIVERSITY





4th INTERNATIONAL WORLD ENERGY CONFERENCE

Mustafa Serdar GENÇ

"CHARACTERIZATION OF LAMINAR SEPARATION BUBBLES ON AIRFOILS IN LOW REYNOLDS NUMBER FLOWS"

İlyas KARASU, Beyza GÖRKEMLİ BAYRAM,

Mustafa Serdar GENÇ

"PREDICTION OF LAMINAR SEPARATION BUBBLE LOCATION OVER WIND TURBINE AIRFOILS"

Merve AKIN, Muhammet HATEM,

Mustafa Serdar GENÇ

"TURBULENT FLOW FORMATION WITH DIFFERENT TURBULENCE GRIDS IN THE WIND TUNNEL: Part I-Numerical Analysis"

Merve AKIN, Sinem KESKİN, Halil HAKAN AÇIKEL,

Mustafa Serdar GENÇ

"TURBULENT FLOW FORMATION WITH DIFFERENT TURBULENCE GRIDS IN THE WIND TUNNEL Part II-Experimental Analysis"

Eren ANIL SEZER, Muhammet HATEM,

Mustafa Serdar GENÇ

"TURBULENT FLOW ON SYMMETRIC AIRFOIL AT LOW REYNOLDS NUMBERS: Part I-Numerical Analysis"

Meva Yasemin BAŞTUĞ, Zafer İPEKLİ,

Halil Hakan AÇIKEL, Mustafa Serdar GENÇ

"TURBULENT FLOW ON SYMMETRIC AIRFOILS AT LOW REYNOLDS NUMBERS: Part II- Experimental Analysis"

Muhammet HATEM, Eren ANIL SEZER, Sinem KESKİN,

Mustafa Serdar GENÇ

"THE EFFECT OF THE TURBULENCE ON FLOW OVER CAMBERED AIRFOIL AT DIFFERENT REYNOLDS NUMBERS Part I-Numerical Analysis"

Meva Yasemin BAŞTUĞ, Zafer İPEKLİ,

Halil Hakan AÇIKEL, Mustafa Serdar GENÇ

"THE EFFECT OF THE TURBULENCE ON FLOW OVER CAMBERED AIRFOIL AT DIFFERENT REYNOLDS NUMBERS Part II- Experimental Analysis"

FLUID MECHANICS WORKSHOP



Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ
Director of the Energy Conversions Research
and Application Center, Erciyes University
HEAD OF WORKSHOP
TÜBİTAK 1001 PROJECT MANAGER



11:00-14:50 **06.12.2024**
ONLINE & IN-PERSON

VENUE: FACULTY OF ENGINEERING, ERCIYES UNIVERSITY





4th INTERNATIONAL WORLD ENERGY CONFERENCE



Assist. Prof. Dr. Salih Buğra SELÇUKLU
Erciyes University

MACHINE LEARNING MODELS



Assoc. Prof. Dr. Sibel ARSLAN
Sivas Cumhuriyet University

AUTOMATIC PROGRAMMING MODELS



Assist. Prof. Dr. Erhan MUĞALOĞLU
Erciyes University

ECONOMETRIC MODELS

ELECTRICITY PRICE FORECASTING WORKSHOP



ZOOM MEETING



15:00–18:00

06.12.2024
KAYSERİ / TÜRKİYE

VENUE: FACULTY OF ENGINEERING, ERCIYES UNIVERSITY

06.12.2023 / In-person Session-1 / TSI Time-14⁰⁰:16³⁰



VENUE: Erciyes University, Faculty of Engineering



HEAD OF SESSION: Assist. Prof. Dr. Halil Hakan AÇIKEL

Authors	Affiliation	Presentation title
Dr. Mithat ŞİMŞEK Dr. Nurullah GÜLTEKİN	Tokat Gaziosmanpaşa University, Türkiye	Studying the Effects of Adding Bronze to Polymer Composite Sliding Bearings for Vehicle Applications on Vibration, Noise, and Friction Coefficient
Dr. Gizem Hazan AKÇAY Prof. Dr. İrfan AR	Muş Alparslan University, Türkiye Gazi University, Türkiye	Domestic Wastewater Treatment and Electricity Generation Using a PTFE Based Electrode and Nested Cylindrical Dual Chamber Microbial Fuel Cell
Dr. Sevda YETİMAN Assoc. Prof. Dr. Fatma KILIÇ DOKAN Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES Prof. Dr. Ertuğrul ŞAHMETLİOĞLU	Erciyes University, Türkiye Kayseri University, Türkiye	Assessment of The Energy Storage Dynamics of Carbon Quantum Dots Embedded Perovskite Calcium Titanate
Seda BELEN Assist. Prof. Dr. Ramazan AYZAZ	Yıldız Technical University, Türkiye	Comparison of Battery Performances Within the Scope of Electrical Load Analysis in Aircraft
Assist. Prof. Dr. Duygu AGHAZADEH	University of Turkish Aeronautical Association, Türkiye	Predictive Modeling of Greenhouse Gas Emissions in Urban Areas Using Machine Learning for Real-Time Mitigation
Assist. Prof. Dr. Ahmet GANI	Kayseri University, Türkiye	Design of Photovoltaic Panel-Fed Step-Up Luo Converter for Renewable Energy Applications
Assist. Prof. Dr. Ahmet GANI	Kayseri University, Türkiye	Design of Boost Converter for Sustainable Energy Applications
Lect. İlker KAYALI Assoc. Prof. Dr. Gülşah ELDEN	Kapadokya University, Türkiye Erciyes University, Türkiye	A Numerical Study of a Vanadium-Redox Flow Battery with Several Flow Field Channel Geometries
Mourad Kaddiri Bilal El hadoui	Sultan Moulay Slimane University, Morocco	Effect of The Magnetic Field on the Heat Transfer Enhancement of Nanofluids in Rectangular Cavities

06.12.2024 / In-person Session-2 / TSI Time-14⁰⁰:16³⁰



VENUE: Erciyes University, Faculty of Engineering



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Gamze GENÇ

Authors	Affiliation	Presentation title
Edanur KILIÇ Assist. Prof. Dr. Erhan MUĞALOĞLU Assist. Prof. Dr. Saltuk Buğra SELÇUKLU Hazar KESKİN	Erciyes University, Türkiye Independent Researcher in Economics, Türkiye	Impact of Renewable Energy Integration on Competition and Price Dynamics in the Turkish Electricity Market
Mert ÖZAY Prof. Dr. Ercan ŞENYİĞİT	Erciyes University, Türkiye	Supply Chain Evaluation with Multi-Criteria Decision- Making Based on ESG (Environmental, Social and Governance) Parameters
Res. Assist. Büşra YILMAZ-ÜSTÜNER Prof. Dr. Süleyman BOLAT Assoc. Prof. Dr. Murat BELKE	Aksaray University, Türkiye Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Türkiye	Renewable Energy and Carbon Taxes: A Bibliometric Analysis
Dr. Seher KADIOĞLU Prof. Dr. Necdet ŞENSOY	Istanbul Commerce University, Türkiye	Comparative Analysis of Traditional Ratios and Cash Flow Ratios in Measuring the Financial Performance of Energy Sector Companies Listed on Borsa Istanbul
Prof. Dr. Gamze GENÇ	Erciyes University, Türkiye	Solar Energy Based Hydrogen Production
Koray Alp ARSLAN Rafet Kerem ALBAYRAK Prof. Dr. Gamze GENÇ	Erciyes University, Türkiye	The effect of rooftop solar power plants in reducing the carbon footprint of factories: The case of the Aluminum and Furniture Sector
Assist. Prof. Dr. Yusuf TEKİN Mehmet YALÇIN	Erciyes University, Türkiye	Design and Numerical Investigation of a Domestic Midi Oven with Improved Thermal Performance
Assist. Prof. Dr. Yusuf TEKİN Abakar Abakar ABAKAR	Erciyes University, Türkiye	Design and Performance Analysis of Solar Electricity Generation System with Organic Rankine Cycle for N'djamena- Chad
Assist. Prof. Dr. Fatma ŞENER FİDAN Assist. Prof. Dr. Sena AYDOĞAN	Abdullah Gül University, Türkiye Gazi University, Türkiye	Clean Clothes, Clean Purchasing: A Sustainable Approach to Buying Washing Machines Using CODAS Multi-Criteria Determination

07.12.2024 / Hall-1 / Online Session-1 / TSI Time - 13⁰⁰:15⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Mehmet ZİLE

Authors	Affiliation	Presentation title
Assist. Prof. Dr. Aminu Yusuf Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA	İstanbul University- Cerrahpaşa, Türkiye	Boosting Thermoelectric Generator Efficiency with Radiative Cooling Paint and PCM Integration
Assoc. Prof. Dr. Mehmet ZİLE	Gazi University, Türkiye	Optimization of Energy Management in Solar/ Wind Power Stations Using Artificial Intelligence
Assoc. Prof. Dr. Mehmet ZİLE	Gazi University, Türkiye	Test Analysis of Power Transformers with Artificial Intelligence
Mustafa GENÇAY Assoc. Prof. Dr. Altuğ BOZKURT Lect. Dr. Erşan Ömer YÜZER	Yıldız Technical University, Türkiye Hakkari University, Türkiye	Energy Efficiency with Waste Heat Recovery in an Industrial Facility
Res. Assist. Bahadır YÖRÜR Prof. Dr. Nihal ERGİNEL	Kütahya Dumlupınar University, Türkiye	Regional Determination of Social Acceptance Factor of Clean Energy Technologies in Turkey
Lect. Dr. Vuslat SALALI	Isparta University of Applied Sciences, Türkiye	The Impact of Value-Based Land Readjustment Practices on Energy Efficiency from a Sustainability Perspective
Seyran DUMAN	Istanbul University, Türkiye	Sun's Share in the European Union's Renewable Energy Policy: Germany-Turkey Comparative Analysis

07.12.2024 / Hall-2 / Online Session-1 / TSI Time - 13⁰⁰:15⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Gamze GENÇ

Authors	Affiliation	Presentation title
Assist. Prof. Dr. Murat ERDEM Assoc. Prof. Dr. Mert GÜRTÜRK	Fırat University, Türkiye	A YEKDEM Assessment for Solar Energy Between 2015-2023
Assist. Prof. Dr. Dilan ALP Azize ACAR	Şırnak University, Türkiye	The Use and Importance of Biopolymers in Solar Cell Production
Prof. Dr. Hatice KANBUR ÇAVUŞ Dr. Caner İLDEŞ Assist. Prof. Dr. Murat ÇAVUŞ Prof. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ	Yozgat Bozok University, Türkiye	Investigation of CdTe Schottky Diodes at High Frequencies for Solar Cell Applications
Assist. Prof. Dr. Semih YURTAŞ Assoc. Prof. Dr. Ziya AYDIN	Karamanoğlu Mehmetbey University, Türkiye	Effect of Rosamine Derivative Doping on Organic Solar Cell's Efficiency
Lect. Emre ÖZER Assoc. Prof. Dr. Furkan DINCER	Gaziantep Islam Science and Technology University, Türkiye Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Türkiye	Effect of Soiling Loss and Structure Shading Factors on the Performance of Bifacial Panels
Lect. Emre ÖZER Assoc. Prof. Dr. Furkan DINCER	Gaziantep Islam Science and Technology University, Türkiye Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Türkiye	Peak Shaving Modeling in Solar Power Plants with PVSYS
Lect. Selin Rüya ÇAKIR Assoc. Prof. Dr. Ümit Turgay ARPACIOĞLU	Istanbul Gelisim University, Türkiye Mimar Sinan Fine Arts University, Türkiye	An Evaluation of the Application of Photobioreactors in Buildings
Ahmet Eren AKKOÇ Assist. Prof. Dr. Müjdat ÖZTÜRK Prof. Dr. Gamze GENÇ	Erciyes University, Türkiye Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye	Energy Analysis of PV/T and Fuel Cell Supported Hybrid Water Heating System in Different Climatic Conditions of Turkey

07.12.2024 / Hall-3 / Online Session-1 / TSI Time - 13⁰⁰:15⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Dr. Alina Amanjol

Authors	Affiliation	Presentation title
Virgil Popescu Dr. Ramona Birau	University of Craiova, Romania	The impact of Climate Finance on Economic Growth and Sustainable Development in the Case of Emerging Countries
Assoc. Prof. Dr. Luljeta Sadiku	International Balkan University, North Macedonia	Renewable Energy Transition and Resource Efficiency: Evidence from Companies in North Macedonia
Assoc. Prof. Dr. Luljeta Sadiku	International Balkan University, North Macedonia	Relationship Between Environmental Related Technologies and Production-Based CO ₂ Emissions In OECD Countries
Aashish Dhiman	Swami Vivekanand Subharti University, India	Strategic Innovations in Energy Efficiency Enhance Business Performance
Assist. Prof. Dr. Amritha LJ	SRM University, India	Governance Trends in Energy Finance: Challenges and Opportunities for Policy Fulfillment
Prof. Dr. Abdul Rauf Bhatti	Government College University, Pakistan	Renewables Global Status: Market & Industry Trends
Nehayatul Najwa Hendri Hermawan ADINUGRAHA	UIN K.H. Abdurrahman Wahid Pekalongan, Indonesia	Energy as an Economic Driver Exploring the Impact of Green Technologies on Global Markets
Sarah Essam Hasan shubbar Hussein jaafar Marwah Abdulkareem Mahmood Prof. Dr. Karrar Abdullellah Azeez	University of Kufa, Irak	Does Energy Utilization Affect the Degree of Sticky Costs? An Investigation of Energy Changes
Assist. Prof. Dr. Kamaljit Singh Assist. Prof. Dr. Pawan Kumar Assist. Prof. Dr. Simmi Vashishtha Prof. (Dr.) Satish Menon	SRM University, India Delhi Pharmaceutical Sciences and Research University, India	Determinants of Consumer Perception in Haryana's Electricity Sector: A Multi-Sectoral Analysis

07.12.2024 / Hall-4 / Online Session-1 / TSI Time - 13⁰⁰:15⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Sanjana Sajan Gharat

Authors	Affiliation	Presentation title
R. Vidhyalakshmi K. Rajaganapathy	Bharath Institute of Higher Education and Research, India	Exploring the Foundations of Energy: Principles, Sources, and Future Perspectives
Nwafor, Lilian C. Dr. Kanu, Abednego C. Yusuf, Aishat A.	People's Comprehensive Academy, Nigeria University of Ilorin, Nigeria	Exploring Sustainable Energy Solution beyond Fossil Fuels: Mitigating Energy Crisis in Nigeria
Kajal Singh	VIT Bhopal University, India	Energy Efficiency
Kata Vijay Kumar	VIT AP University, India	Beyond Cooling: Rethinking Energy Efficiency in Data Centers Naturally
Prof. Dr. Pooja Sharma Vikas Sharma	Barkatullah University Bhopal, India VIT Bhopal University, India	Energizing Intelligence: Addressing Energy Challenges in AI and Stock Market Computations
Sanjana Sajan Gharat	VIT Bhopal University, India	Navigating the Energy Transition: Innovations, Challenges, and Pathways to Sustainability
Assist. Prof. Dr. Altug KARABEY Dogan YORULMAZ	Van Yüzüncü Yil University, Türkiye	Experimental Investigation on Multi-Jet Impingement Cooling for Flat Plate Using Angled Nozzle
Assist. Prof. Dr. Selman SEVİNDİK Seyma ATİK Assist. Prof. Dr. Atacan AKGÜN	Erciyes University, Türkiye University College London, UK	Assessing Energy Efficiency Practices in Turkey's Building Sector: A Systematic Literature Review

07.12.2024 / Hall-5 / Online Session-1 / TSI Time - 13⁰⁰:15⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Dr. Ahmed Shawky

Authors	Affiliation	Presentation title
Adel Deliou Khmissi Belkaid Meriem Dehbi Abdelkader Fidjah	University of Med Seddik Benyahia (UMSB of Jijel), Algeria University of Djelfa, Algeria	Study of the Performance of a solar still
Faten BELARBI	University of Mostaganem, Algeria	Photovoltaic performance in CZTS solar cells: effects of various parameters by simulation study
Zineb Benbouzid Mohammed Ridha Benzidane Noureddine Hassini Faten Belarbi	Abdelhamid Ibn Badis University- Mostaganem, Algeria University of Mostaganem, Algeria	Effect of active layer thickness on CIGS solar cell performance
Tasawar IQBAL Sidra ALTAF	University of Agriculture Faisalabad, Pakistan	Exploring Solar Energy Benefits and Potential Risks for Human and Animal Health
Rajaa Diany Mohamed El idrissi Mohammed Salah Abdessamad Tounsi	Sultan Moulay Slimane University, Morocco Chouaib Doukkali University, Morocco	Using organic dye sensitizers based on quinoxaline to improve the performance of dye-sensitized solar cells
Dr. Ahmed Shawky	Central Metallurgical R&D Institute, Egypt	Nanostructured Carbon Allotropes for Sustainable Perovskite-based Solar Cells
Dr. Abderrahim ZEMMIT Abdelouaoud LOUKRIZ Riyadh ROUABHI Khaled BELHOUCHE	University of M'sila, Algeria University of Science and Technology Houari Boumediene, Algeria	An off-grid photovoltaic Brushless Motor irrigation system with intelligent MPPT algorithm
Archana Mishra Jyoti Pandey	Vindhya Institute of Management and Science, India	Solar Energy: Technology Used, Future Aspect, Benefits

07.12.2024 / Hall-1 / Online Session-2 / TSI Time - 15³⁰:17³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. İhsan Erdem KAYRAL

Authors	Affiliation	Presentation title
Prof. Dr. Meltem KUTLU GÜRSEL	University of Dokuz Eylül, Türkiye	The Concept of Renewable Energy Resource Area in Terms of Administrative Law
Assist. Prof. Dr. Melike AKTAŞ BOZKURT Assoc. Prof. Dr. İhsan Erdem KAYRAL	OSTİM Technical University, Türkiye Başkent University, Türkiye	Assessing Price Bubbles in Clean Energy Commodities: Evidence from COVID-19 and the Russia-Ukraine Conflict
Assist. Prof. Dr. Soner HAMZAÇEBİ	Trabzon University, Türkiye	China's Nuclear Energy Integration: The Role of Nuclear Power in Long-Term Energy Transition Plans
Assist. Prof. Dr. Fatih Volkan AYYILDIZ Assoc. Prof. Dr. Güller ŞAHİN	Ordu University, Türkiye Kütahya Health Sciences University, Türkiye	A Systematic Compilation of the Material Kuznets Curve
Mehmet Mustafa DENİZ Assist. Prof. Dr. Mehtap BULUT DENİZ	Munzur University, Türkiye İnönü University, Türkiye	Renewable Energy (Solar and Wind Energy) and Accounting Dimension
Assist. Prof. Dr. Mehtap BULUT DENİZ Mehmet Mustafa DENİZ	İnönü University, Türkiye Munzur University, Türkiye	Evaluation of the Auditing Report of the Independent Auditor Who Audited the Financial Statements of a Company Opinioning in this Field and Renewable Energy Production in Turkey in Terms of IAS 700 Forming an Opinion on Financial Statements and Reporting Standard
Lect. Dr. Fatih AKIN Lect. Dr. Selin DINÇER	Erzincan Binali Yıldırım University, Türkiye Kırıkkale University, Türkiye	The Impact of Energy Uncertainty on Economic Growth: A Panel Data Analysis for Selected European Union Countries
Dr. Ferhat ARI	Bingöl University, Türkiye	Discussing the Relationship Between Energy Poverty and Human Rights in Türkiye's Energy Policy: The Case of Coal Subsidy
Dr. Ferhat ARI	Bingöl University, Türkiye	Analysis of Legal Recognition of the Right to Access Energy in Türkiye

07.12.2024 / Hall-2 / Online Session-2 / TSI Time - 15³⁰:17³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Gamze GENÇ

Authors	Affiliation	Presentation title
Assoc. Pro. Dr. Mehmet BÜYÜK Lect. Ömer BERBER Assoc. Prof. Dr. Necdet Sinan ÖZBEK Assoc. Prof. Dr. Mustafa İNCİ	Adıyaman University, Türkiye İskenderun Technical University, Türkiye Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye University of California, USA	Performance Analysis of High-Gain Quadratic Buck-Boost Converter for Electric Vehicle Applications
Sezin KARAOĞLAN Assoc. Prof. Dr. Pınar ÖZKURT	Tarsus University, Türkiye	A Literature Review on the Environmental Impact of Using Electric Vehicles in Transportation
Res. Assist. Sevgi SAMYELİ Assist. Prof. Dr. Ahmet DOĞAN Prof. Dr. Mustafa ALÇI	Erciyes University, Türkiye Nuh Naci Yazgan University, Türkiye	Improvement of Voltage Profiles in Electric Power Systems with BESS Integration Using GWO Algorithm
Assist. Prof. Dr. Fatih SERTTAŞ	Afyon Kocatepe University, Türkiye	Short-Term Electricity Load Forecasting Using Artificial Neural Networks
Betül Sena ÇAĞLAR Prof. Dr. Devrim AKGÜN	Sakarya University, Türkiye	Anomaly Detection in Industrial Machines Using Explainable AI and Acoustic Signals
Assist. Prof. Dr. Netice DUMAN Prof. Dr. Halil İbrahim ACAR	Sivas Cumhuriyet University, Türkiye	Design and Simulation of Acoustically Driven Laboratory Scale Thermoacoustic Refrigerator
Dila EKICI Prof. Dr. Gamze GENÇ	Erciyes University, Türkiye	A Research on the Carbon Emission Reduction for the A-Building in Erciyes Engineering Faculty
Sevde ERTÜRK ÇETİNKAYA Muhammet ÇELİK Prof. Dr. Gamze GENÇ	Erciyes University, Türkiye	Parameter Sensitivity Analysis for Electrochemical Performance of A Sodium-Ion Battery

07.12.2024 / Hall-3 / Online Session-2 / TSI Time - 15³⁰:17³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Faiz Muhammad Shaikh

Authors	Affiliation	Presentation title
Ephesus O. Fatunmbi	Federal Polytechnic, Nigeria	Thermal Migration and Haphazard Motion of Williamson Hybridized Nanofluid Tiny Particles for Convective Cooling Cylinder
Fowotade, S. A. Umar, A. A. Murtala Y. D. Haruna D. A. Hafsat, U. K.	Hussaini Adamu Federal Polytechnic, Nigeria	Physicochemical Analysis of Spent Lube Oil for Automobiles and its Impact on Energy Consumption
Thomas, Ekaobong Akan	Akwa Ibom State Polytechnic, Nigeria	Assessing the Policies and Programs Initiated to Promote the Utilization of Compressed Natural Gas in Nigeria
Prof. Dr. Faiz Muhammad Shaikh Rasool Bux Junejo Saeed Ahmed Muhammadi Muhammad Zafar Wassan Syed Mujeeb Hyder Shah Syed Mehtab Ali Shah	University of Larkano, Pakistan Agri.Extension- Government of Sindh Auaid Awam Larkana, Pakistan	Energy Crisis in Pakistan and strategies to develop solar energy system in Pakistan
Mrutyunjaya Muduli Kunjabihari Swain Murthy Cherukuri	PWC Accelerator, India NIST University, India	Reliability Enhancement of Power System Using Phasor Measurement Units
Zineb MOUJOD Abdeslam EL BOUARI Omar TANANE	Hassan II University of Casablanca, Morocco	Elaboration of Eco-friendly and Cost-Effective Geopolymer Foams Using Combined Saponification/Peroxide Route for Thermal Insulation Applications

07.12.2024 / Hall-4 / Online Session-2 / TSI Time - 15³⁰:17³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Faisal Nazir

Authors	Affiliation	Presentation title
Faisal Nazir	University of Agriculture, Pakistan	Production and Characterization of Carbon Nanotubes from Biochar Under Microwave Irradiation
Mohanapriya. P Assoc. Prof. Dr. Chamundeeswari. M	St. Joseph's College of Engineering, India	Integrative Approach Towards CO2 Sequester from Plastic Waste Microbial Treatment Using Microalgae- an Era of Next Generation Bioenergy Resource
S. Dahri A. Jabar L. Bahmad L. B. Drissi R. Ahl Laamara	Mohammed V University in Rabat, Morocco Hassan II University of Casablanca, Morocco	First principles investigation of structural, elastic, thermoelectric, electronic and optical properties XH ₃ (X=Ac, La) for hydrogen storage
Aminu Ibrahim bello Yahaya Riko Yunusa	Umaru Musa Yaradua University Katsina, Nigeria	Biohydrogen for Renewable Energy in Nigeria: Emerging Trends and Innovations
Nworah Florence N Jisike Oluchukwu F Eje Ozoemena E Igwebuike Nancy C	University of Nigeria, Nigeria	Microbial Powerhouses: Unlocking the Potentials of Biofuels through Micro-organisms
ADJOU DJ Abdellatif SMAOUNE Ghiles	University Center of Tipaza, Algeria Laboratory of Dynamics and Biodiversity, Algeria	Valorization of the Algal Biomass of Dunaliella Salina From The Bethioua Salt Flats (Algeria)
Daikwo S. Amuna O.T. Simon V.O. Akowe N.A.	Federal University Lokoja, Nigeria	Comparative Production of Biogas from Cow Dung and Poultry Droppings
Eshkulov Nuriddin Potes Tatyana Xayitov Fayozjon	Jizzakh Polytechnic Institute, Uzbekistan Belarusian National Technical University, Belarus	Use of Energy-Saving Building Materials in the Energy Sector
Bate, Garba Barde	Federal University Dutse, Nigeria	Application of Urea and Poultry Dung In Enhancing Anaerobic Digestion and Biogas Production From Sweet Sorghum and Maize Straw

07.12.2024 / Hall-5 / Online Session-2 / TSI Time - 15³⁰:17³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Farid B. Chaaban

Authors	Affiliation	Presentation title
Chaima Gherari Farid Berrezzek Khaled Khelil	University of Souk ahras, Algeria	Current Sensors Faults Detection and Isolation of DFIG for Wind Turbine based on generalized observer scheme (GOS)
Siya Swarnima Evangeline Christina	VIT Bhopal University, India	Microbial Fuel Cells: Innovations in Sustainable Energy and Wastewater Treatment
Laxmi Vandana Ujjal Dey Subhasis Mahata Sandipan Mallik	Biju Patnaik University of Technology, India NIST University, India	Low-Cost Production of Textured Flexible Solar Cells Using Additive Manufacturing Techniques
Subhasish Das Rani Nayak Aswi Rani Sahu Sandipan Mallik	NIST University, Berhampur, India	Improved Light Harvesting in ZnO/Se _{1-x} Te _x Solar Cells via ZnO Nanorods in-corporation
Res. Assist. Mohamad Y. Mawlawi Prof. Dr. Farid B. Chaaban	American university of Beirut, Lebanon	Feasibility of PV Allocation Options
Artūras TRUKŠINAS	Lithuanian Energy Institute, Lithuania	Methodology for Ranking Important and Critical Power Transmission Lines
Anas Muazu Abdullahi Haruna Abubakar Danyaya Mansur Bala Sufyan	Federal Polytechnic Daura, Nigeria	Exploring Sustainable Energy: Biodiesel Production from Soybeans as a Viable Alternative to Fossil Fuels
Riyadh ROUABHI Salim DJERIOU Noureddine CHAMI Eloualid ZOUGGAR	Mohamed Boudiaf University of M'sil, Algeria university of formation continue dely brahim, Algeria	A new Maximum Power Extraction (MPPT) technique applied to a wind turbine

08.12.2024 / Hall-1 / Online Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Dr. İbrahim YILMAZ & Dr. Aykut Fatih GÜVEN

Authors	Affiliation	Presentation title
Assist. Prof. Dr. Alper Buğra ARSLAN Assoc. Prof. Dr. Hakan KARAKAYA Assist. Prof. Dr. Mehmet Ali KALLIOĞLU	Batman University, Türkiye	Determination of Optimum Insulation Thickness for Different Wall Types and Different Fuel Types
Assist. Prof. İbrahim YILMAZ Dr. Nihan CAGLAYAN Ahmet Süha HANCIOĞLU	Ankara Yıldırım Beyazıt University, Türkiye Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye	Evaluation of Hydrogen Energy Storage Risks: An Integrated Fuzzy Entropy and TOPSIS Approach for Sustainable Energy Supply
Dr. Nihan CAGLAYAN Assist. Prof. İbrahim YILMAZ Ahmet Süha HANCIOĞLU	Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye Ankara Yıldırım Beyazıt University, Türkiye	Selection of the Hydrogen Energy Storage Method Using the Hybrid Fuzzy MCDM Approach: A Pathway to Sustainable Energy Solutions
Assist. Prof. Dr. Aykut Fatih GÜVEN	Yalova University, Türkiye	Cost-Effective and Sustainable Off-Grid Hybrid Energy Systems: Optimizing Hydrogen Integration in Microgrids Using Homer Pro
Assist. Prof. Dr. Aykut Fatih GÜVEN Necat UZUNER Yusuf KAYA Sümeyra İBİŞ	Yalova University, Türkiye	Energy Efficiency and Emission Impacts of Hybrid Energy Systems for Public Buildings: Analyzing the Role of Boilers, Natural Gas, and Gasoline Generators
Res. Assist. Mehmet Enes ERSÖZ Assist. Prof. Dr. Halit ARAT Prof. Dr. Özer AYDIN	Kütahya Dumlupınar, Türkiye	Development and Establishment of the Experimental System Required for the Combustion of Hydrogen and Natural Gas Mixtures
Res. Assist. Mehmet Enes ERSÖZ Assist. Prof. Dr. Halit ARAT	Kütahya Dumlupınar, Türkiye	Economical Assesment of Heating a House with Different Systems in Kütahya
Assoc. Prof. Dr. Sertaç HOPOĞLU Res. Assist. Gözde GÖKGÖZ ÇORUK	İskenderun Technical University, Türkiye	The Importance of Hydrogen in Meeting Clean Energy Needs
Assist. Prof. Dr. Ayşe Nuray CANAT	Istanbul Sabahattin Zaim University, Türkiye	Green Ammonia
Assist. Prof. Dr. Mahmut Suat DELİBALTA	Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye	Current Situation Analysis of the Primary Energy Sources Involved in the Socio-Economic Development of Turkey

08.12.2024 / Hall-2 / Online Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ

Authors	Affiliation	Presentation title
Assoc. Prof. Dr. Halil ŞENOL Assist. Prof. Dr. Emre Aşkın ELİBOL Assoc. Prof. Dr. Halil ÇOLAK	Giresun University, Türkiye	Forecasting Wind with Machine Learning: 60-Month Analysis of Turkey's Wind Energy Production with XGBoost
Assoc. Prof. Dr. Halil ŞENOL Emre ÇOLAK	Giresun University, Türkiye	The Future of Türkiye's Electricity Generation with Machine Learning: Comparative Analysis of ANN and ARIMA Models
Assist. Prof. Dr. Zeynep H. OZKUL BIRGOREN Yavuz Selim DEMIREL	Ankara Yıldırım Beyazıt University, Türkiye	Foundations of Offshore Wind Farms: Historical Developments and Future Outlook
Res. Assist. Tekmile CÜREBAL Prof. Dr. Yücel ÖZMEN	Karadeniz Technical University, Türkiye	Numerical Investigation of the Impact of Lift-Up Building Designs with Different Core Numbers on Pedestrian-Level Wind Environment
Emir ALACA Assist. Prof. Dr. Seçil VARBAK NEŞE	Marmara University, Türkiye	Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power Plants and Increasing its Efficiency with Genetic Algorithm
Ali Onur ÇOŞKUN Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	Erciyes University, Türkiye	Thermal and Flow of a Vacuum Tube Solar Collector Using Computational Methods
Koray Alp ARSLAN Rafet Kerem ALBAYRAK Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	Erciyes University, Türkiye	Integrating Artificial Intelligence and Blockchain for Carbon Emission Management a Case Study at Erciyes University
Nisanur ASLAN Muhammed HATEM Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	Erciyes University, Türkiye	Numerical Investigation of The Effect of Different Shapes Applied to the Trailing Edge of the Naca2415 Airfoil on Aerodynamic Performance
Furkan Mahmut BERKET Assist. Prof. Dr. Halil Hakan AÇIKEL Prof. Dr. Gamze GENÇ	Erciyes University, Türkiye	Numerical Analysis of Vibration for NACA 4415 Profiled Carbon Fiber Wing
Lect. Kadir AYDIN Assoc. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÇOBAN	Ardahan University, Türkiye Bartın University, Türkiye	Optimization and Cost Analysis of Hybrid Energy System for a University Campus
Dr. Mücella İLKENTAPAR Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER	Erciyes University, Türkiye	Numerical and Experimental Investigation of the Flow Around a Cylinder

08.12.2024 / Hall-3 / Online Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Sanjeev Kumar

Authors	Affiliation	Presentation title
Shayesteh fard Mohammad Motamedi Majid Darvish Motevali Moahammad Hosein Movahedi Mohammad Mehdi	Rode hen Azad university, Iran Islamic Azad University, Iran	Design of Multi-Level Mathematical Model for Radial Supply Networks in Power Systems
Jyothi A Goudar Thrinethra S N Murugendrappa M V Sharanappa Chapi	B.M.S. College of Engineering, India Mangalore University, India	Balancing Power and Energy: Analysis of Electrical and Electrochemical Techniques
Abderrahim Ait Lhaj Brahim Ouazik Mohamed El Hasnaoui Hassan Chaib	Ibn Tofail University, Morocco	Analytical Study of the Structural, Electronic, and Optical Properties of SnO ₂ Single Crystal Using DFT with the VDW-DF-OB86 Functional
Prof. Dr. Sanjeev Kumar Assist. Prof. Dr. Sowmya Anand	Sri Siddhartha Institute of Technology, India Bapuji Institute of Engineering and Technology, India	Modelling of Hybrid AC/DC Microgrid and power flow analysis
Dhivya C R Arunkumar	Tamil Nadu Agricultural University, India	Digital Solutions for Energy Monitoring in Agri-Supply Chains
Muhammad Dawood Fareed Awan Dr. Ausnain Naveed	University of Azad Jammu & Kashmir, Pakistan	Novel Approach for Assessing Stability Margin Computation of LFC System with EV Aggregators and Incommensurable Delays

08.12.2024 / Hall-4 / Online Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Sabrina Roguai

Authors	Affiliation	Presentation title
Sabrina Roguai	Abbes Laghrour University, Algeria	Investigated Structural, Morphological, and Optical Properties of Ni-Doped SnO ₂ Thin Films Deposited via Pneumatic Spray Pyrolysis for photovoltaic application
Syed Anam Shaheen Abbas Shah Muhammad Shoaib Muhammad Yasin Naz Shazia Shukrullah	University of Agriculture Faisalabad, Pakistan	Synthesis and Characterization of Silica-Chitosan Decorated Magnetic Nanostructure for Wastewater Treatment
Bilal Shah Dicky Muslim Raden Irvan Sophian	Padjadjaran University, Indonesia	Petrological Insights into Landslide Prevention: A Case Study of Indonesia's Volcanic, Sedimentary, and Metamorphic Terrains
Muneeb Hassan	Pakistan Institute of Engineering and technology Multan, Pakistan	Exploring the Mechanics and Applications of Adaptive Smart Polymer Particles and Surfaces
Fatima Ezzahra Atmani Aziz Hasib	Sultan Moulay Slimane University, Morocco	Methylene blue removal from wastewater using activated carbon/ chitosan- based adsorbents : Optimization, Effect of physicochemical properties, kinetic models and thermodynamic parameters
Abdelfateh BENMAKHOUL Rabie MEZOUAR	University Mohamed El Bachir El Ibra-himi, Algeria	Phonon Contribution to Internal Energy, Thermal Expansion Coefficient and Grüneisen Parameter of Cubic Boron Nitride
Hamiani Zohra Berrichi Amina Bachir Redouane	University of Tlemcen, Algeria University of Ain Temouchent, Algeria	Green and Efficient heterocyclic synthesis via Phosphate Nanomaterials
El.Majdi C.MOUKHF S. Zerraf S. Belaouad	Hassan II University of Casablanca, Morocco	Experimental and Theoretical Investigation of 2-Methyl-6-Nitroanilinium Hydrogen Sulfate: Synthesis, Structural, Spectroscopic, and Quantum Chemical Properties
M. Oudahman M. Houmad R. Masrou A. Rezzouk	Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Morocco Mohammed V University in Rabat, Morocco	Exploring the Electronic and Photocatalytic Potential of t-Germagrapene and GeC-Graphene

08.12.2024 / Hall-5 / Online Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Dr. BOUDRAHAM Salima

Authors	Affiliation	Presentation title
Dr. ABROUKI Younes	Mohammed V University in Rabat, Morocco	Sustainable Energy Solutions for Water Desalination: Toward Green and Resilient Water Systems
Dr. AIT OUJALLAL Ilham MABROUKI Jamal Dr. BOUDRAHAM Salima MOUSSADIK Ali ABROUKI Younes	Mohammed V University in Rabat, Morocco	Alternative Energy Integration in Water Desalination: A Sustainable Solution for Water Scarcity
Dr. BOUDRAHAM Salima MABROUKI Jamal Dr. AIT OUJALLAL Ilham ANOZLA Abdelkader ABROUKI Younes	Mohammed V University in Rabat, Morocco	Renewable Energy-Driven Water Desalination: A Pathway to Sustainable Water Management
OMISANDE Lawrence Ademola ADEGBESAN Ololade Oluwatosin ADENAIYA Olumide A	Federal Polytechnic, Nigeria	Performance of Polyethylene Terephthalate (Pet) Bottles
Sadiq, M.S Singh, I.P Ahmad, M.M	Federal University Dutse, Nigeria Swami Keshwanand Rajasthan Agricultural University, India	Carbon Farming as a Tool for Climate Resilience in Smallholder Agriculture
Sadiq, M.S Singh, I.P Ahmad, M.M Sani, B.S	Federal University Dutse, Nigeria Swami Keshwanand Rajasthan Agricultural University, India Bayero University, Nigeria	The Role of Agribusiness in Facilitating Farmers' Access to Carbon Markets
Ebrahim Mohammadi	Graduate University of Advanced Technology, Iran	Hydrocarbon potential and petroleum system of the Oligo-Miocene Qom Formation, Iran: A review
Farhan Ahmad Kusumiyati Kusumiyati Mochamad Arief Soleh Muhammad Rabnawaz Khan Ristina Sifi Sundari	Universitas Padjadjaran, Indonesia The University of Agriculture Peshawar, Indonesia	The Microclimate of Screen House: An Optimal Environment for Growth, Disease Resistance, and Quality Fruit Development in Solanaceous Crops (Cherry Tomato and Chili)
DAHMANI Yacine Mohamed Prof. Dr. ARKOUB Ouali	Mouloud Mammery University, Algeria University of M'Hamed Bougara Boumerdes, Algeria	Accounting for Carbon Emissions in the Hydrocarbon Industry

08.12.2024 / Hall-1 / Online Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Bilal SUNGUR

Authors	Affiliation	Presentation title
İbrahim ÇAKICI Yalçın DOĞAN Murat UYSAL	Teksan Generator, Türkiye	Thermal Performance Study of Bottom and Side Liquid Cooling Systems in Lithium-Ion Prismatic Battery Module Using CFD Method
Res. Assist. Yasir Ziya GÜLTAK Prof. Dr. Alkan ALKAYA	Mersin University, Türkiye	Estimating the State of Charge of a Lithium-Ion Battery Using Machine Learning Algorithms
Kübra DEMİREL Fatih KARAKOÇ Uğur ÖLMEZ	Teksan Generator, Türkiye	Desulfurization of Lead-Acid Batteries Using Organic Polymer Activators
Dr. Mehmet Nurullah ATEŞ	Bogazici University, Türkiye	One-Pot Recovery of Cathode Active Materials Used in Spent Lithium Ion Batteries
Res. Assist. Furkan MUMCU Assoc. Prof. Dr. Bilal SUNGUR Assoc. Prof. Dr. Alirza KALELİ	Samsun University, Türkiye	Experimental Investigation of the Effect of Air-Cooled Thermal Management System on Cell Temperatures in A Lithium- Ion Battery Module
Res. Assist. Furkan MUMCU Assoc. Prof. Dr. Bilal SUNGUR Assoc. Prof. Dr. Alirza KALELİ	Samsun University, Türkiye	Experimental Investigation of the Effect of Different Discharge Rates on Cell Temperatures in A Lithium-Ion Battery Module
Melisa EKŞİ Abdullah ZORLU Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN	Kocaeli University, Türkiye SGS Supervise Gözetme Etüd Kontrol Servisleri A.Ş., Türkiye	Photovoltaic Module Production and Quality Standards and The Evaluation of Testing in Manufacturer's Quality Processes
Pınar Yeşim AKGÖZ Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN	Smart Solar Technologies Gebze Production Factory, Türkiye Kocaeli University, Türkiye	Recycling of End-of-Life Photovoltaic Panels in Türkiye: A Step Towards Circular Economy

08.12.2024 / Hall-2 / Online Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Burak MARKAL

Authors	Affiliation	Presentation title
Güngör POLAT Assist. Prof. Dr. Sümeyye ÜSTÜNTAĞ	Erciyes University, Türkiye	Investigation of Air Filtration Efficiency of Keratin/Pla-Based Nanofibrous Surfaces
Assist. Prof. Dr. İkrım BABAZADE	"Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry" Scientific Research Institute, Azerbaijan	Activator of Low- Frequency Mechanical Vibrations to Increase the Debit of Hard-To-Recover Deposits
Res. Assist. Ömer ÖKSÜZ Assoc. Prof. Dr. Burak MARKAL	Karadeniz Technical University, Türkiye	Effect of Refrigerant Types on Flow Boiling in Microchannels
Lect. Fatih ATCI Assoc. Prof. Dr. Burak MARKAL	Karadeniz Technical University, Türkiye	The Role of Surface Wettability for Flow Boiling in Microchannels
Assist. Prof. Dr. İkrım BABAZADE Dr. O. Aliyeva N. Shıxkarimov X. Zulfuqarova	"Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry" Scientific Research Institute, Azerbaijan	Increasing the Efficiency of Oil and Gas Production Enterprises Through the Use of Smart Grids Technologies
Ress. Assist. Alperen EVCİMEN Assoc. Prof. Dr. Burak MARKAL	Recep Tayyip Erdogan University, Türkiye Karadeniz Technical University, Türkiye	Correlations Developed for Microchannel Flow Boiling
Lect. Dr. Betül ŞAHİN	Trabzon University, Türkiye	Coal and Pyrolysis of Coal
Assist. Prof. Dr. Mehmet Erkan SOYKAN Assoc. Prof. Dr. Azize ESERAY	Kayseri University, Türkiye	Volatility and Correlation Interaction Between USA and Turkish Index: DCC-GARCH Approach

08.12.2024 / Hall-3 / Online Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assist. Prof. Dr. Priti Rana

Authors	Affiliation	Presentation title
Satish Kumar Singh Sachin Singh Parihar Sadanand Patel	Central University of Punjab, India	Addressing Legal Barriers in Environmental Impact Assessments for Renewable Energy Projects: Policy Gaps and Practical Solutions
Nanda Kartika Putri	UIN K.H. Abdurrahman Wahid Pekalongan, Indonesia	Utilisation Of Renewable Energy As A National Electrification Solution In Remote Areas
Bello Ibrahim Monday Habeb Bolaji Onisabi Olojede Abayomi Opeyemi Bankole Mustapha Olatunji Abbas Hussein Enezoza	Federal University Lokoja, Nigeria Federal University of Technology, Nigeria	Application of North West Corner Optimization Method to Rural Electrification Using Renewable Energy Sources
Diksha Shankar Ankit Deepak Mishra Taneesha Gupta Pankaj Malhotra	Sushant University, India	Optimizing Sustainability in Healthcare: Integration of Renewable Energy with Smart Hospital Technologies
Mohammed Ouachekradi Yasser Karzazi	University Mohammed I, Morocco	Utilization of azo dyes with D- π -A structure as sensitizers in dye-sensitized solar cells: A computational investigation
Yassine Mouniane Fatima Zahra Aoujl Hadjab Slimane Amol D. Vibhute	Ibn Zohr University, Morocco Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel University, Algeria Symbiosis International (Deemed University), India	Enhancing Renewable Energy Systems Through Artificial Intelligence Integration
Assist. Prof. Dr. Priti Rana	University of Delhi, India	India's Adoption of Electric Vehicle Policy: A Step Towards Sustainability
Saloua FILALI Abdelkader NASSER Abdelhamid KERKOUR-EL MIAD	Mohammed Premier University, Morocco	Assessment of Mechanical Performance and Sustainability of Concrete with Recycled Marble Waste

08.12.2024 / Hall-4 / Online Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Dr. BOUDRAHAM Salima

Authors	Affiliation	Presentation title
Driss Azdem Jamal Mabrouki Souad El hajjaji	Mohammed V University in Rabat, Morocco	Environmental Impacts of Seawater Desalination Brine Discharge on Marine Ecosystems: Case Study of Douira, Morocco
Shahryar Ahmadi Nasrin Karami	Ahvaz Jndishapur University of Medical Sciences, Iran Kermanshah University of Medical Sciences, Iran	Energy Optimization in Food Processing
Ganesh Kumar R.Y Hiranmai Ajay Neeraj	Central University of Gujarat, India	Transformation of organic waste into bio-based manure -a sustainable solution for environment quality management
Adesanmi, Moses Ademola Sobiye, Tolulope Christiana	Federal Polytechnic, Nigeria	A Lexical-Semantic Study of Change in Energy and Climate Terminology in Niyi Osundare's They Too Are the Earth and Earthwatch
DAHMANI Yacine Mohamed Prof. Dr. ARKOUB Ouali	Mouloud Mammery University, Algeria University of M'Hamed Bougara Boumerdes, Algeria	Carbon Accounting for Environmental Compliance and Risk Management in Business Operations
Chisom C. Okpala Ifeoma F. Chukwuma Victor O. Apeh Ozoemena E. Eje	University of Nigeria Nsukka, Nigeria Federal University of Allied Health Sciences, Nigeria	Artificial Intelligence in Biodiesel Production: A Systematic Review
Dr. BOUDRAHAM Salima MABROUKI Jamal Dr. AIT OUJALLAL Ilham ABROUKI Younes	Mohammed V University in Rabat, Morocco	The Role of Green Energy in Sustainable Development: Challenges and Opportunities
Amin Ghaderi Seyed Reza HASSAN-BEYGI Rasol Hematiyan	University of Tehran, Iran Irankhodro powertrain co. Iran	Numerical investigation of the effect of diesel-biodiesel-bioethanol fuel mixtures on the performance parameters and emissions of a direct injection diesel engine.
Anas Umar Aliyu Adam Salihu Kila	Bayero University Kano, Nigeria	Assessing the Potentials of Graminoids in the Production of Biojet Fuel in Bayero University Kano, Nigeria

08.12.2024 / Hall-5 / Online Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Muralidhar MANAPURAM

Authors	Affiliation	Presentation title
Adirek Vajrapatkul Boonta Wayupab Pinmanee Vajrapatkul	Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand Central Food Retail Company Limited, Thailand Srinakharinwirot University, Thailand	The Determinant of Natural Resource Rents in BVAR Framework
Adirek Vajrapatkul Boonta Wayupab Pinmanee Vajrapatkul	Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand Central Food Retail Company Limited, Thailand Srinakharinwirot University, Thailand	Dynamic Interrelationships Among Crude Oil, Natural Gas, Gold, and Oil Prices in Thailand: A Bayesian Vector Autoregressive Approach
Adirek Vajrapatkul Boonta Wayupab Pinmanee Vajrapatkul	Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand Central Food Retail Company Limited, Thailand Srinakharinwirot University, Thailand	Exploring the Interrelationships between Economic Indicators and Natural Resource Rents in Thailand: A Two-Stage Least Squares Analysis
Megha Shruti	University – Vellore Institute of Technology, India	Energy Management in Building Management System by incorporating AI driven Smart Grids
Prof. Dr. Muralidhar MANAPURAM	North Eastern Regional Institute of Science and Technology, India	Why and How Much Energy Do We
Assist. Prof. Dr. Sakineh Sojoodi Laleh Dastmalchi	University of Tabriz, Iran Urmia University, Iran	The Factors Affecting the Technical Efficiency of Iranian Gas Power Plants: The Application of Super Efficiency Method
Muhammad Sufyaan Khan	Vellore institute of Technology, India	Energy Efficiency Economics and Policy
Julius Ademola OYEWOLE Dr. Ayoola, Yemisi Adeola Olaleye, Victor Olugbenga	University of Ilesa, Nigeria	Enhancing Education through the Lens of Communicating Energy: Using English as a Medium to Foster Environmental Literacy
Elmira Azizi Norouzabadi	University of Tabriz, Iran	Examining the Impact of Export Diversification on Energy Intensity of Iran

08.12.2024 / Hall-1 / Online Session-3 / TSI Time - 15⁰⁰:17⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Berna YAVUZ PEHLİVANLI

Authors	Affiliation	Presentation title
Lect. Dr. Semih YILMAZ Assist. Prof. Dr. Kubilay BAYRAMOĞLU Prof. Dr. M. Turhan ÇOBAN	Dokuz Eylul University, Türkiye Zonguldak Bulent Ecevit University, Türkiye Piri Reis University, Türkiye	Comparison of COP in Maritime Applications Using Modern Refrigerants
Assist. Prof. Dr. Kubilay BAYRAMOĞLU Lect. Dr. Semih YILMAZ	Zonguldak Bulent Ecevit University, Türkiye Dokuz Eylul University, Türkiye	The Impact of Waste Heat Recovery System of a Ship to EEXI
Fatih OĞUZ Assist. Prof. Dr. Cemil KOYUNOĞLU	Yalova University, Türkiye	Improvement of Boiler Room Ventilation in an Urban Health Center in a Computational Fluid Mechanics Study
Assoc. Prof. Dr. Berna YAVUZ PEHLİVANLI Prof. Dr. Hatice KANBUR ÇAVUŞ	Yozgat Bozok University, Türkiye	Potential of Yozgat Graphite Deposits and Contribution to Energy Technologies
Assoc. Prof. Dr. Berna YAVUZ PEHLİVANLI	Yozgat Bozok University, Türkiye	Turkey's Oil Shale Potential and Energy Future; Sorgun Basin (Yozgat)
Res. Assist. Ahmet DAYANÇ Assist. Prof. Dr. Feridun KARAKOÇ	Kutahya Dumlupinar University, Türkiye	Thermomechanical Stress Analysis of a Motorcycle Brake Disc Under Predefined Conditions Using Finite Element Method
Res. Assist. Ahmet DAYANÇ Assist. Prof. Dr. Feridun KARAKOÇ	Kutahya Dumlupinar University, Türkiye	Design of a Diamond TPMS Heat Sink Using Implicit Modeling: Comparative Analysis of Thermal and Mechanical Properties
Assoc. Prof. Dr. Turan UYSAL Esra ÇIRAK	Gümüşhane University, Türkiye	Rare Earth Element Recovery from Kemiklitepe (Karaman-Turkey) Bauxite Ore by Water Leaching

08.12.2024 / Hall-2 / Online Session-3 / TSI Time - 15⁰⁰:17⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Cengiz KARACA

Authors	Affiliation	Presentation title
Cemre YILMAZ Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ	Konya Technical University, Türkiye	A Physical Separation Methodology and its Effects on the Waste Animal Fat Content Prior to Biodiesel Production Process
Cemre YILMAZ Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ	Konya Technical University, Türkiye	The Effect of Reaction Time on Biodiesel Quality from Waste Animal Fat Using Ethanol
Assoc. Prof. Dr. Sedat BOYACI Prof. Dr. Atılğan ATILGAN	Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye Alanya Alaaddin Keykubat University, Türkiye	Determination of Energy Potential of Plant Residues from Greenhouse Courgette Cultivation
Assoc. Prof. Dr. Sedat BOYACI Prof. Dr. Atılğan ATILGAN	Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye Alanya Alaaddin Keykubat University, Türkiye	Investigation of the Effect of Energy Saving Measures on Heat Energy Requirement in Greenhouses
Mehmet Can ÖZTÜRK	Osmaniye Korkut Ata University, Türkiye	Effects of Wooden Structures on Energy Performance and Carbon Emissions
Yasir Tümay DOST Assist. Prof. Dr. Cemil KOYUNOĞLU	Yalova University, Türkiye	Biomass-Based Energy Production Plant Feasibility Study
Prof. Dr. Cengiz KARACA	Hatay Mustafa Kemal University, Türkiye	Energy Production Potential from Agricultural Residues in Kayseri Province
Prof. Dr. Cengiz KARACA	Hatay Mustafa Kemal University, Türkiye	The Potential of Biogas Production from Livestock Manure and Effects on Greenhouse Gas Reduction in Kayseri Province

08.12.2024 / Hall-3 / Online Session-3 / TSI Time - 15⁰⁰:17⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assist. Prof. Dr. Ramireddy Sushmitha

Authors	Affiliation	Presentation title
Melik Sami Khelil Sara Tallal Abdel Karim Bouzir	Mohamed Khider Biskra University, Algeria Blida University, Algeria	Orientation-Driven Design: A Pathway to Sustainable Energy Use in Architecture
Melik Sami Khelil Sara Tallal Abdel Karim Bouzir	Mohamed Khider Biskra University, Algeria Blida University, Algeria	Heritage and Sustainability: Energy-Efficient Solutions for Historical Structures
Melik Sami Khelil Sara Tallal Abdel Karim Bouzir	Mohamed Khider Biskra University, Algeria Blida University, Algeria	Reducing Energy Loss in Buildings: The Role of Next-Generation Insulation Systems
Merouane GUETIOUI Yasmina KELLOUCHE Abdelkader BOUGARA	Chlef University, Algeria	Quantifying Activation Energy of Blended Cements Using Machine Learning
Astha Bagjilewale	VIT BHOPAL University, India	Transitioning from Fossil Fuels: Addressing Environmental Challenges and Advancing Sustainable Energy Solution
Astha Bagjilewale Aryan Shashi Mishra	VIT BHOPAL University, India	Addressing Greenhouse Gas Emissions: Sources, Effects, and Mitigation Strategies for a Sustainable Future
Fatemeh DERAKHSHAN Mehrdad KARIMIMOSHAVER	Bu-Ali Sina University, India	Thermal Effects of High-Rise Buildings: A Case Study of Tehran
Assist. Prof. Dr. Ramireddy Sushmitha	G. Pulla Reddy Engineering College, India	A Study on Waste Plastic in Bitumen
Lect. Sinan GÜNEŞ Prof. Dr. Mustafa TOMBUL	Ankara University, Türkiye	The Role of Window Sizes in Time Series Analysis: An Evaluation for Energy Consumption Prediction in Public Buildings
Dr. Serkan YILDIZ Lect. Sinan GÜNEŞ	Ankara University, Türkiye	Sustainable Mosques: Design Aspects and Good Practice Examples

08.12.2024 / Hall-4 / Online Session-3 / TSI Time - 15⁰⁰:17⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Prof. Dr. Jafar MASSAH

Authors	Affiliation	Presentation title
Soha SAMI Prof. Dr. Jafar MASSAH Mohammad HAJIAN Dr. Tayyeb NAZGHELICHI Prof. Dr. Seyed Reza HASSAN-BEYGI	University of Tehran, Iran Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran	AI-Driven Prediction of Grid Electricity Imports for Industrial Buildings: A Case Study Using GRU in Konstanz
Soha SAMI Prof. Dr. Jafar MASSAH Mohammad HAJIAN Dr. Tayyeb NAZGHELICHI Prof. Dr. Seyed Reza HASSAN-BEYGI	University of Tehran, Iran Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran	Development and Evaluation of a Hybrid AI Algorithm for Enhancing the Accuracy of Photovoltaic Power Generation Prediction
Soha SAMI Abolfazl AGHAJANLOU Mohammad HAJIAN Prof. Dr. Jafar MASSAH Dr. Tayyeb NAZGHELICHI	University of Tehran, Iran Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran	Photovoltaic Power Generation Forecasting: A Systematic Review of Methods for Forecasting and Analyzing Time and Weather Inputs
Bahijjah Abdallah	Federal Polytechnic Kabo, Nigeria	Hybrid Blockchain Solutions for Supply Chain Management: Enhancing Secure and Transparent Traceability with Advanced Privacy Measures
Chaymae Sergent Prof. Dr. Yasser Karzazi	University Mohammed I, Morocco	Theoretical Design of Novel Organic Materials for Applications in Organic Solar Cells
ATMANE Amal SENGENT Chaymae KARZAZI Yasser	University Mohammed First, Morocco	Theoretical study of new organic materials of D-A-A architecture for application in solar cells
Mohamed CHOKRI Ilyas JALAFI Omar AZOUGAGH Amine BENDAHHOU Youssef EL Ouardi Mohamed ABOU-SALAMA Soufian EL BARKANY	University Mohammed Premier, Morocco University of Technology LUT, Morocco	New Photocatalysts Based on Tungsten and Niobium-Modified TiO ₂ Rutile Active Under Sunlight
Aynur Hashimova	Sumgait State University, Azerbaijan	Investigation of the First Acceptor Level Created by Copper Atoms in the Energy Band of a (18 AT. % SI) Solid Solution Crystal

08.12.2024 / Hall-5 / Online Session-3 / TSI Time - 15⁰⁰:17⁰⁰



ZOOM ID: 833 1287 1999 / PASSCODE: 060708



HEAD OF SESSION: Assoc. Prof. Dr. Yurii IVASHUK

Authors	Affiliation	Presentation title
Abdulgaffar Muhammad Halima Abdulaziz Anthony Kolade Adesugba Ibrahim Mallam Fali Anthony Unyime Abasido	Independent Researcher, Nigeria Ahmadu Bello University, Nigeria	The Financial and Energy Security Implications of Iran's Missile Development on Regional Economic Stability in the Middle East
Prof. Dr. Shalva Zarnadze Mariam Chokheli Ana Toria Lizi Nikoleishvili	Tbilisi State Medical University, Georgia	Alternative Energy and Reducing Firewood Consumption to Reduce Environmental Impact
Oleh ZIKH Assoc. Prof. Dr. Yurii IVASHUK	West Ukrainian National University, Ukraine	Powering Performance: Compensation Strategies for a Thriving Energy Sector
Vitalii BOYKO Assoc. Prof. Dr. Oksana SHYMANSKA	West Ukrainian National University, Ukraine	Navigating Volatility: Challenges and Opportunities for Businesses in the Energy Sector
Maksym RYBAK Assoc. Prof. Dr. Yurii IVASHUK	West Ukrainian National University, Ukraine	Driving Forces and Barriers to Energy Innovation: An Entrepreneurial Ecosystem Perspective
Mizanur Rahman	Bangabandhu Sheikh Mujibur Rahman Science and Technology University, Bangladesh	The Geopolitics of Energy Transition: Challenges and Opportunities in a Multipolar World
Assoc. Prof. Dr. Neha	Swami Vivekanand Subharti University, India	The Need of the World: Green Energy for Sustainable Development
Dr. Cumali TÜRKMENOĞLU Murat İN İsmail KARADAĞ	Fatih Sultan Mehmet Vakif University, Türkiye Hitsoft Harmony of Information Technologies, Türkiye	A Comprehensive Comparison of Machine Learning and Deep Learning Algorithms for System Marginal Price Forecasting in Electricity Markets

CONTENT

CONFERENCE ID	I
SCIENTIFIC & REVIEW COMMITTEE	II
PHOTO GALLERY	III
PROGRAM	IV
CONTENT	V

Author	Title	No
Mustafa Serdar GENÇ	Characterization Of Laminar Separation Bubbles On Airfoils In Low Reynolds Number Flows	1
İlyas KARASU Beyza GÖRKEMLİ BAYRAM Mustafa Serdar GENÇ	Prediction Of Laminar Separation Bubble Location Over Wind Turbine Airfoils	6
Merve AKIN Muhammet HATEM Mustafa Serdar GENÇ	Turbulent Flow Formation with Different Turbulence Grids in The Wind Tunnel: Part I-Numerical Analysis	11
Merve AKIN Sinem KESKİN Halil Hakan AÇIKEL Mustafa Serdar GENÇ	Turbulent Flow Formation with Different Turbulence Grids in The Wind Tunnel Part II-Experimental Analysis	18
Eren Anıl SEZER Muhammet HATEM Mustafa Serdar GENÇ	Turbulent Flow on Symmetric Airfoil at Low Reynolds Numbers: Part I-Numerical Analysis	24
Meva Yasemin BAŞTUĞ Zafer İPEKLİ Halil Hakan AÇIKEL Mustafa Serdar GENÇ	Turbulent Flow on Symmetric Airfoils at Low Reynolds Numbers: Part II- Experimental Analysis	30
Muhammet HATEM Eren Anıl SEZER Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	The Effect of The Turbulence on Flow Over Cambered Airfoil at Different Reynolds Numbers Part I-Numerical Analysis	37
Meva Yasemin BAŞTUĞ Zafer İPEKLİ Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	The Effect of The Turbulence on Flow Over Cambered Airfoil at Different Reynolds Numbers Part II- Experimental Analysis	45
Mithat ŞİMŞEK Nurullah GÜLTEKİN	Studying the Effects of Adding Bronze to Polymer Composite Sliding Bearings for Vehicle Applications on Vibration, Noise, and Friction Coefficient	52
Seda BELEN Ramazan AYZ	Comparison of Battery Performances Within the Scope of Electrical Load Analysis in Aircraft	61
Ahmet GANI	Design of Photovoltaic Panel-Fed Step-Up Luo Converter for Renewable Energy Applications	69
Ahmet GANI	Design of Boost Converter for Sustainable Energy Applications	76
İlker KAYALI Gülşah ELDEN	A Numerical Study of a Vanadium-Redox Flow Battery with Several Flow Field Channel Geometries	85
Edanur KILIÇ Erhan MUĞALOĞLU Saltuk Buğra SELÇUKLU Hazar KESKİN	Impact of Renewable Energy Integration on Competition and Price Dynamics in the Turkish Electricity Market	93
Mert ÖZAY Ercan ŞENYİĞİT	Supply Chain Evaluation with Multi-Criteria Decision-Making Based on ESG (Environmental, Social and Governance) Parameters	98

Büşra YILMAZ-ÜSTÜNER Süleyman BOLAT Murat BELKE	Renewable Energy and Carbon Taxes: A Bibliometric Analysis	110
Gamze GENÇ	Solar Energy Based Hydrogen Production	120
Koray Alp ARSLAN Rafet Kerem ALBAYRAK Gamze GENÇ	The effect of rooftop solar power plants in reducing the carbon footprint of factories: The case of the Aluminum and Furniture Sector	128
Yusuf TEKİN Mehmet YALÇIN	Design and Numerical Investigation of a Domestic Midi Oven with Improved Thermal Performance	135
Yusuf TEKİN Abakar Abakar ABAKAR	Design and Performance Analysis of Solar Electricity Generation System with Organic Rankine Cycle for N'djamena- Chad	148
Fatma ŞENER FİDAN Sena AYDOĞAN	Clean Clothes, Clean Purchasing: A Sustainable Approach to Buying Washing Machines Using CODAS Multi-Criteria Determination	159
Mehmet ZİLE	Optimization of Energy Management in Solar/ Wind Power Stations Using Artificial Intelligence	171
Mehmet ZİLE	Test Analysis of Power Transformers with Artificial Intelligence	177
Mustafa GENÇAY Altuğ BOZKURT Erşan Ömer YÜZER	Energy Efficiency with Waste Heat Recovery in an Industrial Facility	187
Bahadır YÖRÜR Nihal ERGİNEL	Regional Determination of Social Acceptance Factor of Clean Energy Technologies in Turkey	197
Vuslat SALALI	The Impact of Value-Based Land Readjustment Practices on Energy Efficiency from a Sustainability Perspective	209
Seyran DUMAN	Sun's Share in the European Union's Renewable Energy Policy: Germany-Turkey Comparative Analysis	216
Murat ERDEM Mert GÜRTÜRK	A YEKDEM Assessment for Solar Energy Between 2015-2023	239
Dilan ALP Azize ACAR	The Use and Importance of Biopolymers in Solar Cell Production	248
Hatice KANBUR ÇAVUŞ Caner İLDEŞ Murat ÇAVUŞ Recep ŞAHİNGÖZ	Investigation of CdTe Schottky Diodes at High Frequencies for Solar Cell Applications	264
Emre ÖZER Furkan DINCER	Effect of Soiling Loss and Structure Shading Factors on the Performance of Bifacial Panels	272
Emre ÖZER Furkan DINCER	Peak Shaving Modeling in Solar Power Plants with PVSYS	281
Selin Rüya ÇAKIR Ümit Turgay ARPACIOĞLU	An Evaluation of the Application of Photobioreactors in Buildings	290
Ahmet Eren AKKOÇ Müjdat ÖZTÜRK Gamze GENÇ	Energy Analysis of PV/T and Fuel Cell Supported Hybrid Water Heating System in Different Climatic Conditions of Turkey	299
Nehayatul Najwa Hendri Hermawan ADINUGRAHA	Energy as an Economic Driver Exploring the Impact of Green Technologies on Global Markets	314
Sarah Essam Hasan shubbar Hussein jaafar Marwah Abdulkareem Mahmood Karrar Abdulallah Azeez	Does Energy Utilization Affect the Degree of Sticky Costs? An Investigation of Energy Changes	317
Nwafor, Lilian C. Kanu, Abednego C. Yusuf, Aishat A.	Exploring Sustainable Energy Solution beyond Fossil Fuels: Mitigating Energy Crisis in Nigeria	322
Sanjana Sajan Gharat	Navigating the Energy Transition: Innovations, Challenges, and Pathways to Sustainability	331
Meltem KUTLU GÜRSEL	The Concept of Renewable Energy Resource Area in Terms of Administrative Law	337
Fatih Volkan AYYILDIZ Güller ŞAHİN	A Systematic Compilation of the Material Kuznets Curve	347

Mehmet Mustafa DENİZ Mehtap BULUT DENİZ	Renewable Energy (Solar and Wind Energy) and Accounting Dimension	358
Mehtap BULUT DENİZ Mehmet Mustafa DENİZ	Evaluation of the Auditing Report of the Independent Auditor Who Audited the Financial Statements of a Company Opinioning in this Field and Renewable Energy Production in Turkey in Terms of IAS 700 Forming an Opinion on Financial Statements and Reporting Standard	366
Fatih AKIN Selin DINÇER	The Impact of Energy Uncertainty on Economic Growth: A Panel Data Analysis for Selected European Union Countries	375
Ferhat ARI	Discussing the Relationship Between Energy Poverty and Human Rights in Türkiye's Energy Policy: The Case of Coal Subsidy	382
Ferhat ARI	Analysis of Legal Recognition of the Right to Access Energy in Türkiye	387
Mehmet BÜYÜK Ömer BERBER Necdet Sinan ÖZBEK Mustafa İNCİ	Performance Analysis of High-Gain Quadratic Buck-Boost Converter for Electric Vehicle Applications	393
Sevgi SAMYELİ Ahmet DOĞAN Mustafa ALÇI	Improvement of Voltage Profiles in Electric Power Systems with BESS Integration Using GWO Algorithm	401
Fatih SERTTAŞ	Short-Term Electricity Load Forecasting Using Artificial Neural Networks	408
Betül Sena ÇAĞLAR Devrim AKGÜN	Anomaly Detection in Industrial Machines Using Explainable AI and Acoustic Signals	416
Netice DUMAN Halil İbrahim ACAR	Design and Simulation of Acoustically Driven Laboratory Scale Thermoacoustic Refrigerator	430
Dila EKICI Gamze GENÇ	A Research on the Carbon Emission Reduction for the A-Building in Erciyes Engineering Faculty	438
Sevde ERTÜRK ÇETİNKAYA Muhammet ÇELİK Gamze GENÇ	Parameter Sensitivity Analysis for Electrochemical Performance of A Sodium-Ion Battery	446
Fowotade, S. A. Umar, A. A. Murtala Y. D. Haruna D. A. Hafsat, U. K.	Physicochemical Analysis of Spent Lube Oil for Automobiles and its Impact on Energy Consumption	456
Mrutyunjaya Muduli Kunjabihari Swain Murthy Cherukuri	Reliability Enhancement of Power System Using Phasor Measurement Units	461
Daikwo S. Amuna O.T. Simon V.O. Akowe N.A.	Comparative Production of Biogas from Cow Dung and Poultry Droppings	472
Eshkulov Nuriddin Potes Tatyana Xayitov Fayozjon	Use of Energy-Saving Building Materials in the Energy Sector	479
Chaima Gherari Farid Berrezzek Khaled Khelil	Current Sensors Faults Detection and Isolation of DFIG for Wind Turbine based on generalized observer scheme (GOS)	481
Siya Swarnima Evangeline Christina	Microbial Fuel Cells: Innovations in Sustainable Energy and Wastewater Treatment	493
Laxmi Vandana Ujjal Dey Subhasis Mahata Sandipan Mallik	Low-Cost Production of Textured Flexible Solar Cells Using Additive Manufacturing Techniques	502
Mohamad Y. Mawlawi Farid B. Chaaban	Feasibility of PV Allocation Options	508

Alper Buğra ARSLAN Hakan KARAKAYA Mehmet Ali KALLIOĞLU	Determination of Optimum Insulation Thickness for Different Wall Types and Different Fuel Types	518
İbrahim YILMAZ Nihan CAGLAYAN Ahmet Süha HANCIOĞLU	Evaluation of Hydrogen Energy Storage Risks: An Integrated Fuzzy Entropy and TOPSIS Approach for Sustainable Energy Supply	526
Nihan CAGLAYAN İbrahim YILMAZ Ahmet Süha HANCIOĞLU	Selection of the Hydrogen Energy Storage Method Using the Hybrid Fuzzy MCDM Approach: A Pathway to Sustainable Energy Solutions	537
Aykut Fatih GÜVEN	Cost-Effective and Sustainable Off-Grid Hybrid Energy Systems: Optimizing Hydrogen Integration in Microgrids Using Homer Pro	548
Aykut Fatih GÜVEN Necat UZUNER Yusuf KAYA Sümeyra İBiş	Energy Efficiency and Emission Impacts of Hybrid Energy Systems for Public Buildings: Analyzing the Role of Boilers, Natural Gas, and Gasoline Generators	567
Mehmet Enes ERSÖZ Halit ARAT Özer AYDIN	Development and Establishment of the Experimental System Required for the Combustion of Hydrogen and Natural Gas Mixtures	601
Mehmet Enes ERSÖZ Halit ARAT	Economical Assesment of Heating a House with Different Systems in Kütahya	608
Sertaç HOPOĞLU Gözde GÖKGÖZ ÇORUK	The Importance of Hydrogen in Meeting Clean Energy Needs	614
Mahmut Suat DELİBALTA	Current Situation Analysis of the Primary Energy Sources Involved in the Socio-Economic Development of Turkey	620
Halil ŞENOL Emre Aşkın ELİBOL Halil ÇOLAK	Forecasting Wind with Machine Learning: 60-Month Analysis of Turkey's Wind Energy Production with XGBoost	628
Halil ŞENOL Emre ÇOLAK	The Future of Türkiye's Electricity Generation with Machine Learning: Comparative Analysis of ANN and ARIMA Models	635
Zeynep H. OZKUL BIRGOREN Yavuz Selim DEMIREL	Foundations of Offshore Wind Farms: Historical Developments and Future Outlook	645
Tekmile CÜREBAL Yücel ÖZMEN	Numerical Investigation of the Impact of Lift-Up Building Designs with Different Core Numbers on Pedestrian-Level Wind Environment	654
Emir ALACA Seçil VARBAK NEŞE	Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power Plants and Increasing its Efficiency with Genetic Algorithm	667
Ali Onur ÇOŞKUN Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	Thermal and Flow of a Vacuum Tube Solar Collector Using Computational Methods	676
Koray Alp ARSLAN Rafet Kerem ALBAYRAK Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	Integrating Artificial Intelligence and Blockchain for Carbon Emission Management a Case Study at Erciyes University	681
Nisanur ASLAN Muhammed HATEM Sinem KESKİN Mustafa Serdar GENÇ	Numerical Investigation of The Effect of Different Shapes Applied to the Trailing Edge of the Naca2415 Airfoil on Aerodynamic Performance	687
Furkan Mahmut BEREKET Halil Hakan AÇIKEL Gamze GENÇ	Numerical Analysis of Vibration for NACA 4415 Profiled Carbon Fiber Wing	695
Kadir AYDIN Hasan Hüseyin ÇOBAN	Optimization and Cost Analysis of Hybrid Energy System for a University Campus	702
Mücella İLKENTAPAR Ahmet Alper ÖNER	Numerical and Experimental Investigation of the Flow Around a Cylinder	718
Jyothi A Goudar Thrinethra S N Murugendrappa M V Sharanappa Chapi	Balancing Power and Energy: Analysis of Electrical and Electrochemical Techniques	724

Abdelfateh BENMAKHOULF Rabie MEZOVAR	Phonon Contribution to Internal Energy, Thermal Expansion Coefficient and Grüneisen Parameter of Cubic Boron Nitride	741
Sadiq, M.S Singh, I.P Ahmad, M.M	Carbon Farming as a Tool for Climate Resilience in Smallholder Agriculture	748
Sadiq, M.S Singh, I.P Ahmad, M.M Sani, B.S	The Role of Agribusiness in Facilitating Farmers' Access to Carbon Markets	765
Ebrahim Mohammadi	Hydrocarbon potential and petroleum system of the Oligo-Miocene Qom Formation, Iran: A review	778
Farhan Ahmad Kusumiyati Kusumiyati Mochamad Arief Soleh Muhammad Rabnawaz Khan Ristina Siti Sundari	The Microclimate of Screen House: An Optimal Environment for Growth, Disease Resistance, and Quality Fruit Development in Solanaceous Crops (Cherry Tomato and Chili)	786
Yasir Ziya GÜLTAK Alkan ALKAYA	Estimating the State of Charge of a Lithium-Ion Battery Using Machine Learning Algorithms	793
Furkan MUMCU Bilal SUNGUR Alirza KALELİ	Experimental Investigation of the Effect of Air-Cooled Thermal Management System on Cell Temperatures in A Lithium- Ion Battery Module	800
Furkan MUMCU Bilal SUNGUR Alirza KALELİ	Experimental Investigation of the Effect of Different Discharge Rates on Cell Temperatures in A Lithium-Ion Battery Module	808
Melisa EKŞİ Abdullah ZORLU Mustafa ÖZCAN	Photovoltaic Module Production and Quality Standards and The Evaluation of Testing in Manufacturer's Quality Processes	815
Pınar Yeşim AKGÖZ Mustafa ÖZCAN	Recycling of End-of-Life Photovoltaic Panels in Türkiye: A Step Towards Circular Economy	833
İkram BABAZADE	Activator of Low- Frequency Mechanical Vibrations to Increase the Debit of Hard-To-Recover Deposits	851
Ömer ÖKSÜZ Burak MARKAL	Effect of Refrigerant Types on Flow Boiling in Microchannels	858
Fatih ATCI Burak MARKAL	The Role of Surface Wettability for Flow Boiling in Microchannels	868
İkram BABAZADE O. Aliyeva N. Shıxkarimov X. Zulfuqarova	Increasing the Efficiency of Oil and Gas Production Enterprises Through the Use of Smart Grids Technologies	879
Alperen EVCİMEN Burak MARKAL	Correlations Developed for Microchannel Flow Boiling	886
Betül ŞAHİN	Coal and Pyrolysis of Coal	897
Bello Ibrahim Monday Habeeb Bolaji Onisabi Olojede Abayomi Opeyemi Bankole Mustapha Olatunji Abbas Hussein Enezoza	Application of North West Corner Optimization Method to Rural Electrification Using Renewable Energy Sources	904
Chisom C. Okpala Ifeoma F. Chukwuma Victor O. Apeh Ozoemena E. Eje	Artificial Intelligence in Biodiesel Production: A Systematic Review	911
Amin Ghaderi Seyed Reza HASSAN-BEYGI Rasol Hematiyan	Numerical investigation of the effect of diesel-biodiesel-bioethanol fuel mixtures on the performance parameters and emissions of a direct injection diesel engine.	921
Adirek Vajrapatkul Boonta Wayupab Pinmanee Vajrapatkul	The Determinant of Natural Resource Rents in BVAR Framework	933

Adirek Vajrapatkul Boonta Wayupab Pinmanee Vajrapatkul	Dynamic Interrelationships Among Crude Oil, Natural Gas, Gold, and Oil Prices in Thailand: A Bayesian Vector Autoregressive Approach	944
Adirek Vajrapatkul Boonta Wayupab Pinmanee Vajrapatkul	Exploring the Interrelationships between Economic Indicators and Natural Resource Rents in Thailand: A Two-Stage Least Squares Analysis	957
Megha Shruti	Energy Management in Building Management System by incorporating AI driven Smart Grids	968
Muralidhar MANAPURAM	Why and How Much Energy Do We	977
Muhammad Sufyaan Khan	Energy Efficiency Economics and Policy	997
Semih YILMAZ Kubilay BAYRAMOĞLU M. Turhan ÇOBAN	Comparison of COP in Maritime Applications Using Modern Refrigerants	1010
Kubilay BAYRAMOĞLU Semih YILMAZ	The Impact of Waste Heat Recovery System of a Ship to EEXI	1020
Fatih OĞUZ Cemil KOYUNOĞLU	Improvement of Boiler Room Ventilation in an Urban Health Center in a Computational Fluid Mechanics Study	1029
Berna YAVUZ PEHLİVANLI Hatice KANBUR ÇAVUŞ	Potential of Yozgat Graphite Deposits and Contribution to Energy Technologies	1035
Berna YAVUZ PEHLİVANLI	Turkey's Oil Shale Potential and Energy Future; Sorgun Basin (Yozgat)	1043
Ahmet DAYANÇ Feridun KARAKOÇ	Thermomechanical Stress Analysis of a Motorcycle Brake Disc Under Predefined Conditions Using Finite Element Method	1049
Ahmet DAYANÇ Feridun KARAKOÇ	Design of a Diamond TPMS Heat Sink Using Implicit Modeling: Comparative Analysis of Thermal and Mechanical Properties	1053
Turan UYSAL Esra ÇIRAK	Rare Earth Element Recovery from Kemiklitepe (Karaman-Turkey) Bauxite Ore by Water Leaching	1058
Cemre YILMAZ Dilek ERDİRENÇELEBİ	A Physical Separation Methodology and its Effects on the Waste Animal Fat Content Prior to Biodiesel Production Process	1064
Cemre YILMAZ Dilek ERDİRENÇELEBİ	The Effect of Reaction Time on Biodiesel Quality from Waste Animal Fat Using Ethanol	1073
Sedat BOYACI Atılğan ATILGAN	Determination of Energy Potential of Plant Residues from Greenhouse Courgette Cultivation	1079
Sedat BOYACI Atılğan ATILGAN	Investigation of the Effect of Energy Saving Measures on Heat Energy Requirement in Greenhouses	1085
Yasir Tümay DOST Cemil KOYUNOĞLU	Biomass-Based Energy Production Plant Feasibility Study	1093
Cengiz KARACA	Energy Production Potential from Agricultural Residues in Kayseri Province	1101
Cengiz KARACA	The Potential of Biogas Production from Livestock Manure and Effects on Greenhouse Gas Reduction in Kayseri Province	1108
Astha Bagjilewale	Transitioning from Fossil Fuels: Addressing Environmental Challenges and Advancing Sustainable Energy Solution	1118
Ramireddy Sushmitha	A Study on Waste Plastic in Bitumen	1123
Sinan GÜNEŞ Mustafa TOMBUL	The Role of Window Sizes in Time Series Analysis: An Evaluation for Energy Consumption Prediction in Public Buildings	1134
Serkan YILDIZ Sinan GÜNEŞ	Sustainable Mosques: Design Aspects and Good Practice Examples	1142
Soha SAMI Jafar MASSAH Mohammad HAJIAN	AI-Driven Prediction of Grid Electricity Imports for Industrial Buildings: A Case Study Using GRU in Konstanz	1156

Tayyeb NAZGHELICHI Seyed Reza HASSAN-BEYGI		
Soha SAMI Jafar MASSAH Mohammad HAJIAN Tayyeb NAZGHELICHI Seyed Reza HASSAN-BEYGI	Development and Evaluation of a Hybrid AI Algorithm for Enhancing the Accuracy of Photovoltaic Power Generation Prediction	1166
Aynur Hashimova	Investigation of the First Acceptor Level Created by Copper Atoms in the Energy Band of a (18 AT. % Si) Solid Solution Crystal	1176
Abdulgaffar Muhammad Halima Abdulaziz Anthony Kolade Adesugba Ibrahim Mallam Fali Anthony Unyime Abasido	The Financial and Energy Security Implications of Iran's Missile Development on Regional Economic Stability in the Middle East	1180
Neha	The Need of the World: Green Energy for Sustainable Development	1188
Cumali TÜRKMENOĞLU Murat İN İsmail KARADAĞ	A Comprehensive Comparison of Machine Learning and Deep Learning Algorithms for System Marginal Price Forecasting in Electricity Markets	1192

CHARACTERIZATION OF LAMINAR SEPARATION BUBBLES ON AIRFOILS IN LOW REYNOLDS NUMBER FLOWS

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

Because energy production costs have decreased during the past 20 years, wind energy use has advanced quickly. Atmospheric boundary layer, wind speed, thermal convection, unsteady and low Reynolds (Re) number flow problems affect the cost and energy production of wind turbines, and this effect creates important design problems. In addition, the aviation sector needs research and development on issues such as flight instability, vibration, fuel consumption, and the negative effects of low velocity flows on unmanned (UAV) and micro (MHA) aircraft. The aerodynamic behaviors of wind turbines, MHAs, and UAVs should be studied and specified in order to increase their payload capacity, durability, range, and efficiency. By understanding low Re number flows, the negative effects of laminar separation bubbles such as instability, vibration, and fuel consumption will be solved. It is necessary to model the transition to turbulence, which causes negative effects such as laminar separation bubble and vibration, noise, and aerodynamic performance decrease, and also to analyze the dependence on the wing profile parameters for the transition start and bubble formation. Low Reynolds number flows, including stochastic and three-dimensional unsteady processes and transition to turbulence, are still poorly understood. Measuring, modeling and predicting laminar separation bubbles and transition to turbulence are still challenging tasks. Furthermore, there is a knowledge gap in fluid mechanics in determining turbulence and transition to turbulence, which are defined as the most important unsolved problems in classical physics. This study aims to present detailed information and mathematical expressions for separation bubbles.

Keywords: Airfoil; Low Reynolds number flow phenomena; Laminar separation bubble.

1. Introduction

Low Reynolds number flows can be seen in UAVs, MHAs, wind turbine blades, model aircraft, bird species, and bees. According to the studies, it has been determined that laminar separation bubbles can form in the range of 10000 and 1000000 Reynolds numbers (Genç et al. 2012). Although the flow is initially laminar in low Re number flows, it changes to an indefinite structure during the transition period to turbulence. In the pre-transition region, an adverse pressure gradient that can cause isolated laminar flow may be dominant. With the effect of these adverse pressure gradients, the flow separated from the surface reattaches to the surface after transitioning to turbulence, and a laminar separation bubble is formed between the separation and reattachment points. There are two types of this separation bubble: short and long. (Owen and Klanfer, 1953; Tani, 1964). A measure of shortness or longness has been defined by Owen and Klanfer (1953) for the specific bubbles seen on thin airfoils at high Re numbers (on the order of 5,000,000). This definition states that a bubble is short if, at the time of separation, the width to displacement thickness ratio is roughly 100, and long if it is 10,000. However, there is no measure to characterize the length and height of a bubble in low Reynolds flows where viscous flow is dominant.

At low Reynolds flows, the transition to turbulence on the airfoil is one of the criteria that cause laminar separation bubbles. Transition to turbulence is classified into natural, bypass, wake-induced, reverse, and separated flow (Mayle, 1991; Genç et al., 2012). In general, transition to turbulence is a phenomenon seen in different types in different applications, such as natural on a flat plate, bypass in highly turbulent flows, induced in the wake region in turbomachinery flows, and separated flow in the pressure region of airfoils (Langtry and Menter, 2005; Genç et al., 2012). The roughness of the flow surface and the turbulence intensity are also the strongest factors affecting the transition process (Uranga, 2011). Since the reverse pressure gradient depends

on the geometry and shape of the body, it can occur strongly in sudden shape changes such as airfoils. Therefore, in addition to the dominance of viscous forces in low Reynolds number flows, it is also very important to investigate the adverse pressure gradient effect on airfoils in laminar separation bubble predictions.

2. Estimation of the onset of transition

In the engineering design of an aircraft flying at low speeds, the estimation of the location of the transition to turbulence and the formation of the bubble is very important. The boundary layer integral parameters obtained from the velocity profiles in the flow over the object provide critical information about the transition. It is known that the relationships between these parameters are of great theoretical importance in fluid mechanics and aerodynamics.

The boundary layer integral parameters consist of the boundary layer thickness (δ), displacement thickness (δ^*), and momentum thickness (θ). From these parameters, the displacement-thickness Reynolds number (Re_{δ^*}), momentum thickness Reynolds number (Re_{θ}), and shape factor (H) are calculated. These parameters, which are dimensionless numbers, provide qualitative information about the transition process. δ is the distance along a boundary layer from the walls to the point where the flow velocity essentially reaches the “free stream” velocity (U_{∞}). The velocity in the flow direction can be expressed as $u = \bar{u} + u'$. Flow properties are not evaluated solely by the average velocity of the vector fields. In addition, time-dependent velocity values provide qualitative information about the flow physics. Time-dependent velocity data measured with a constant temperature anemometer (CTA) hot-wire system or a particle image velocimetry (PIV) system is used to calculate the boundary layer integral and transition parameters, as well as to analyse the flow properties.

The boundary layer characteristics explained consist of classical equations available in fluid mechanics books, all derived from flat plates. Using these derived equations, turbulence and turbulent transition models have been made so far, and while full predictions regarding these flows cannot be made, they are still inadequate in predicting concepts such as flow separation and separation bubbles that have been mentioned in the last two decades. In order to define and characterize the instability process that causes flow separation in the transition region, the general characterization of the statistical properties of the boundary layer development should be characterized according to the airfoil and flow changes, flow components, and fluctuations.

3. Laminar separation bubble characterization

For the prediction of transition in a separated shear layer, some empirical and semiempirical models have been developed using the transition and boundary layer properties. Some pressure measurements on the flat plate have been investigated recently by researchers (Mayle, 1991; McAullife and Yaras, 2005; Lang et al., 2004; Roberts, 1975; Davis et al., 1987; Volino and Bohl, 2004; Hatman and Wang, 1999; Praisner and Clark, 2007; Robert and Yaras, 2004 and 2006). Roberts (1975), Davis et al. (1987), Volino and Bohl (2004) show strong sensitivity for low free stream turbulence intensities. The Reynolds number (Re_{s-ts}) depending on the distance between the separation point and the beginning of the transition to turbulence in the separated shear layer according to the long separation bubble and short bubble case suggested by Mayle (1991) can be expressed in terms of the Reynolds number depending on the momentum thickness between the separation and the beginning of the transition as follows:

$$Re_{s-ts} = 300Re_{\theta_s}^{0.7} \quad (\text{short bubble}) \quad (1)$$

$$Re_{s-ts} = 1000Re_{\theta_s}^{0.7} \quad (\text{long bubble}) \quad (2)$$

Re_{s-ts} is the Reynolds number based on the distance between the separation and the transition start. Re_{θ_s} is the momentum thickness Reynolds number at the separation point. These Reynolds numbers are calculated from the boundary layer properties obtained from the velocity components measured using the hot-wire or PIV system. Another empirical definition of the transition model based on several experiments performed by Hatman and Wang (1999) is given in Equation 3:

$$Re_{ts} = 1.081Re_s + 26805 \quad (3)$$

where Re_{ts} is the Reynolds number based on the transition onset in a separated shear layer. Re_s is the Reynolds number based on the distance between the separation point and the leading edge. For high-load low-pressure turbine blades, another criterion is mathematically expressed by Praisner and Clark (2007):

$$\frac{L}{S_s} = 173Re_{\theta_s}^{-1.227} \quad (4)$$

where, L is the distance between the separation and the transition start. S_s is the surface distance from the stagnation point to the separation position. Also, a mathematical expression based on the semiempirical transition onset has been proposed by Robert and Yaras (2004). Although it has the same functional form as the Mayle (1991) expression, the effects of free-stream turbulence and surface roughness are taken into account. For a smooth surface associated by Robert and Yaras (2006):

$$Re_{s-ts} = [785 - 30TF(\%)]Re_{\theta_s}^{0.7} \quad (5)$$

where, TF denotes Taylor's turbulence factor, and in the study (Hatman and Wang, 1999), this value is taken as 0 for the transition prediction. For example, Figure 1 shows the differences between the experimental and theoretical predicted values for the distances between the separation and turbulence transition points according to the mathematical expressions we mentioned. The models defined by Praisner & Clark (2007) and Mayle (1991) indicate a suitable assumption for the short bubble. However, their predictions for the long bubble remained inconsistent. Different from these results, Hatman & Wang (1999) and Mayle (1991) developed another model that explains the short bubble prediction and the suitable assumption with the long bubble properties. The Roberts and Yaras model is useful for predicting the transition location for flat plates. However, none of these models can provide a comprehensive explanation. In addition, the laminar separation bubble and transition formation on an airfoil have not been successfully described so far. There is no specific transition prediction model for random airfoils. Although calculations on aerodynamic bodies have been considered for many years to be similar to analyses performed on a flat plate, there are differences.

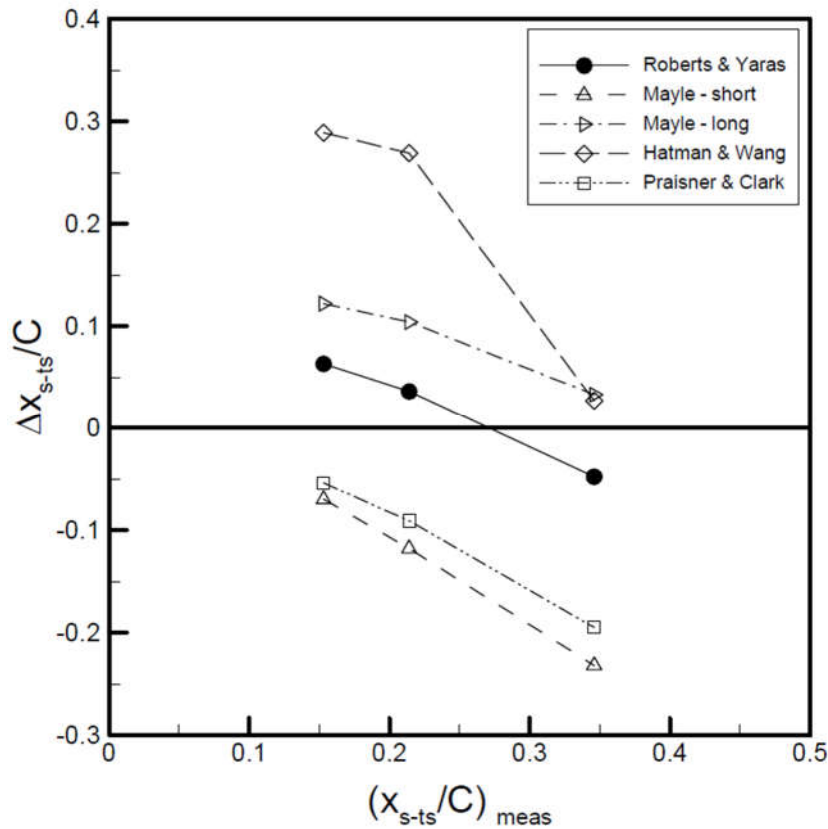


Figure 1. Comparison graph with transition onset prediction equations (McAuliffe and Yaras, 2005)

4. Conclusion and Recommendations

For the prediction of transition in a separated shear layer, some empirical and semiempirical models have been developed using the transition and boundary layer properties. However, none of these models can provide a comprehensive explanation. Moreover, the laminar separation bubble and transition formation on an airfoil have not been successfully described so far. There is no specific transition prediction model for random airfoils. Although calculations on aerodynamic bodies have been considered for many years to be similar to analyses performed on a flat plate, there are differences. Therefore, laminar separation bubbles and transition formations at low free stream turbulence intensities should be more accurately defined.

Thanks and Information Note

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Davis, R. L., Carter, J. E., Reshotko, E. Analysis of transitional separation bubbles on infinite swept wings. *AIAA journal*, 1987, 25(3), 421-428.
- Genç, M.S., Karasu, I., Açikel, H. H., Akpolat, M. T. Low Reynolds number flows and transition. *Low Reynolds number aerodynamics and transition*. InTech, 2012a.
- Hatman, A., Wang, T. A prediction model for separated-flow transition. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(3), 594-602.
- Lang, M., Rist, U., Wagner, S. Investigations on controlled transition development in a laminar separation bubble by means of LDA and PIV. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(1), 43-52.

- Langtry, R., Menter, F. Transition modeling for general CFD applications in aeronautics. 43rd AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. 2005.
- Mayle, R.E. The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines. *Journal of Turbomachinery*, 1991, 113, 509-537.
- McAuliffe, B. R., Yaras, M. I. Separation-bubble-transition measurements on a low-Re airfoil using particle image velocimetry. *ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- Owen, P.R. and Klanfer, L., On the laminar boundary-layer separation from the leading edge of a thin aerofoil, *Aeronautical Research Council Technical Report, C.P. No. 220*. 1953.
- Praisner, T. J., Clark, J. P. Predicting transition in turbomachinery—Part I: A review and new model development. *Journal of Turbomachinery*, 2007, 129(1), 1-13.
- Roberts, S. K., & Yaras, M. I. Modeling of boundary-layer transition. *ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- Roberts, S. K., Yaras, M. I. Effects of surface-roughness geometry on separation-bubble transition. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128(2), 349-356.
- Roberts, W. B. The effect of Reynolds number and laminar separation on axial cascade performance. *Journal of Engineering for Power*, 1975, 97(2), 261-273.
- Tani, I. Low-speed flows involving bubble separations. *Progress in Aerospace Sciences*, 1964, 5, 70-103.
- Uranga, A. Investigation of transition to turbulence at low Reynolds numbers using Implicit Large Eddy Simulations with a Discontinuous Galerkin method. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 2011.
- Volino, R. J., Bohl, D. G. Separated flow transition mechanism and prediction with high and low freestream turbulence under low pressure turbine conditions. *ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2004.

**RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARI ÜZERİNDEKİ LAMİNER AYRILMA KABARCIĞI
KONUMUNUN TAHMİNİ****İlyas KARASU**

Doç. Dr., Samsun Üniversitesi, Özdemir Bayraktar Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay
Mühendisliği Bölümü, Samsun-Türkiye

Beyza GÖRKEMLİ BAYRAM

Doç Dr, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri-Türkiye

Mustafa SERDAR GENÇ

Prof. Dr, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri-Türkiye,
(Sorumlu Yazar)

Özet

Bu çalışmada, birçok mühendislik uygulamasında kullanılan düşük Reynolds sayılı kanatlar/paletler üzerinde üretilen laminer ayırma kabarcığının (LSB) pozisyon parametrelerini tahmin etmek için Yapay Arı Kolonisi Programlama (ABCP) ve hızlı Yapay Arı Kolonisi Programlama (qABCP) algoritmaları kullanılmıştır. Örneklem olarak NACA 2415 kanat profili seçilmiş olup, eğitim ve test verileri deneylerinden alınmıştır. Algoritmaların önerdiği modeller çeşitli hata analizleri kullanılarak değerlendirildikten sonra en iyi modellerin denklemleri gösterilmiştir. Eğitim verilerinde daha viskoz etkilere sahip düşük Reynolds sayıları olmamasına rağmen, ayrılma ve yeniden bağlanma noktaları hem ABCP hem de qABCP algoritmaları tarafından başarıyla tahmin edilmiştir. Çeşitli veri kümeleri için, farklı modeller ayrılma ve yeniden bağlanma noktaları için en iyi sonuçları üretmiştir. Bu denklemler, havacılık ve enerji sektörleri için bir kanat veya kanatlar oluşturmak amacıyla tasarım işlemlerini basitleştirecektir.

Anahtar Kelimeler: Kanat profili, ABCP, Laminer ayrılma kabarcığı, Makine öğrenmesi.

**PREDICTION OF LAMINAR SEPARATION BUBBLE LOCATION OVER WIND TURBINE
AIRFOILS****Abstract**

In this study, the Artificial Bee Colony Programming (ABCP) and fast Artificial Bee Colony Programming (qABCP) algorithms were used to estimate the position parameters of the laminar separation bubble (LSB) produced over low Reynolds number wings/blades, which are used in many engineering applications. The NACA 2415 airfoil was selected as the sample, and training and testing data were taken from its experiments. The equations of the best models were shown after the models suggested by the algorithms were assessed using various error analyses. The separation and reattachment points were successfully estimated by both the ABCP and qABCP algorithms, despite the absence of low Reynolds numbers with more viscous effects in the training data. For various data sets, different models produced the best results for the separation and reattachment points. These equations will make it simpler for their design operations to create a wing or wings for the aviation and energy sectors.

Keywords: Airfoil; ABCP; Laminar separation bubble, Machine Learning.

Giriş

Birçok mühendislik uygulamalarında düşük Reynolds sayılı akışla karşılaşılır. Orta ve küçük ölçekli yatay rüzgar türbinleri, dikey rüzgar türbinleri, insansız hava araçları (İHA) ve mikro İHA'lar bunlara örnektir. Reynolds sayısı 1×10^6 değerinin altında düşük Reynolds olarak adlandırılır (Yarusevych, ve Boutilier, 2011). Bu rejimde yüksek Reynolds sayılı akışlardan farkı olarak viskoz etkiler baskındır. Bu rejimde, akış kanada

laminer olarak gelir, viskoz etkilerden dolayı kanat yüzeyinden yüzeyden ayrılır, ayrılan bu akış türbülansa geçer, türbülansa geçtikten sonra yüzeye tutunur. Laminer ayrılma ile türbülanslı tutunma arasındaki alana laminer ayrılma kabarcığı denir. Bu laminer ayrılma kabarcığı aerodinamik performansta düşüşe, titreşime sebep olabileceği gibi bazı durumlarda tutunma gerçekleşemezse tutunma kaybına (stol) sebebiyet verebilir (Genç vd, 2012a).

Laminer ayrılma kabarcığının bu olumsuz etkilerini elimine edebilmek için akış kontrol yöntemleri uygulanabilmektedir. Akış harici bir kaynaktan üfleme yapılarak akışa enerji kazandırılabilir, harici güç ve sistem gerektiren bu sistemlere aktif kontrol sistemleri denir. Herhangi bir enerji gerektirmeden sabit cihazlarla yapılan kontrol yöntemine ise pasif kontrol denilmektedir. Pasif kontrolün amacı akışı erken türbülansa geçirip akışı ayrılmaya karşı daha dirençli hale getirmektir (Gad el Hak, 2000). Uçaklarda ve rüzgar türbinlerinde kullanılan girdap üreteçleri pasif yöntem için en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi olup, ayrıca kısmi esneklik, yüzey pürüzlülüğü, kanat yüzeyine yarıklar açılması gibi yöntemler de pasif yöntemlere örnekler arasındadır (Genç vd, 2020).

Çalışılan bu düşük Reynolds sayısı aralığında, akışın ayrılıp ayrılmadığını, ayrılıyorsa nerden ayrıldığını ve tutunmanın nerde olduğunu bilmek oldukça önemlidir. Ayrılma ve tutunmanın yerini bulmak için deney yapmak veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analiz yapmak gerekir ki bu hem zaman alıcı hem maliyetli bir işittir. Bu maliyeti düşürmek için günümüzde yeni ve ucuz yöntemler denenmektedir. Literatürde günümüzde hızlı gelişen yapay zekâ uygulamalarının aerodinamik ile ilgili farklı problemlerde kullanımını buna bir örnektir (Malecha, ve Sobczyk, 2024 , Zou vd, 2024).

Bu çalışmada, yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak ayrılma kabarcığının yerini tahmin etmek ve daha ucuz yolla tasarımcılara denklemler sunmak için çalışma yapılmıştır.

Gereç ve Yöntemler

Bu çalışmada eğitim ve test verileri olarak Genç vd. (2012) ve Açıkkel (2013) tarafından yayınlanan NACA 2415 kanat profilinde oluşan laminer ayrılma kabarcığına ait deneysel veriler kullanılmıştır. Bu verilerin bir kısmı yağ yüzey ile görselleştirme, bir kısmı da yüzeyden basınç ölçümü ile belirlenmiş olup detaylı bilgi için ilgili makalelerden ve Karasu (2021)'nin çalışmasına bakılabilir.

ABC algoritması, Karaboğa (2005) tarafından geliştirilen bir algoritma olup, bal arılarının davranışlarını örnek alır. Bu çalışmada kullanılan anlamsal (semantic) ABCP algoritmasında bu yöntemden ilham alarak arıların yiyecek arama davranışını temel alan bir araştırma stratejisi benimsenmiştir. Evrimsel hesaplama tabanlı otomatik programlama tekniklerinde, çözümün temsil biçimindeki farklılıklar ve problemin belirli bir boyuta bağlı olmaması gibi nedenlerle, etkili bir arama için özel komşu çözüm üretim yöntemleri ve bilgi paylaşım mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar, bilgi paylaşımını doğrudan bir boyut üzerinden değil, belirli düzeyde benzerlik gösteren alt parçalar üzerinden gerçekleştirerek yüksek bir yerel bütünlük sağlamayı hedefler. sABCP ve qsABCP yöntemleri, benzerlik ölçütü olarak semantik bir yaklaşımı esas almıştır. Ayrıca, hızlı sABCP algoritması, yapay arı kolonisi tabanlı yaklaşımlarda sıklıkla karşılaşılan yavaş bölgesel yakınsama sorununa çözüm sunar (Görkemli, 2015; Görkemli ve Karaboğa,2019).

Tablo-1'de çalışmada kullanılan eğitim ve test verileri ve sonuçlar verilmiştir. İlk 15 veri eğitim için kullanılmıştır turuncu ile boyanmış son 8 veri ise test için kullanılmıştır. Bu çalışmada Xs ayrılma noktasının Reynolds sayısı (Re) ve hücum açısı (α) bağlı olarak bir denklem çözücü ile çözülebilecek denklem olarak ifade edilmesi amaçlanmıştır.

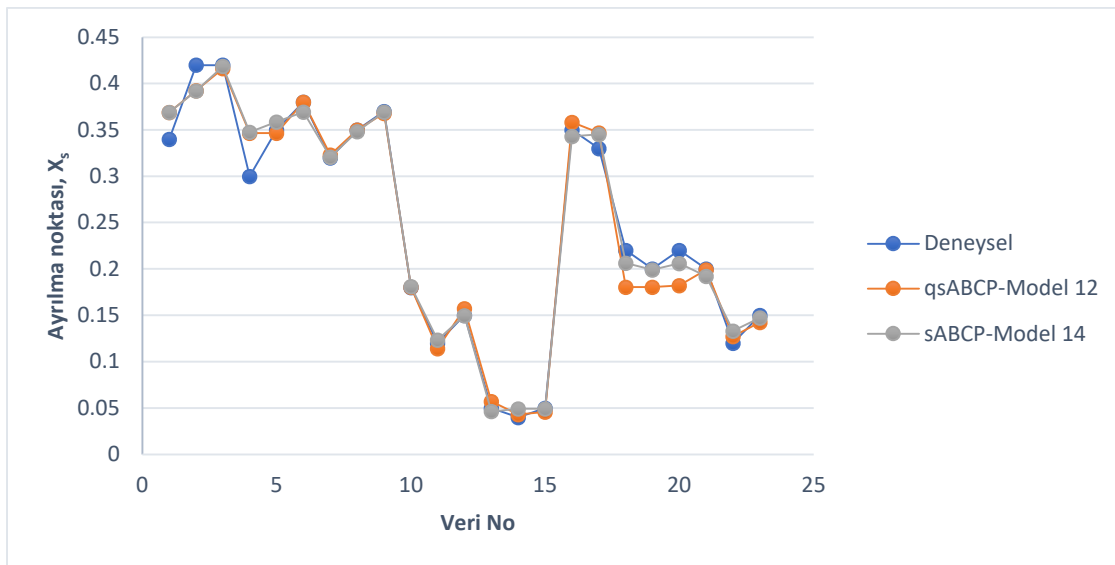
Sonuçlar ve Tartışma

Tablo-1'de en iyi sonuçlar alınan veren sABCP ve qsABCP modellerinin sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar Şekil'1de grafik olarak da sunulmuştur. Şekil-1 incelendiğinde genel olarak sABCP Model 14'ün qsABCP Model 12'ye göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Tahminlerden en yüksek farkın 4.veri olan Reynolds sayısı 1×10^5 4° hücum açısında olduğu gözlemlenmiştir, benzer şekilde 0° hücum açısında hem Reynolds sayısı 1×10^5 hem de Reynolds sayısı 2×10^5 için fark diğer verilere göre daha yüksektir. Bu 3 veri de eğitimde kullanılan verilerdir. Diğer eğitim verileri gayet uyumlu bir şekilde tahmin edildiği görülebilir. Test verileri incelendiğinde qsABCP Model 12'nin verilerinin sABCP Model 14'ün verilerine daha göre uzak tahminde bulunduğu ve Xs mesafesini genel olarak daha kısa bulduğu görülebilir.

Tablo 2’de her iki model için de Hataların Mutlak Değerlerinin Ortalaması (MAE), Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE), Hataların Karesinin Ortalaması (MSE), Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü (RMSE), değerleri verilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere sABCP modelinin tüm hata metrikleri qsABCP modeline göre daha iyidir.

Tablo 1. Eğitim ve test için kullanılan veriler (Genç vd, 2012b ve Açıkl,2013) ve en iyi veren modellerin sonuçları.

Veri No	Açı (°)	Reynolds Sayısı	Deneysel X_s	qsABCP-Model 12	sABCP-Model 14
1	0	1×10^5	0.34	0.369	0.369
2	0	2×10^5	0.42	0.392	0.392
3	0	3×10^5	0.42	0.416	0.419
4	4	1×10^5	0.3	0.347	0.347
5	4	2×10^5	0.35	0.347	0.359
6	4	3×10^5	0.38	0.380	0.369
7	6	1×10^5	0.32	0.323	0.321
8	6	2×10^5	0.35	0.350	0.348
9	6	3×10^5	0.37	0.368	0.369
10	8	2×10^5	0.18	0.181	0.181
11	12	1×10^5	0.12	0.114	0.124
12	12	3×10^5	0.15	0.157	0.150
13	15	1×10^5	0.05	0.057	0.046
14	15	2×10^5	0.04	0.043	0.049
15	15	3×10^5	0.05	0.046	0.049
16	4	0.5×10^5	0.35	0.358	0.343
17	4	0.75×10^5	0.33	0.347	0.345
18	8	0.5×10^5	0.22	0.180	0.206
19	8	0.75×10^5	0.2	0.180	0.199
20	8	3×10^5	0.22	0.182	0.206
21	8	1×10^5	0.2	0.199	0.192
22	12	1.5×10^5	0.12	0.127	0.133
23	12	2×10^5	0.15	0.143	0.147



Şekil 1. Tüm veri seti için deneysel ve sABCP ve qsABCP ayrılma noktası tahminleri

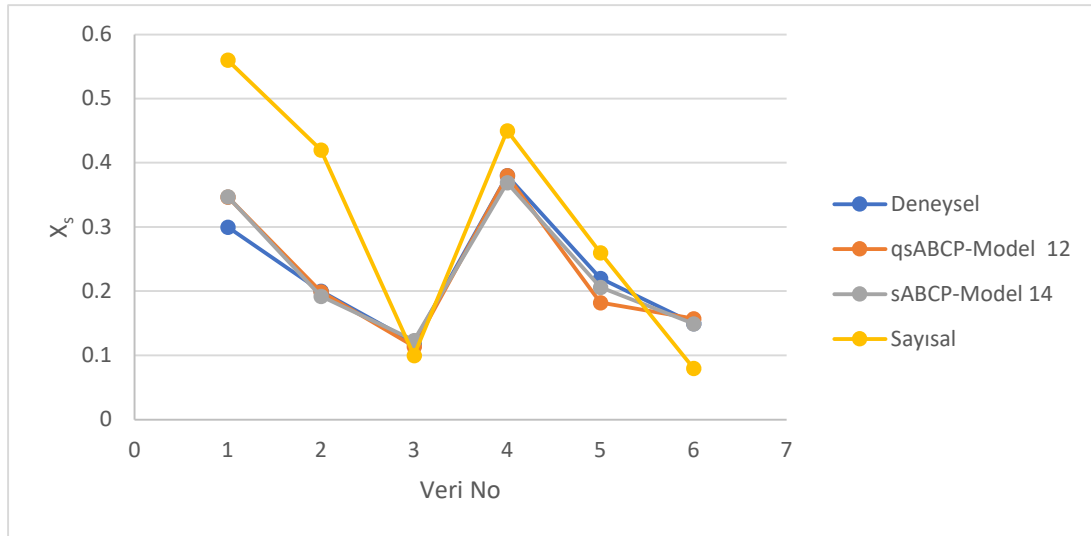
Tablo 2. Tüm veri setinin farklı hata metrikleri

Model	Model No	MAE	MAPE	MSE	RMSE	MAE
sABCP	14	0.00965	4.761021	0.000222	0.014890	0.00965
qsABCP	12	0.01227	6.036859	0.000341	0.018453	0.01227

Tablo 3. Bazı durumlar için deneysel (Genç vd, 2012b), sayısal (Karasu,2011) ve mevcut çalışmadaki modellerden alınan sonuçlar

Veri No	Açı (°)	Reynolds Sayısı	Deneysel X_s	qsABCP-Model 12	sABCP-Model 14	k-k _L - ω Transition
1	4	1×10^5	0.3	0.347	0.347	0.56
2	8	1×10^5	0.2	0.199	0.192	0.42
3	12	1×10^5	0.12	0.114	0.124	0.1
4	4	3×10^5	0.38	0.380	0.369	0.45
5	8	3×10^5	0.22	0.182	0.206	0.26
6	12	3×10^5	0.15	0.157	0.150	0.08

Tablo 3 ve Şekil-2’de bazı durumlar için daha önceki bahsedilen deneysel çalışmadan ve mevcut çalışmadan alınan sonuçların yanı sıra Karasu (2011) tarafından geçişli akışlar için geliştirilen bir türbülans modeli olan k-k_L- ω Transition modeli ile yapılmış sonuçlar verilmiştir. Genel olarak kıyaslandığında mevcut çalışmaların sonuçlarının deney daha yakın olduğu görülebilir.

**Şekil 2.** Bazı durumlar için deneysel (Genç vd, 2012), sayısal (Karasu,2011) ve mevcut çalışmadaki modellerden alınan sonuçların kıyaslanması

Sonuç

Bu çalışmada deneysel veriler kullanılarak düşük Reynolds sayılı akışta oldukça önemli olan laminer ayrılma kabarcığının ayrılma noktaları anlamsal ABCP (sABCP) ve hızlı anlamsal qsABCP algoritmaları kullanılarak tahmin edilmiştir. Modelleri eğitmek ve sonuçları test amacıyla daha önceden yayınlanmış NACA 2415 verileri kullanılmıştır. Sonuçlar bu yöntemlerle ayrılma noktalarının başarılı bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir. Bu yöntemlerle kullanıcılar ayrılma noktalarını zaman alıcı deneyler veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerine gerek kalmaksızın daha önceki verileri kullanarak veya daha az deney veya analiz yaparak bu algoritmalarla elde edilecek denklemler vasistasıyla (proje devam ettiği için çalışmada denklemler paylaşılmamıştır) elde edebilirler.

Öneri olarak benzer çalışmalar farklı kanat profilleri için yapılabilir ayrıca gerekli en az eğitim verisi tespitine yönelik çalışmalara yapılarak deney sayısı azaltılabilir.

Teşekkür ve Bilgilendirme Notu

Bu çalışma 122M826 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında yapılmış olup yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar

Açıkel HH, (2013), Düşük Reynolds Sayılı Akışlarda Kanat Profili Üzerindeki Akışa Ses Dalgalarının Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi. FBE, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.

Açıkel, H.H. (2013). Experimental investigation of effect of acoustic forcing to flow over an aerofoil at low Reynolds number flows. Msc Thesis, Department of Energy Systems Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, Turkey.

Gad-el-Hak M. Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management. Cambridge University Press; 2000

Genç, M. S., Karasu, İ., Açıkel, H. H., & Akpolat, M. T. (2012a). Low Reynolds Number Flows and Transition. In Low Reynolds Number Aerodynamics and Transition. IntechOpen.

Genç, M. S., Karasu, İ., & Açıkel, H. H. (2012b). An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers. Experimental Thermal and Fluid Science, 39, 252-264.

Genç, M. S., Koca, K., Demir, H., & Açıkel, H. H. (2020). Traditional and New Types of Passive Flow Control Techniques to Pave the Way for High Maneuverability and Low Structural Weight for UAVs and MAVs. In Autonomous Vehicles. IntechOpen.

Gorkemli, B., & Karaboga, D. (2019). A quick semantic artificial bee colony programming (qsABCP) for symbolic regression. Information Sciences, 502, 346-362

Görkemli, B. , (2015). Yapay arı koloni programlama (ABCP) yöntemlerinin geliştirilmesi ve sembolik regresyon problemlerine uygulanması. Erciyes Üniversitesi. FBE, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi.

Karasu İ, (2011) Düşük Reynolds Sayılı Akışlarda Kanat Profili Üzerinde Türbülansa Geçişin ve Laminer Ayrılma Kabarcığının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi. FBE, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.

Malecha, Z., & Sobczyk, A. (2024). Using Artificial Intelligence to Predict the Aerodynamic Properties of Wind Turbine Profiles. Computers, 13(7), 167.

Yarusevych, S., & Boutilier, M. S. (2011). Vortex shedding of an airfoil at low Reynolds numbers. AIAA journal, 49(10), 2221-2227.

Zou, Z., Xu, P., Chen, Y., Yao, L., & Fu, C. (2024). Application of artificial intelligence in turbomachinery aerodynamics: progresses and challenges. Artificial Intelligence Review, 57(8), 222.

**TURBULENCE LEVEL WITH DIFFERENT TURBULENCE GRIDS IN THE WIND TUNNEL:
Part I-Numerical Analysis****Merve AKIN**

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye
ORCID: 0009-0002-8185-689X

Muhammet HATEM

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department
of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

Wind turbines, unmanned aerial vehicles, micro and nano air vehicles operate at low Reynolds numbers. In real life, the turbulence level varies with time and location. A turbulence grid is used to simulate the turbulence that exists in our lives in the wind tunnel. At low Reynolds numbers, a laminar separation bubble is formed on the airfoil. In order to study the effect of turbulence on the laminar separation bubble, it is desired to obtain certain turbulence values in the tunnel. In this case, various grid designs have been made to obtain the desired turbulence values. In this study, three different turbulence grids were designed to obtain different turbulence values. These turbulence grids were placed at the test chamber entrance of the wind tunnel. A numerical analysis was performed using the k- ϵ turbulence model to predict the flow inside the wind tunnel with the ANSYS Fluent program. As a result of the analysis, the turbulence intensity, velocity and pressure variation inside the wind tunnel were evaluated. As a result, while the turbulence intensity value inside the tunnel was below one when no grid was installed at the entrance of the wind tunnel, the turbulence intensity value, velocity and pressure inside the tunnel increased when a turbulence grid was installed at the entrance of the test chamber. The three designed screens were compared with each other, and it was observed that the turbulence intensity increases as the hole diameter increases. Similarly, the values of velocity and pressure also increased.

Keywords: Turbulence; Low Reynolds Number; Turbulence Grid; Wind Tunnel, Airfoil.

Introduction

So far, many wing designs have been inspired by creatures in nature. Various examples can be given in the aviation sector. Some of these examples are wind turbine blades, unmanned aerial vehicles. These vehicles operate in low Reynolds number flows. In low Reynolds number flows, viscous effects are more pronounced, so the wing is more affected by viscous effects. Laminar separation bubble occurs on the blade due to viscous effects (Kirk & Yarusevych, 2017). There is limited information about the laminar separation bubble characteristics in a turbulent flow. By studying the effect of turbulence on the laminar separation bubble, some aerodynamic aircraft can operate more efficiently. By modeling turbulence inside the wind tunnel, the effect of turbulence on the laminar separation bubble can be seen. For this reason, the turbulence intensity value in the wind tunnel can be brought to the desired level with the turbulence grid placed inside the tunnel.

In order to obtain different turbulence intensities and to evaluate the noise spectra, turbulence baffles of different shapes were placed in three different locations at the entrance of the tunnel. Using NACA 0012 airfoil and cylinder, a noise study with the effect of turbulence was performed and high turbulence levels were obtained with the baffle positioned closest to the exit of the constriction funnel. However, an efficient result could not be obtained due to noise pollution. Therefore, the screen positioned closer to the test chamber gave better results (Bowen et al., 2022). In this study, reference was taken from the study by Bowen et al. In another

study, three different square hole turbulence screens were designed at 80000 and 125000 Reynolds numbers at 4° angle of attack using NACA 0018 airfoil. In this experimental study, they obtained turbulence intensities between 0.06% and 1.99%. They investigated the characteristics of the laminar separation bubble with increasing turbulence. They also observed that the turbulence intensity increases with increasing hole diameters of the turbulence grid (Istvan & Yarusevch, 2018).

In another study, an experimental study was carried out in a water tunnel at 5300 and 20000 Reynolds numbers using the NACA 0012 airfoil. The lift and drag coefficients of the airfoil, CL and CD, were measured when the turbulence intensity of the flow varied between 0.6% and 6.0%. The porosity of the screen used is 64%. The variation in turbulence was obtained by varying the distance L from the bulkhead to the airfoil. Three free-flow turbulence levels of 6, 2.6 and 0.6% of the turbulence level of the flow were obtained with L = 14 M and 41 M, respectively, and by removing the bulkhead (Wang et al., 2014). They compared horizontal and vertical axis wind turbines by numerical analysis method (Pope et al., 2010).

The effect of the turbulence grid on the flow characteristics is studied. How it affects parameters such as flow velocity, turbulence intensity and pressure drop are discussed. Here, the ratio of the aperture size (M) of the turbulence grid to the rod diameter (d) is called the mesh size ratio (M/d) and it is suggested that this ratio should be 5 for the flow structure to be smooth and periodic (Laws & Livesey, 1978). An experimental study was carried out in laminar and turbulent flow to investigate the uneven pressure acting on the cylinder surface. Some axial and circumferential pressure plugs and dynamic pressure transducers were used on this cylindrical body. They designed different turbulence grids to create more periodic and larger turbulence in the wind tunnel. They determined the mesh size ratio ($M/d \approx 5$) with reference to Laws and Livesey. They designed 3 different sizes of turbulence grids in accordance with this ratio and placed them inside the tunnel. They investigated the effects of turbulence length scale and free flow turbulence on the cylinder with the placed turbulence grids. As a result of the investigation, they concluded that the energy level of the irregular pressure acting on the surface of the cylinder increases with the increase in turbulence length scale and turbulence intensity (Maryami et al., 2020).

Within the scope of this study, three different turbulence grids were designed and how they change the parameters such as turbulence intensity, velocity and pressure in the wind tunnel were observed using numerical method. It is aimed to obtain high turbulence by increasing the turbulence intensity in the case where the grid is placed in the tunnel.

Materials and Methods

Firstly, using Solidworks program, turbulence grid designs Grid-1, Grid-2 and Grid-3 were made as shown in Figure 1. Turbulence grid dimensions were designed with reference to the study by Bowen et al. The bar diameter d, mesh size M and occupancy ratios of the turbulence screens are given in Table 1.

Table 1. Dimensions of Turbulence Grid Designs

Grids	Diameter (d), mm	Mesh M, mm	Occupancy Rates
Grid-1	6	30	0.41
Grid-2	10	54	0.38
Grid-3	19	75	0.55

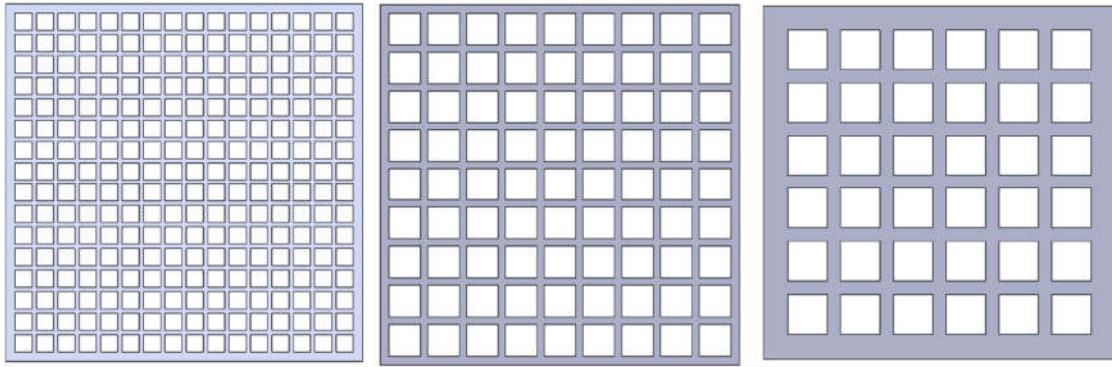


Figure 1. Turbulence Grids Designs

The designed turbulence grids were placed at the entrance of the test chamber in the wind tunnel using the ANSYS program SpaceClaim software. In ANSYS Meshing module, mesh independence study (Table 2) was performed. Then, the appropriate number of meshes was determined and meshing was performed. There are 270,000 mesh number of elements in the modeling. Figure 2 shows the mesh images of Grid-1, Grid-2 and Grid-3 grid designs. After the meshing process, numerical analysis was performed using the k-e turbulence model with ANSYS Fluent software. Inlet velocity values of 1 m/s and 2 m/s were entered.

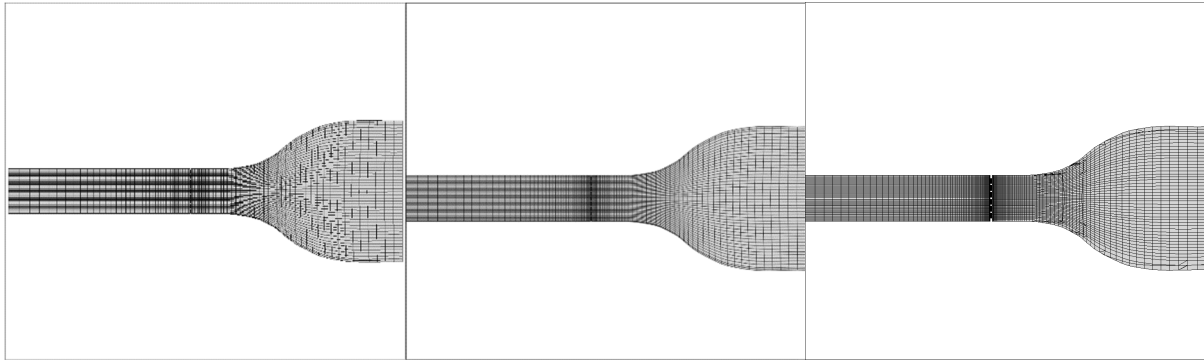


Figure 2. Grid-1 Grid-2 and Grid-3 Mesh Images

Table 2. Mesh Independence Study Results

Num of Elements	Turbulent Intensity at Entrance of Test Section
200,000	2.24
270,000	2.25
350,000	2.25

Findings and Discussion

As a result of the numerical analysis of the designed turbulence grids, turbulence intensity, velocity and pressure data were obtained. Grid-1, Grid-2 and Grid-3 were each analyzed at two different speeds. By performing numerical simulations, it is possible to obtain important information about the behavior of the fluid and to obtain performance predictions for different wind systems (Pope et al., 2010). This study shows how turbulence grids affect the turbulence inside the tunnel. The turbulence intensity, velocity and pressure contours are analyzed respectively.

- Turbulence Intensity

Turbulence intensity contours of Grid-1, Grid-2 and Grid-3 with inlet velocities of 1 m/s and 2 m/s are given in Figure 3. When the turbulence intensities of each grid are compared, the turbulence intensities increase as the hole diameters of the grids increase. At 1 m/s inlet velocity, the turbulence intensity values for Grid-1, Grid-2 and Grid-3 at the same point are 0.93, 1.38 and 2.33, respectively. At 2 m/s inlet velocity, turbulence intensity values for Grid-1, Grid-2 and Grid-3 at the same point are 0.97, 1.43 and 2.27 respectively.

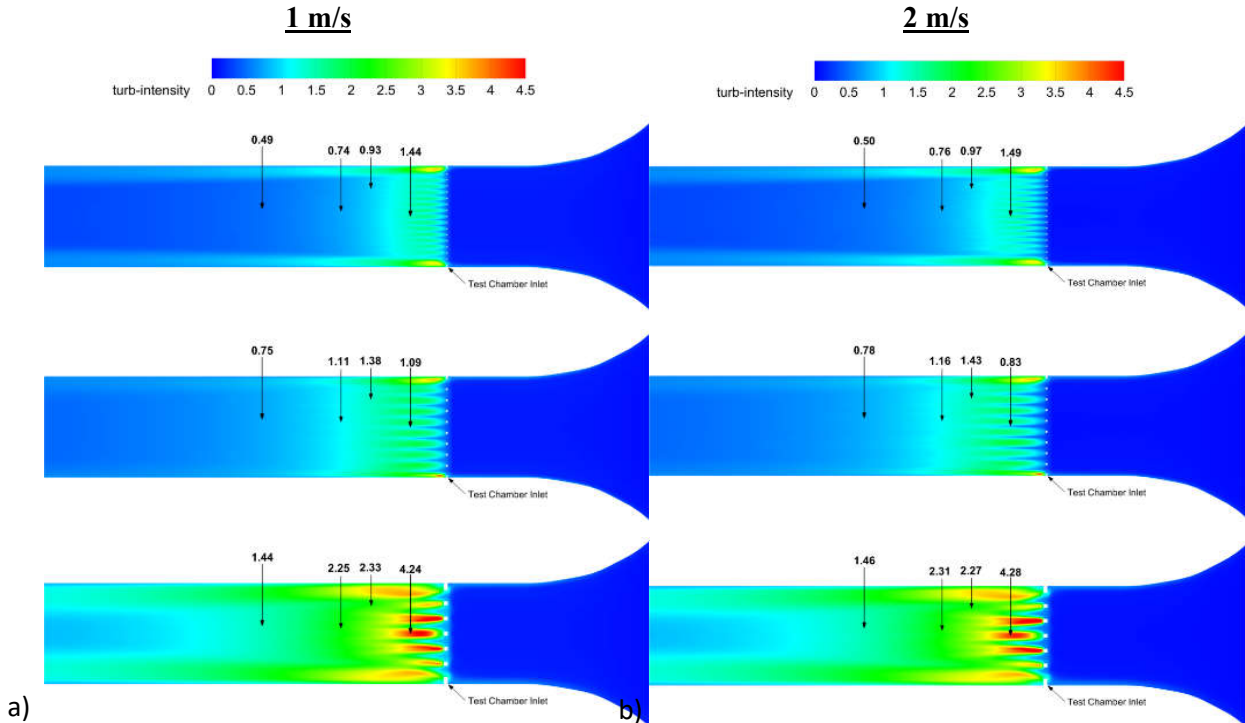


Figure 3. Turbulence Intensity Contours a) 1 m/s b) 2 m/s

- Velocity

The velocity contours of Grid-1, Grid-2 and Grid-3 with inlet velocities of 1 m/s and 2 m/s are given in Figure 4. When the velocities of each grid are compared, the velocities of the grids increase as the hole diameters increase. At 1 m/s inlet velocity, the velocity values for Grid-1, Grid-2 and Grid-3 at the same point are 11.13, 10.20 and 16.54, respectively. At 2 m/s inlet speed, the velocity values for Grid-1, Grid-2 and Grid-3 at the same point are 22.54, 20.27 and 34.16 respectively. The fact that the velocity at the same point in Grid-2 is lower than Grid-1 is due to the turbulence grid shapes.

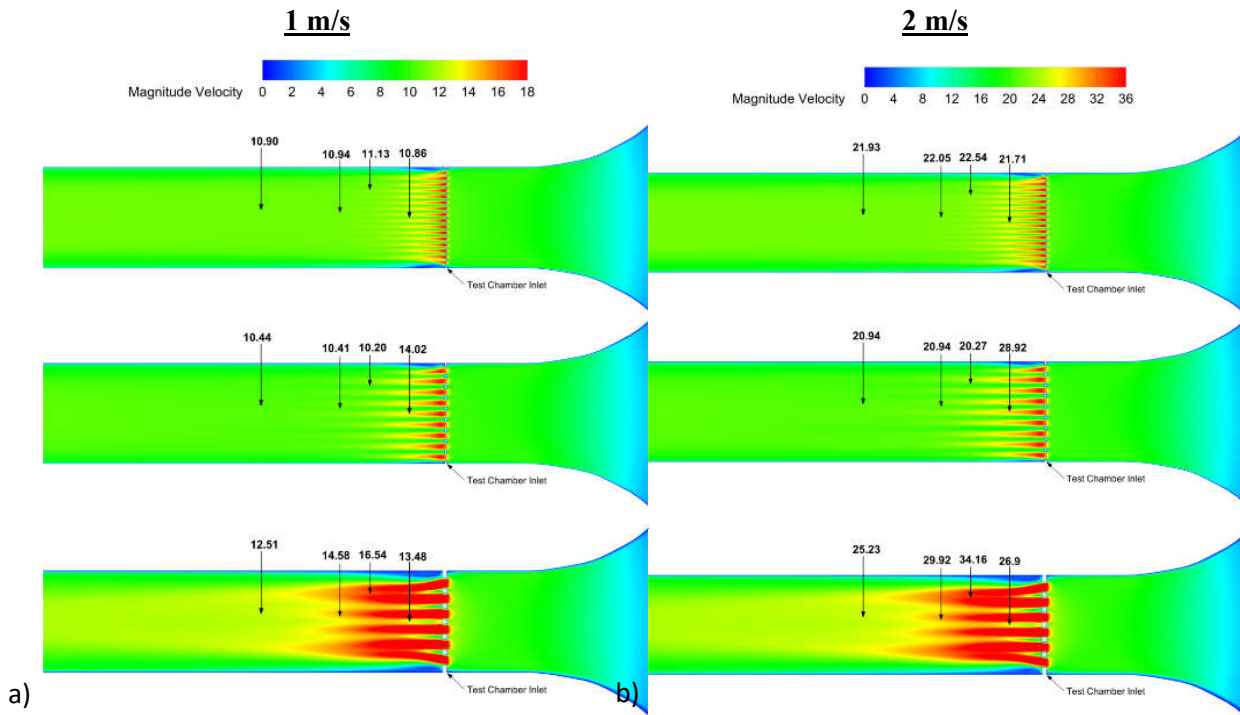


Figure 4. Velocity Contours a) 1 m/s b) 2 m/s

- Pressure

The pressure contours of Grid-1, Grid-2 and Grid-3 with inlet velocities of 1 m/s and 2 m/s are given in Figure 5. When the pressures of each grid are compared, it can be seen that as the hole diameters of the grids increase, their pressures also increase. At 1 m/s inlet velocity, the pressure values for Grid-1, Grid-2 and Grid-3 at the same point are 75.92, 63.96 and 167.71 respectively. At 2 m/s inlet velocity, the pressure values for Grid-1, Grid-2 and Grid-3 at the same point are 311.61, 253.45 and 715.55 respectively. The fact that the velocity at the same point in Grid-2 is lower than Grid-1 is due to the turbulence grid shapes.

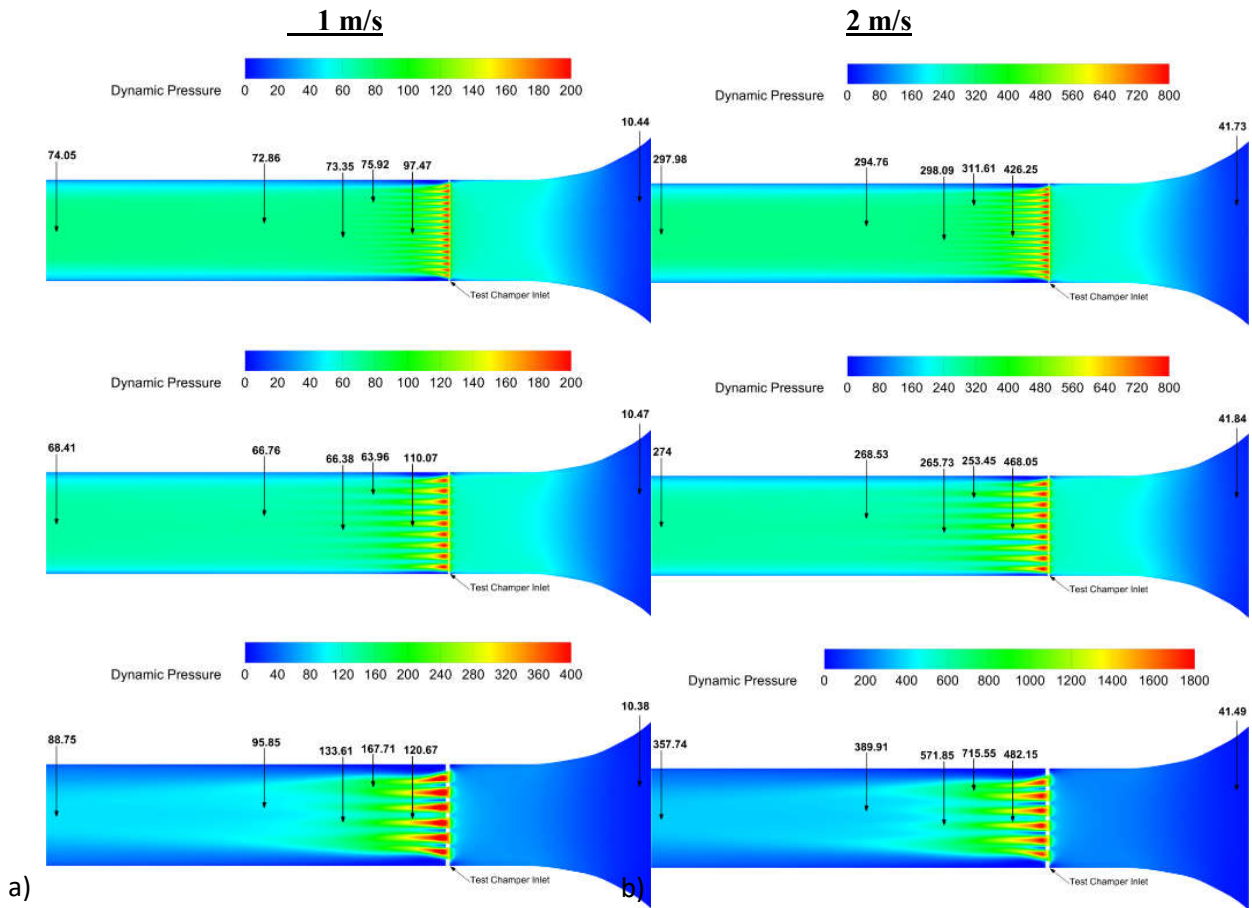


Figure 5. Pressure Contours a) 1 m/s b) 2 m/s

The results of the numerical analysis are evaluated in detail. In order to compare the turbulence intensity values, several points were determined and turbulence intensity, velocity and pressure values were taken from these points. It was observed that there is an inverse relationship between turbulence intensity, velocity and pressure. Therefore, at the point determined to measure the parameters, the velocity and pressure values of Grid-2 were lower than Grid-1 due to the shape of the turbulence grid. When the numerical analysis results are compared, the pressure decreased as the hole diameter decreased. Turbulence intensity and velocity increased as the hole diameter increased.

Conclusion and Recommendations

In this study, three different turbulence grids were designed and how they change the parameters such as turbulence intensity, velocity and pressure in the wind tunnel were observed using numerical method. It is aimed to obtain high turbulence by increasing the turbulence intensity in the case where the grid is placed in the tunnel. In order to compare the turbulence intensity values, several points were determined and turbulence intensity, velocity and pressure values were taken from these points. The following results are found:

- Turbulence intensity, velocity and dynamic pressure changes were investigated by designing different turbulence grids.
- Turbulence increased as the hole diameters of square hole turbulence grids increased.
- Pressure drop was realized as the hole diameter decreased in the turbulence grids.
- Different turbulence grids can be designed to obtain different turbulence values.

Thanks and Information Note

The authors gratefully acknowledge the funding provided by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under project no. 122M826.

References

- Kirk, T. M., & Yarusevych, S. (2017). Vortex shedding within laminar separation bubbles forming over an airfoil. *Experiments in Fluids*, 58, 1-17.
- Bowen, L., Celik, A., Azarpeyvand, M., & da Silva, C. R. I. (2022). Grid generated turbulence for aeroacoustic facility. *AIAA Journal*, 60(3), 1833-1847.
- Istvan, M. S., & Yarusevych, S. (2018). Effects of free-stream turbulence intensity on transition in a laminar separation bubble formed over an airfoil. *Experiments in Fluids*, 59(3), 52.
- Wang, S., Zhou, Y., Alam, M. M., & Yang, H. (2014). Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 26(11).
- Pope, K., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2010). Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 35(9), 2102-2113.
- Laws, E. M., & Livesey, J. L. (1978). Flow through screens. *Annual review of fluid mechanics*, 10(1), 247-266.
- Maryami, R., Showkat Ali, S. A., Azarpeyvand, M., & Afshari, A. (2020). Turbulent flow interaction with a circular cylinder. *Physics of Fluids*, 32(1).

**TURBULENT FLOW FORMATION WITH DIFFERENT TURBULENCE GRIDS IN THE WIND TUNNEL Part II-Experimental Analysis****Merve AKIN**

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye
ORCID: 0009-0002-8185-689X

Sinem KESKİN

PhD. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Halil Hakan AÇIKEL

Assist. Prof. Dr. Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department
of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

Today, wind turbines, micro and nano aircraft operate in low Reynolds number flows. At low Reynolds numbers, viscous forces can dominate inertial forces, resulting in flow separation and a transition from laminar to turbulent flow. In this case, inverse pressure gradients and laminar separation bubbles can occur. Various experiments have been conducted in wind tunnels to see how turbulence affects the laminar separation bubble. In this study, in order to investigate the effect of turbulence grids on the flow and how they affect the turbulence intensity, two different turbulence grids are placed at the entrance of the test chamber of the wind tunnel in the numerical analysis. First, the turbulence intensity was obtained by numerical and experimental analysis without turbulence grids. Then, two turbulence grids were designed and their numerical analysis was performed. Experimental analysis was performed with the selected Grid-5 turbulence grating. In the experimental study, 3 strips of Plexiglas material with dimensions of 3 cm x 50 cm were cut and placed horizontally at the entrance of the test chamber of the wind tunnel and velocity and turbulence results were obtained with a hot wire anemometer in the wind tunnel. These results were compared with the numerical analysis. As a result of the comparisons, it was observed that the turbulence intensity value, which was approximately below one, increased when the turbulence grid was placed. Thus, the simulation of turbulence occurring in nature in the wind tunnel was successful.

Keywords: Turbulence; Low Reynolds Number; Turbulence Grid; Wind Tunnel, Airfoil.

Introduction

Studies on renewable energy, micro and mini air vehicles have attracted worldwide interest over time. As a result of this interest, studies on low Reynolds number flows and the laminar separation bubble have gained importance. Many experimental studies have been carried out on the characteristics of the laminar separation bubble and the cause of its formation (McCullough & Gault, 1951). There is no clear statement about the characteristics of the laminar separation bubble in turbulent flow.

Turbulence is an important phenomenon in fluid mechanics. Modeling turbulence in wind tunnels is important to increase the reliability of experimental studies. Turbulence grids are used to model the turbulence inside the wind tunnel and to bring the turbulence intensity to the desired level. In one study, an open circuit subsonic wind tunnel was designed. The geometry of the diffuser and settling chamber was obtained using standard

formulas. In order to regulate the flow into the tunnel, tests were carried out using different baffles at the inlet and outlet of the settling chamber using circle, square and honeycomb shapes (Gonsalves et al., 2019).

Another experimental study was conducted to investigate how turbulence behaves on rigid boundaries using different mesh sizes. Different screens with small, medium and large mesh sizes were used. In the analysis with the small mesh size, it was observed that the turbulence was more intense and less turbulent. In the analysis with the medium sized screen, they obtained a little more turbulence, while in the turbulence screen with large holes, it was examined that larger and more turbulence structures were formed. The effect of rigid boundaries was more pronounced and turbulence developed more regularly in the case of large perforated grids (Raushan et al., 2018).

There is an experimental study on the formation of a separation bubble on airfoils. Flow visualization was performed with the liquid film method. The experiments were conducted on two-dimensional flow at low supersonic speeds. In the results obtained, it was emphasized that the separation bubble is in a certain range of Reynolds number (Tani, 1964). An experimental study was carried out on the separation and transition characteristics of the NACA 0018 airfoil at 50000 and 250000 Reynolds numbers between 0° and 21° angle of attack. As the Reynolds number and angle of attack increased, the laminar separation bubble moved upward and its length decreased (Boutilier and Yarusevych, 2012). Laminar flow separation and laminar separation bubble occurring at low Reynolds numbers negatively affected the performance of airfoils (Carmichael, 1981). A detailed study was carried out on the performance of airfoils. At that time, the design of airfoils for flows below 300000 Reynolds number was a difficult process and not fully solved. A study that contributed to the understanding of the main problems of fluid mechanics at that time (Lissaman, 1983). Experimental studies were carried out between 100000 and 200000 Reynolds numbers using the NACA 0018 airfoil. The free speed turbulence intensity varied between 0.09% and 2.03%. With increasing turbulence intensity, it was observed that the lift force increased at some angles of attack and this delayed stall. As the turbulence intensity increased, separation of the laminar separation bubble occurred earlier and re-attachment occurred earlier (Istvan et al., 2018).

This study presents an experimental and numerical study with the design of two turbulence grids to obtain the desired turbulence intensity values. The experimental study was carried out at Erciyes University Energy Systems Engineering Wind Engineering and Aerodynamics (WEAR) Laboratory. The turbulence intensity was determined experimentally by placing turbulence grids at the entrance of the test chamber with an area of 50 x 50 cm² in the suction open type wind tunnel in the laboratory.

Materials and Methods

The experiment was carried out in a wind tunnel installed in the WEAR Laboratory of the Energy Systems Engineering Department of Erciyes University. The wind tunnel has a square test chamber with a cross section of 50 cm² × 50 cm². It is a low speed suction type wind tunnel. The tunnel has low free flow turbulence intensity. Velocity measurement and turbulence intensity measurement were performed with a hot wire anemometer.

Firstly, the empty tunnel analysis was performed both numerically and experimentally without grids in the wind tunnel. As a result of the analysis, turbulence intensity and velocity data were obtained. Then the experimental and numerical analyses were compared. Afterwards, turbulence grid designs were created as shown in Figure 1. Numerical and experimental analysis were performed and compared.



Figure 1. Grid-4 and Grid-5 images

The numerical analysis starts by creating the geometry of the wind tunnel. Afterwards, the mesh was discarded by performing a mesh independence study (Table 1) suitable for the geometry. Mesh images are given in Figure 2.

Table 1. Mesh Independence Study Results

Num of Elements	Turbulent Intensity at Entrance of Test Section (3 cm 3-bar)
200,000	2.24
270,000	2.25
350,000	2.25

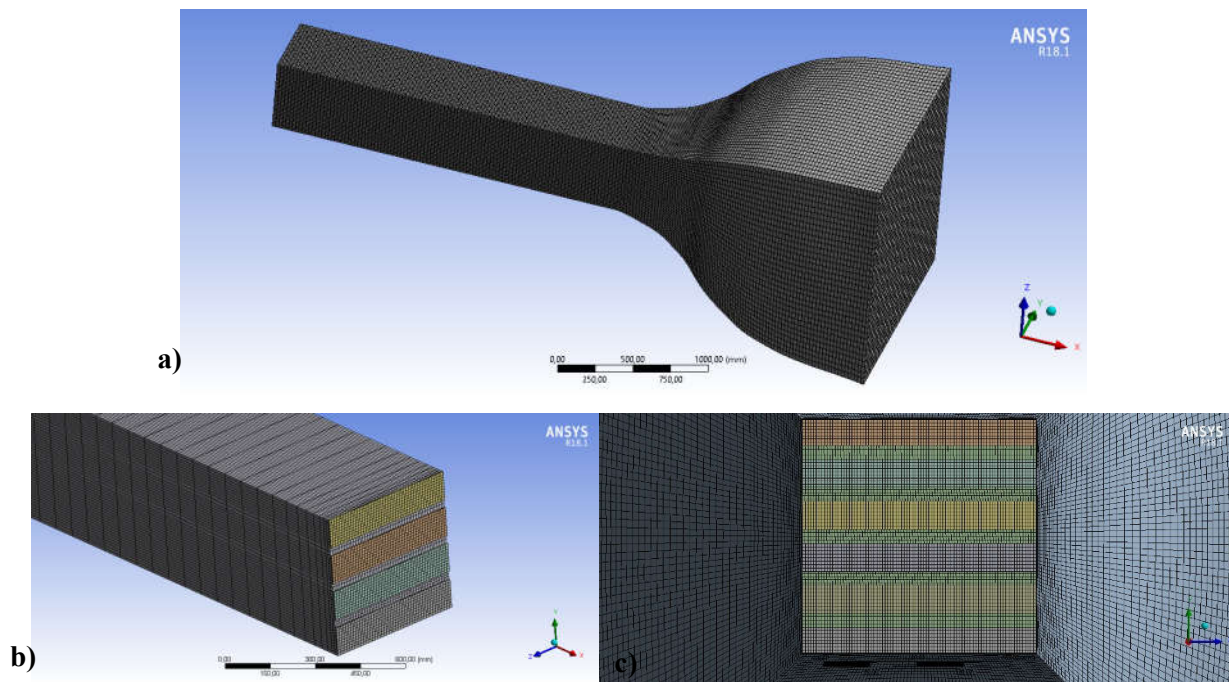


Figure 2. Mesh Images a) Gridless b) Grid-4 c) Grid-5

The k-ε turbulence model was selected and an empty tunnel analysis was performed and 2 grids were placed at the entrance of the test chamber. As a result of the analysis, turbulence intensity and velocity data were obtained. Experimental analysis was also performed by selecting a three-bar grid. In the experimental study, velocity and turbulence intensity measurements were made along the y^+ coordinate to see the effects of the turbulence grid. The measurements were carried out with a Dantec Dynamics multi-channel constant temperature meter. With a single hot wire probe anemometer and Dantec Dynamics 2D traverse system, measurements were taken from several points vertically by determining a location horizontally.

Findings and Discussion

The turbulence intensity results of the numerical and experimental analysis of the empty tunnel are given in Figure 3. The turbulence intensity value is about 0.07% for the numerical analysis and about 0.7% for the experimental analysis. The difference of 0.1 is due to the fact that during the experimental analysis there is a flow regulating grid with very small holes used to regulate the flow at the inlet of the wind turbine. Since it is very difficult and time consuming to model this grid numerically, the flow regulating grid was not modeled during the numerical modeling. Numerous numerical and experimental analyses were performed and the

difference between them was always 0.1. In the experimental studies, since the test chamber is symmetrical and the hot-wire experiment is a long and time-consuming experiment, measurements were taken halfway through the tunnel. It was confirmed by previous studies that there was no difference between top and bottom scanning. Since the turbulence grid is also symmetrical, it does not pose a problem.

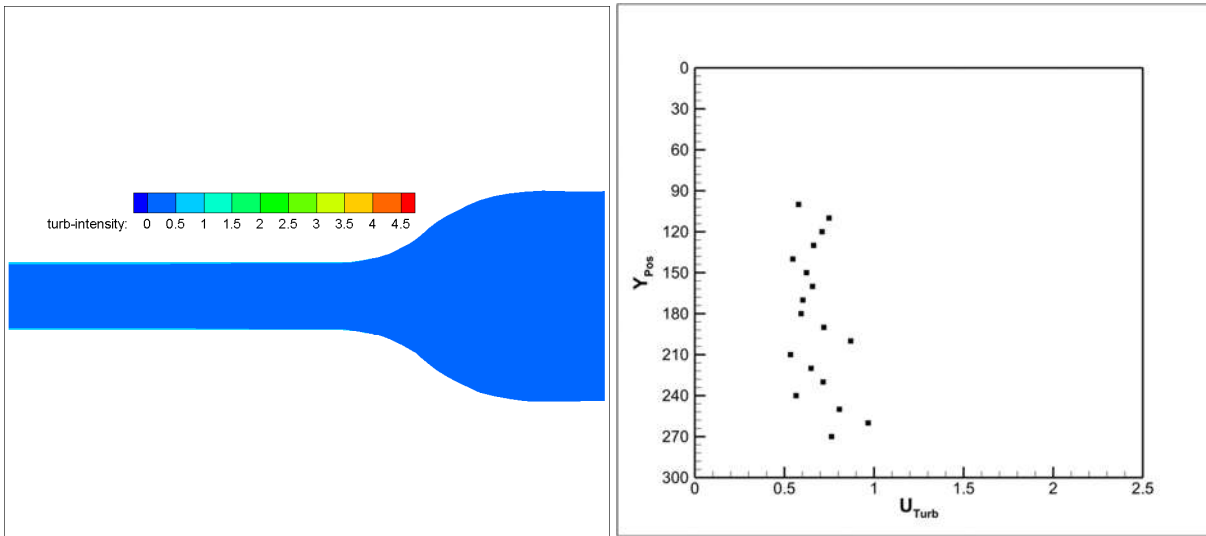


Figure 3. Numerical and experimental analysis of a gridless wind tunnel

When the experimental and numerical analyses performed inside the wind tunnel without turbulence grids are compared, the same results are obtained.

The results of the numerical analysis of the designed Grid-4 are given in Figure 4. Here turbulence intensity and velocity contours are given. It is seen that the turbulence increases when the turbulence grid is placed. While the turbulence intensity was 0.7% without the grid, it increased up to 27%. When turbulence intensity and velocity results are compared, there is an inverse relationship between them. At the point where the turbulence intensity increases, the velocity is low. Where the velocity is high, the turbulence intensity is low.

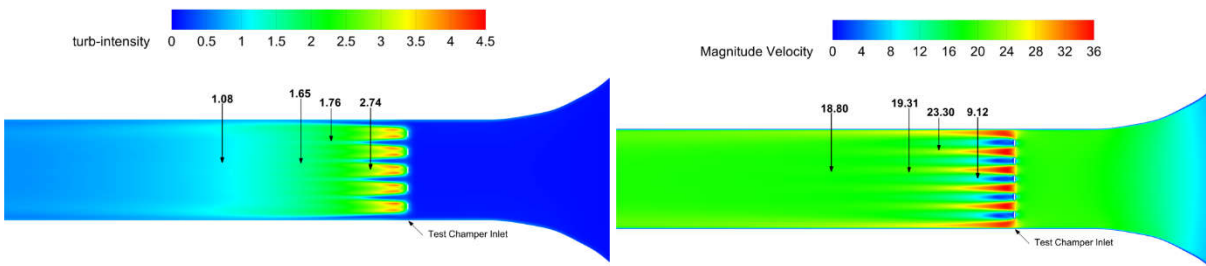


Figure 4. Grid-4 turbulence intensity and velocity contours

Numerical and experimental analyses were performed for the designed Grid-5 turbulence grid and turbulence intensity results are given in Figure 5 and velocity results are given in Figure 6. When the numerical and experimental turbulence intensity values are compared, the effect of the turbulence grid on turbulence in the wind tunnel is clearly seen. The turbulence intensity values also approximately coincide with each other.

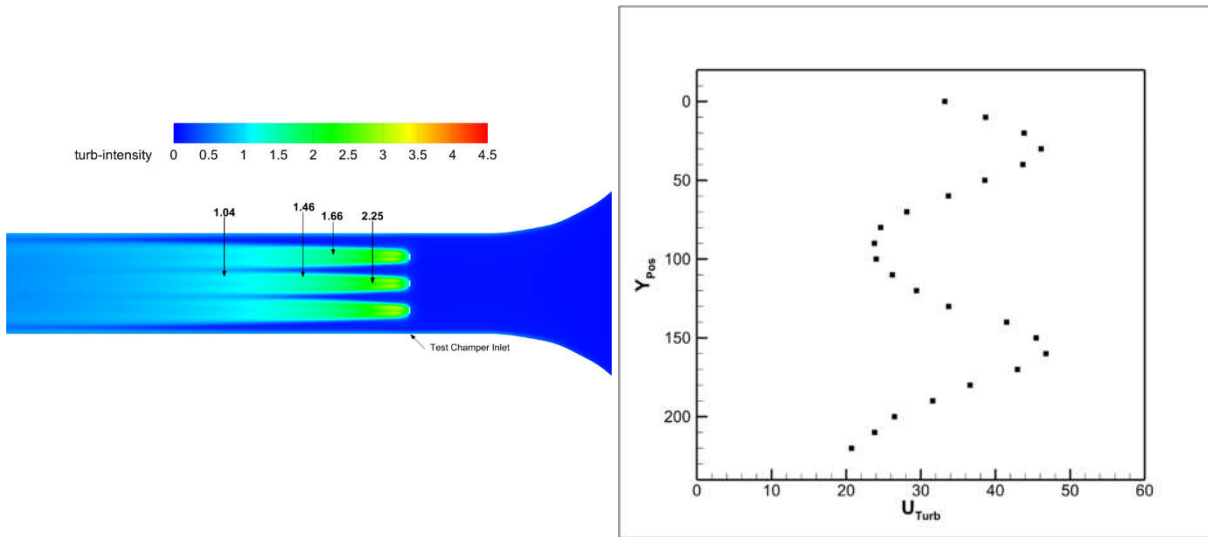


Figure 5. Grid-5 numerical and experimental analysis turbulent intensity results

Comparing the numerical and experimental velocity results, a similar appearance is obtained inside the wind tunnel. At the level of the bars with the turbulence grid, the speed drops. Between the two bars the speed increases even more. The numerical and experimental velocity values also coincide with each other.

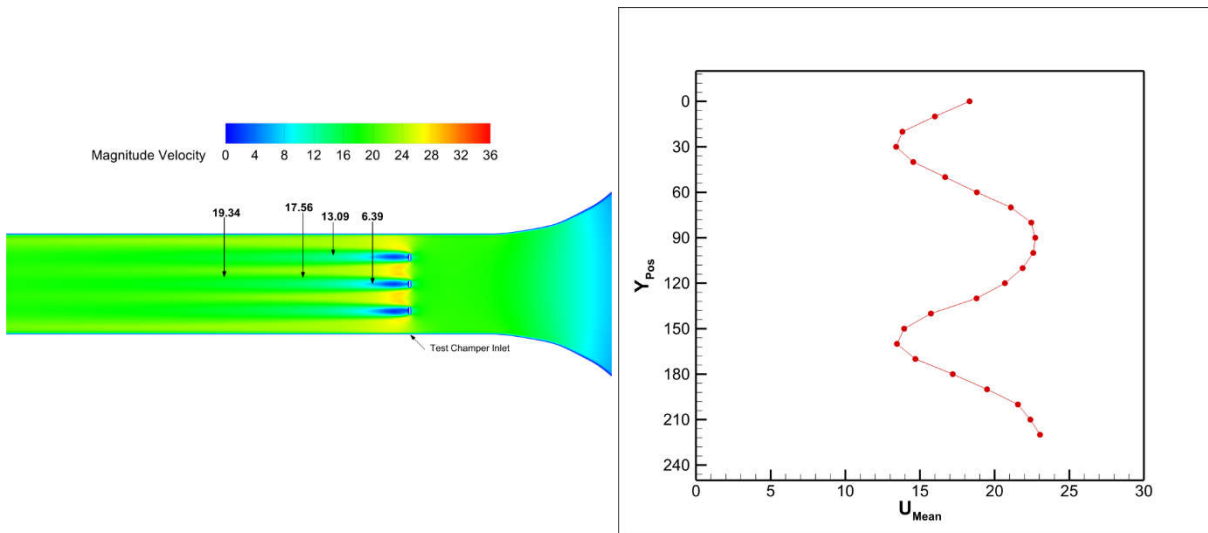


Figure 6. Grid-5 numerical and experimental analysis velocity results

In this study, both experimental and numerical analyses were carried out without grids, with Grid-4 and Grid-5 designs. The turbulence intensity and velocity data obtained are evaluated.

Conclusion and Recommendations

- Turbulence intensity and velocity changes were investigated by designing different turbulence grids.
- The turbulence intensity also changes according to the number of rods by designing a barred turbulence grids.
- When compared numerically and experimentally, it can be said that the values agree with each other. Different turbulence grids can be designed to obtain different turbulence values.

Thanks and Information Note

The authors gratefully acknowledge the funding provided by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under project no. 122M826.

References

- Mccullough, G. B., & Gault, D. E. (1951). Examples of three representative types of airfoil-section stall at low speed (No. NACA-TN-2502).
- Gonsalves, D. C., D'Souza, A. G., Vas, G. M., Madhyastha, K., Moodakare, R., & D'Souza, A. G. (2019, March). Design and analysis of an open circuit subsonic wind tunnel. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2080, No. 1). AIP Publishing.
- Raushan, Pankaj Kumar, Santosh Kumar Singh, and Koustuv Debnath. (2018) "Grid generated turbulence under the rigid boundary influence." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 182: 252-261.
- Tani, I. (1964). Low-speed flows involving bubble separations. *Progress in Aerospace Sciences*, 5, 70-103.
- Boutilier, M. S., & Yarusevych, S. (2012). Parametric study of separation and transition characteristics over an airfoil at low Reynolds numbers. *Experiments in fluids*, 52, 1491-1506.
- Carmichael, B. H. (1981). Low Reynolds number airfoil survey, volume 1 (No. NASA-CR-165803-VOL-1).
- Lissaman, P. B. S. (1983). Low-Reynolds-number airfoils. *Annual review of fluid mechanics*, 15(1), 223-239.
- Istvan, M. S., Kurelek, J. W., & Yarusevych, S. (2018). Turbulence intensity effects on laminar separation bubbles formed over an airfoil. *Aiaa Journal*, 56(4), 1335-1347.

**TURBULENT FLOW ON SYMMETRIC AIRFOIL AT LOW REYNOLDS NUMBERS: Part I-
Numerical Analysis****Eren ANIL SEZER**

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Muhammet HATEM

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department
of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

The variation of turbulence and its associated effects are among the critical factors that need to be thoroughly examined in the field of aerodynamics due to their significant impact on flow behavior and aerodynamic performance. Turbulence plays a crucial role in influencing parameters such as boundary layer development, flow separation, and drag. This study aims to investigate the effects of turbulence on a symmetric airfoil profile under specific conditions, particularly focusing on how turbulence modifies the flow characteristics and affects the formation and behavior of laminar separation bubbles (LSBs). To generate a controlled turbulent flow, an appropriate turbulence grid was meticulously designed. This grid was used to introduce turbulence upstream of the airfoil, ensuring realistic flow conditions that are representative of practical applications. The effects of the turbulence grid were analyzed using advanced numerical simulation techniques, enabling a detailed investigation of the flow physics. For this purpose, the symmetric NACA 0015 airfoil profile was selected as the test geometry due to its simplicity and relevance for fundamental aerodynamic studies. The numerical analyses were performed under low Reynolds number conditions ($Re=0.5 \times 10^5$, 1.5×10^5 , 2.5×10^5), which are characteristic of applications such as small-scale unmanned aerial vehicles (UAVs), wind turbines, and other low-speed aerodynamic systems. Simulations were conducted at three different angles of attack (0° , 4° , and 8°), representing a range of flow conditions from near-zero lift to moderate angles where flow separation might occur. To capture the complex interactions between turbulence and laminar-to-turbulent transition, the Transition SST model was employed. It effectively models the transition process, including the onset of turbulence, which is critical for accurately predicting LSB behavior. The primary objective of this study is to explore how the presence of turbulence and varying angles of attack influence the characteristics and dynamics of the LSB. The results provide insights into the changes in aerodynamic performance, such as lift and drag coefficients, as well as the stability and extent of flow separation. The findings are expected to contribute to a better understanding of low Reynolds number aerodynamics and the role of turbulence in optimizing the performance of airfoils in similar conditions.

Keywords: Symmetric Airfoil; CFD; Low Reynolds Number; Turbulence Grid.

Introduction

With the increasing population in our world, energy shortages and environmental problems have started to escalate. To mitigate this negative situation, the focus on renewable energy sources has increased. One such source is wind turbines, which generate electricity from wind energy. When wind turbine blade models and their operating conditions are examined, it is observed that they operate under low Reynolds numbers [1]. Conditions with Reynolds numbers less than 5×10^5 are referred to as low Reynolds numbers [2]. Since wind turbines operate at low Reynolds numbers, phenomena such as laminar separation bubbles (LSB), which adversely affect the performance of the blade profile, occur [3].

A laminar separation bubble occurs when the laminar flow under low Reynolds numbers separates from the airfoil surface due to adverse pressure gradients and viscous forces. Later, when the flow transitions to turbulence, it reattaches to a point on the airfoil. The area between the separation and reattachment points is defined as a laminar separation bubble [4,5]. The formation of a laminar separation bubble negatively affects pitching moment, drag, and lift values [6]. Additionally, it causes vibrations and noise on the airfoil surface [7]. Laminar separation bubble is separated from the airfoil under the effect of adverse pressure gradients and viscous forces of laminar flow under low Reynolds number. Later, when the flow becomes turbulent, it reattaches to a point on the airfoil. The area between this separation and the attachment points is called laminar separation bubble [4,5]. The formation of laminar separation bubble negatively affects the pitching moment, drag, lift values [6]. In addition, it causes vibration and noise on the airfoil [7]. Yarusevych et al. investigated the laminar separation bubble at different Reynolds numbers (1×10^5 , 1.5×10^5) for the NACA 0025 airfoil. As a result, it was observed that there was a short laminar separation bubble at 1.5×10^5 Reynolds number, but there was no reattachment at 1×10^5 Reynolds number. It was stated that this situation would lead to significant efficiency losses in the performance of the airfoil [8]. Genç et al. They have conducted experimental studies for NACA 2415 airfoil at different Reynolds (0.5×10^5 , 1×10^5 , 2×10^5 , 3×10^5) and angle of attack (12° to 20°). It has been stated that as the attack number increases, the wing separation point comes to the front of the airfoil. It has also been stated that the laminar separation bubble (LSB) formed at lower Reynolds number bursts and causes the formation of larger laminar separation bubble [9]. Koca et al. have conducted experimental studies for flexible wings on SD 7062 airfoil. In this study conducted at 1.05×10^5 Reynolds number, they stated that the force test performed on the wing flexible material delays the stall condition and increases it from 10° to 12° [10]. Genc et al. have conducted numerical and experimental studies of NACA 2415 airfoil at 2×10^5 Reynolds number. Different turbulence models have also been investigated numerically in the study. Among these models, it has been stated that the model that gives results close to the experimental force values is $k-k_l-w$ [11]. Ozden et al. have made numerical analyses for NACA 0015 airfoil at different angles of attack. As a result, they stated that Laminar separation bubble is formed at low angles of attack [12]. Karasu et al. have made numerical and experimental studies on Transition SST and $k-k_l-w$ turbulence models for NACA 4412 airfoil. They stated that both models show similar results in separation adhesion, but $k-k_l-w$ is better in calculating force coefficients [13].

Materials and Methods

In numerical airfoil analyses, while creating the flow domain, the distance between the inlet and the airfoil should be 10 times the chord length of the airfoil. The distance between the airfoil and the outlet of the flow domain should be 20 times the chord length. Additionally, the height of the flow domain should also be 20 times the chord length. This setup is applicable to both 2D and 3D cases [14].

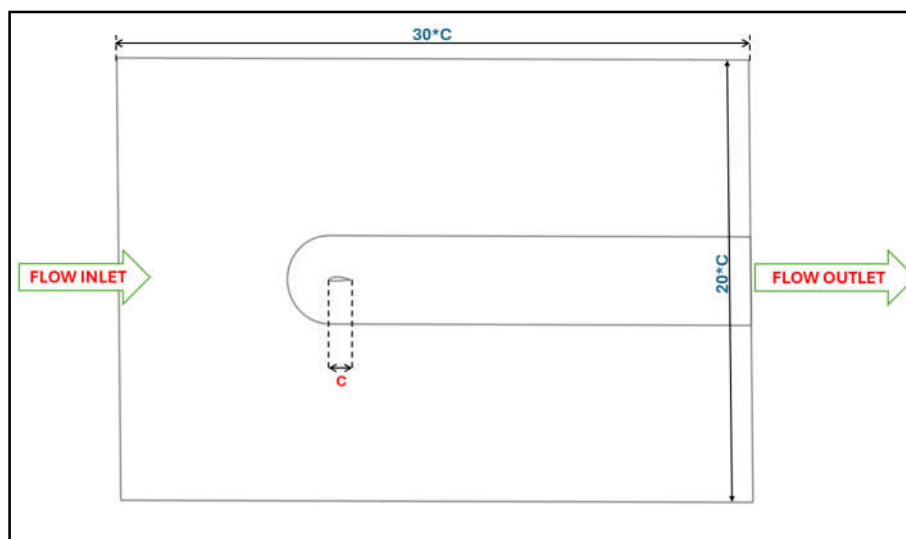


Figure 1. Flow Domain

Subsequent to the creation of the flow domain, the mesh was generated according to the geometry. After the tetra mesh was applied to the flow field, the boundary layer mesh was applied for the airfoil. Here, while applying the boundary layer mesh, care was taken to ensure that the y^+ value was less than 1. Because the y^+ value is the distance of the first cell in a boundary plate to the wall and is a dimensionless parameter. Wall functions, on the other hand, are used empirical models to estimate the flow properties when the y^+ value is high. However, this situation may show the viscous friction larger than it is. In order to prevent this, the y^+ value was kept below 1 in this study. After the mesh structure was created, Transition SST was used as a viscous model. This model is a derivative of the SST $k-\omega$ turbulence model and was developed to model the state of the flow when it transitions from laminar to turbulent in numerical analyses [15].

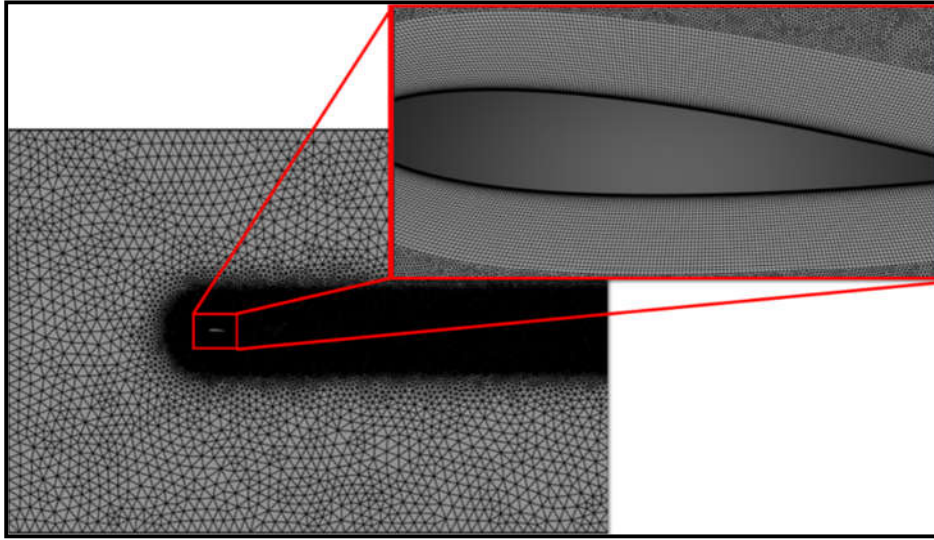


Figure 2. Detailed Mesh Image

Subsequent to determining the mesh to be applied to the geometry, a mesh independence study was conducted. For the mesh independence study, the NACA 0015 airfoil was made at a Reynolds number of 0.5×10^5 and an angle of attack of 4 degrees. As a result, when the force coefficient values obtained were examined, a mesh number of 5.2×10^5 was deemed sufficient.

Table 1. Mesh Independent

Mesh size	C_L	C_D
1×10^5	0.76	0.031
3.5×10^5	0.75	0.031
5.2×10^5	0.72	0.028
8.1×10^5	0.72	0.028
1×10^6	0.72	0.028

The density value was set as 1 kg/m^3 in the ANSYS Fluent program. Our speed values were set as 0.895 m/s for a Reynolds number of 0.5×10^5 , 2.684 m/s for a Reynolds number of 1.5×10^5 and 4.4735 m/s for a Reynolds number of 2.5×10^5 .

After setting the necessary boundary conditions, the wall shear values in the x direction, the pressure coefficient values, and the base contours were taken for the separation and attachment regions on the wing.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5 \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

The flow shows a constant pressure change as it moves over the airfoil. However, in the regions where there is a laminar separation bubble, a fixed line is observed on the graph. This is because there is no change in the regions where there is a laminar separation bubble. Therefore, the pressure remains constant where there is a laminar separation bubble.

Findings and Discussion

When the results at different turbulence values are examined, it is seen in Figure 3 that when the turbulence value increases, the laminar separation bubble on the wing is damped.

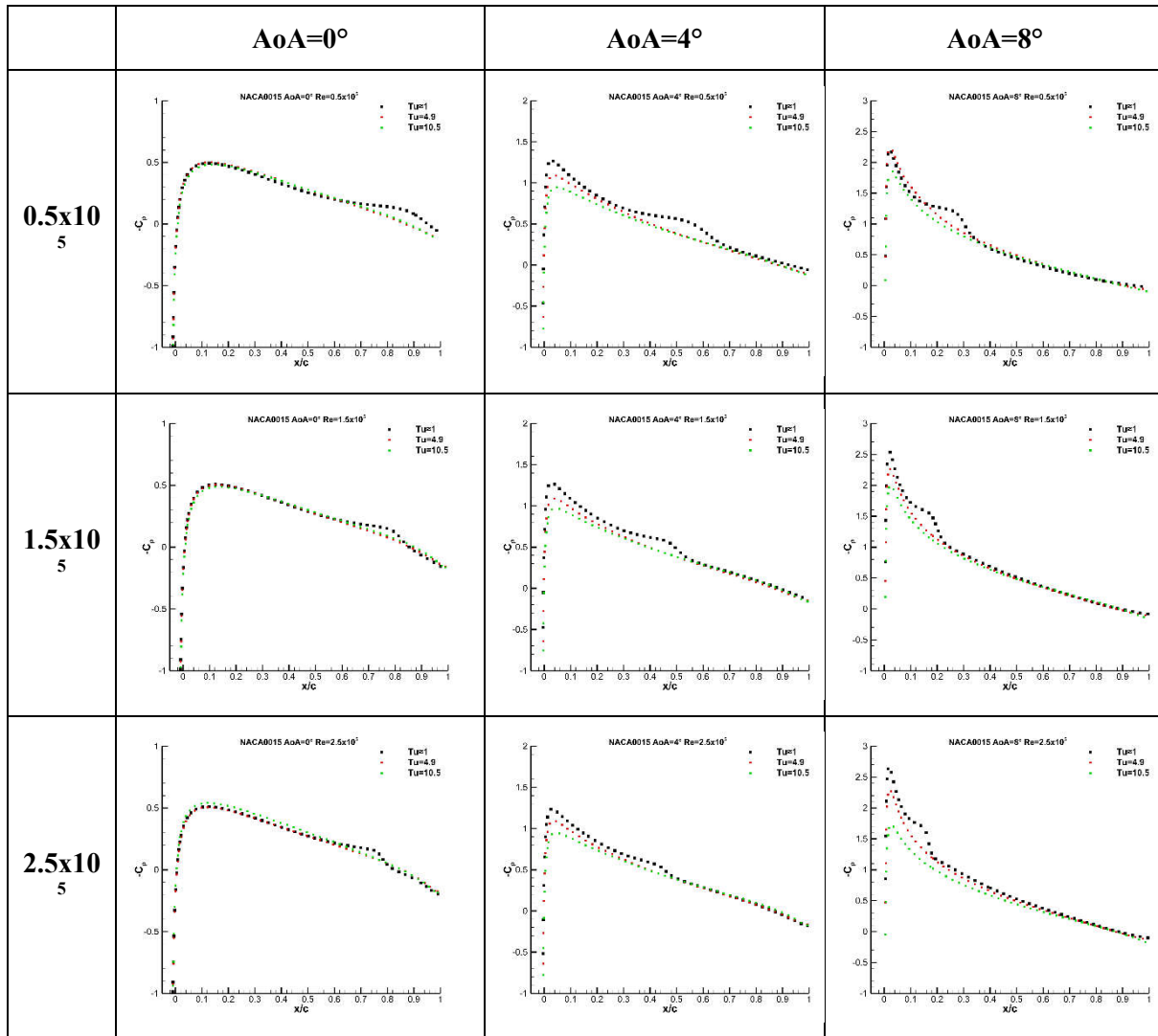


Figure 3. Pressure coefficient graph at different turbulence values

When the results at 0.5×10^5 Reynolds number are examined, with the increase in the angle of attack, the laminar separation bubble comes towards the front of the airfoil. For 0° , the separation occurred at 0.56 and there was no reattachment. For 4° , the separation occurred at 0.28 and there was reattachment at 0.67. For 8° , the flow separated at 0.09 and there was reattachment at 0.35. But in cases where the turbulence intensity increased, there was no separation or reattachment on the airfoil for $Tu=4.9\%$ and $Tu=10.5\%$. The increase in turbulence intensity dampens the laminar separation bubble and ensures that the flow passes into turbulence as soon as possible.

Conclusion and Recommendations

This study investigated the behavior of laminar separation bubbles formed under low Reynolds numbers at different turbulence levels. The increase in the turbulence level damped the laminar separation bubble. It is seen that the flow passes into turbulence early. With the increase in the number of attacks, it is seen that the laminar separation bubble moves towards the front in the case of $Tu \approx 1$. However, with the increase in the turbulence level, no separation and adhesion are observed in the flow due to the flow passing directly into turbulence at $Tu = 4.9$ and $Tu = 10.5$ turbulence intensities. The numerical data obtained in this study can be compared with experimental studies and the deficiencies in the numerical analysis can be improved in this regard. With this study, more efficient wing profiles can be created by optimizing the turbulence level for wind turbines operating at low Reynolds numbers.

Thanks and Information Note

The authors would like to acknowledge funding from the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the Project no: 122M826.

References

- Ayvazoğlu, M., Keskin, S., Şahin, R., Sincar, M., Sezer, E. A., Açıkel, H. H., ... & Genç, M. S. (2024). Numerical and Experimental Investigation of Thickness Effect on the Cambered Airfoils at Low Reynolds Numbers. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 17(Special Issue), 116-134.
- Carmichael, B. H. (1981). *Low Reynolds number airfoil survey, volume 1* (No. NASA-CR-165803-VOL-1).
- Genç, M. S., Karasu, İ., & Açıkel, H. H. (2012). An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 39, 252-264.
- Genç, M. S., Kaynak, Ü., & Yapici, H. (2011). Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 30(2), 218-235.
- Hain, R., Kähler, C. J., & Radespiel, R. (2009). Dynamics of laminar separation bubbles at low-Reynolds-number aerofoils. *Journal of Fluid Mechanics*, 630, 129-153.
- Karasu, İ., Özden, M., Genç, M. S. (2018). Performance assessment of transition models for three-dimensional flow over NACA4412 wings at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids Engineering*, 140(12).
- Koca, K., Genç, M. S., Açıkel, H. H., Çağdaş, M., & Bodur, T. M. (2018). Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution. *Energy*, 144, 750-764.
- Koca, K., Keskin, S., Şahin, R., Veerasamy, D., & Genç, M. S. (2024). Measurements of Flow Characterization Revealing Transition to Turbulence Associated with the Partial Flexibility-Based Flow Control at Low Reynolds Number. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-17.
- Lee, H., & Lee, D. J. (2020). Low Reynolds number effects on aerodynamic loads of a small-scale wind turbine. *Renewable Energy*, 154, 1283-1293.
- O'meara, M. M., & Mueller, T. J. (1987). Laminar separation bubble characteristics on an airfoil at low Reynolds numbers. *AIAA journal*, 25(8), 1033-1041.
- Özden, M., Açıkel, H. H., Genç, M. S., & Koca, K. Recognizing Flow Evaluation on Surface of NACA0015 Airfoil at Various Angles of Attack. *International Asian Congress on Contemporary Sciences – VII*. December 09.
- Roberts, W. B. (1980). Calculation of laminar separation bubbles and their effect on airfoil performance. *AIAA journal*, 18(1), 25-31.
- SEZER, E. A., ŞAHİN, R., SİNCAR, M., ÖZDEN, M., AÇIKEL, H. H., & GENÇ, M. S. 3rd International World Energy Conference.

Yarusevych, S., Sullivan, P. E., & Kawall, J. G. (2006). Coherent structures in an airfoil boundary layer and wake at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 18(4).

**TURBULENT FLOW ON SYMMETRIC AIRFOILS AT LOW REYNOLDS NUMBERS: Part II-
Experimental Analysis****Meva Yasemin BAŞTUĞ**

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Zafer İPEKLİ

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Halil Hakan AÇIKEL

Assist. Prof. Dr. Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department
of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

Flows at low Reynolds numbers indicate that viscous forces dominate over inertial forces. In such flows, phenomena such as adverse pressure gradients, flow separations, and laminar separation bubbles (LSBs) can occur, which may negatively affect the aerodynamic performance of systems. In this study, these possible negative effects in turbulent conditions were investigated on a NACA 0012 airfoil using two different experimental methods. The pressure measurement method was conducted using a diaphragm-type pressure sensor and a signal converter. The pressure difference and pressure coefficient (C_p) were calculated using a formula based on the free-stream stagnation pressure and static pressure. The second experimental method involved the oil flow visualization technique. The experiments were performed at three different angles of attack (0° , 4° , 8°) and two different Reynolds numbers ($Re = 0.5 \times 10^5$, $Re = 1.5 \times 10^5$). A turbulence grid was employed to establish turbulent conditions, providing a turbulence intensity of 10.5% during the experiments. The results demonstrate that increasing turbulence intensity significantly impacts the flow characteristics. It was observed that the increased turbulence intensity substantially suppressed or prevented the formation of the LSB.

Keywords: Laminar Separation Bubble; Turbulence Grid; Low Reynolds number; Oil flow visualization; Pressure Measurement Method.

Introduction

Small structures such as wind turbine blades and unmanned aerial vehicles operate in flows where the Reynolds number, which is a dimensionless parameter used to understand the type of flow, is low. If we consider the formula for the Reynolds number, we can express it as the ratio of inertial forces to viscous forces. In low Reynolds number flows, viscous forces dominate inertial forces. This situation causes some flow events that may negatively affect aerodynamic performance. The size and location of the LSB, which is formed when laminar flow separates from the surface, then transitions to turbulence and reattaches to the surface, varies depending on parameters such as wing profile, angle of attack, and Reynolds number (Tani, 1964).

According to Genç et al. (Genç et al. 2008, Genç et al. 2016), the part of the flow between the separation and reattachment points on the airfoil moves forward (towards the leading edge) as the angle of attack increases and causes the formation of short bubbles. The effect of the short bubbles formed on the pressure distribution is small. At certain angles of attack, the flow separates but cannot reattach. In this case, the bubble bursts and forms longer bubbles. The bubbles formed in this way cause a decrease in the positive effect and lift force on

this region, as well as noise and vibrations (Fitzgerald & Mueller, 1990). Carmichael (1981) performed a study that LSB formation negatively affects aerodynamic performance.

There are several parameters affecting the characteristics of laminar separation bubble. The length, height, and position of LSB are strongly dependent on the pressure distribution over the surface. At this point, adverse pressure gradients play a vital role since as geometry changes along the x-or flow direction, pressure differences take place resulting adverse pressure gradients pulling the flow from the surface. Besides, surface roughness is another concept which has significant effects on LSB in terms of length, position, or control. In addition to that, changes in turbulence level can significantly alter the flow structure, affecting the reattachment process, the size of the formed bubble and the general course of the flow. Devinant et al. (2002) and Wang et al. (2014) have investigated how the LSB especially responds to the turbulence effect with experimental methods. The increase in turbulence intensity allows the LSB to shrink in size and the reattachment part to form more stably (Kurelek & Yarusevych, 2018). Especially in high turbulence levels, and therefore more unstable conditions, the performance of the airfoil can be seriously affected.

In this study, the flow behavior over a NACA 0012 airfoil was investigated by experimental methods under low Reynolds numbers, three different angles of attack (0° , 4° , 8°) and turbulence level ($Tu < 1\%$ and $Tu = 10.5\%$). A designed turbulence curtain was integrated into the wind tunnel to provide turbulence condition. The pressure measurement method, which is used to examine the effect of the flow on the surface of the wing and to measure the pressure distribution, is one of the experimental methods used. In addition, the flow visualization technique with oil, in which a number of chemical materials are brought together and applied to the wing, was used to visualize the flow.

Materials and Methods

- Pressure Measurement Method

Pressure measurement is one of the important techniques that can be used to understand and interpret how airflow interacts with the surface of the wing. Improvements based on the pressure measurement results made in the wind tunnel for the airfoil in question are of great importance in terms of achieving the best performance. Various techniques and tools can be used together in this experimental method. First of all, the NACA 0012 airfoil we used in this experiment was designed to be suitable for pressure measurement. Pressure holes with a diameter of 0.8 mm were placed in a single row along the chord in the middle part of the wing. Then, the designed wing was produced on a 3D printer. A pitot tube and a diaphragm-type pressure sensor were used together during the measurement. The data obtained from the pressure holes on both the lower and upper surfaces of the wing were transferred to the digital environment by a signal conversion system. With the processing of the data, distribution graphs of the pressure coefficient on the wing surface were created.



Figure 1. NACA 0012 airfoil prepared for pressure measurement experiment

- Oil Flow Visualization Technique

Surface oil flow visualization was used to evaluate the properties of the laminar separation bubble (LSB) on the airfoils. As shown in Figure 2, a homogeneous oil mixture consisting of oleic acid, engine oil, kerosene

and TiO₂ was prepared for this experiment and carefully applied to the surfaces of the airfoils. When the desired viscosity was reached, the mixture was applied to the surfaces of the airfoils with a brush. This was used to monitor the flow motion of the oil layer on the airfoil. Not only does the oil provide the necessary viscosity, but also the flow is visualized through TiO₂. Afterwards, the motion of the flow on the surface and the behavior of the LSB were recorded with cameras and analyzed in this way. Thanks to this technique, it becomes much easier to see how the flow interacts with the airfoil surface and according to the results, important data can be obtained that can be used to improve the aerodynamic performance of the airfoils.



Figure 2. Oil flow visualization materials.

Findings and Discussion

In this study, the results of the pressure measurement experiment (Figure 3) and the oil flow visualization experiment (Figure 4 and Figure 5) performed on the NACA 0012 airfoil under different Reynolds numbers ($Re = 0.5 \times 10^5$, $Re = 1.5 \times 10^5$) and angles of attack (0° , 4° , 8°) in the flows with turbulence intensity of 10.5% and less than 1% are shown. When the results are examined, it is clearly seen that significant differences occur with the use of the turbulence grid.

For the Reynolds number of 50,000, the effect of turbulence emerges in the C_p graphs with the increase in the angle of attack. It is seen that the graph becomes more stable, and therefore the effect of LSB decreases, especially with the increase in turbulence at 4 and 8 degrees. For the Reynolds number of 150,000, the C_p graph becomes smoother with the increase in the angle of attack and turbulence intensity, and this shows that the LSB is suppressed (Figure 3).

When the flow visualization results are examined (for both Reynolds numbers), the separation and reconnection points are much clearer at low turbulence. As the angle of attack increases, a progression is observed towards the leading edge in the separation and attachment points. However, at high turbulence, there is a significant difference in the structure of the LSB. It is difficult to say whether the results obtained for 50,000 Reynolds are due to the viscosity of the prepared oil mixture or the turbulence intensity. However, it is clearly observed that for Reynolds number 150,000, the LSB almost completely disappears due to the increase in turbulence (Figure 4 and Figure 5).

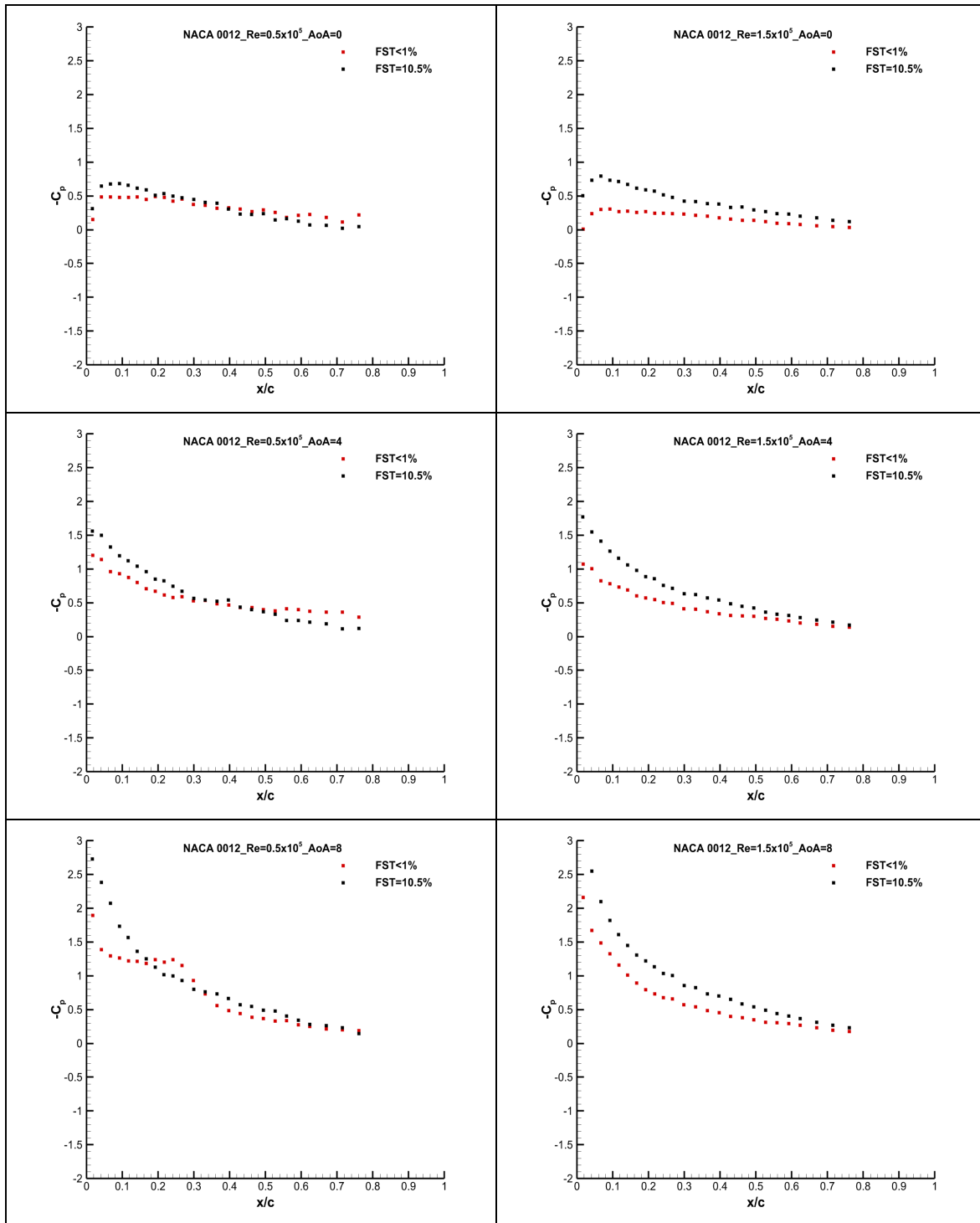


Figure 3. Pressure coefficient distribution results for the upper surface of the airfoil.

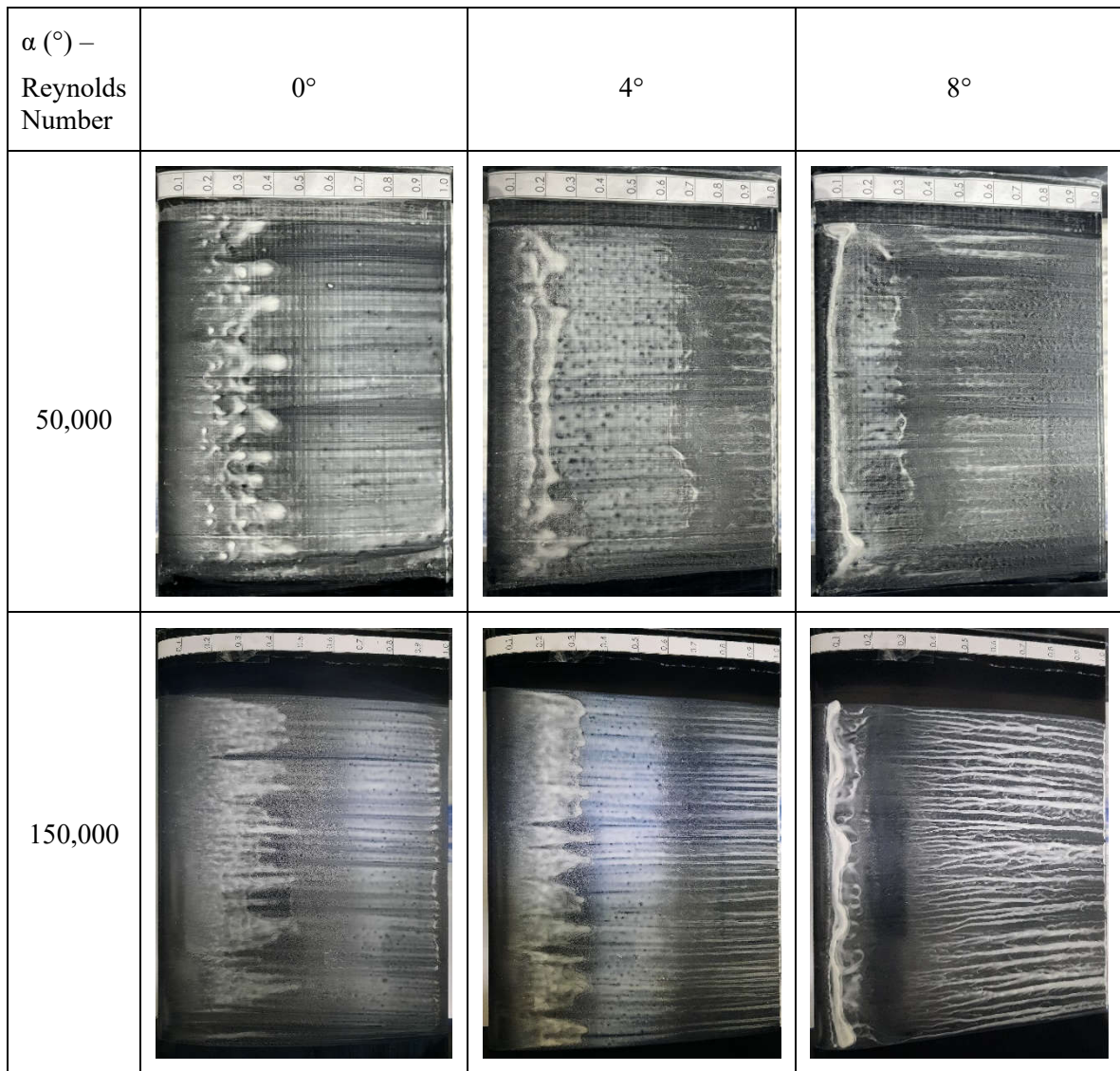


Figure 4. Flow visualization results of the NACA 0012 airfoil (FST< 1%).

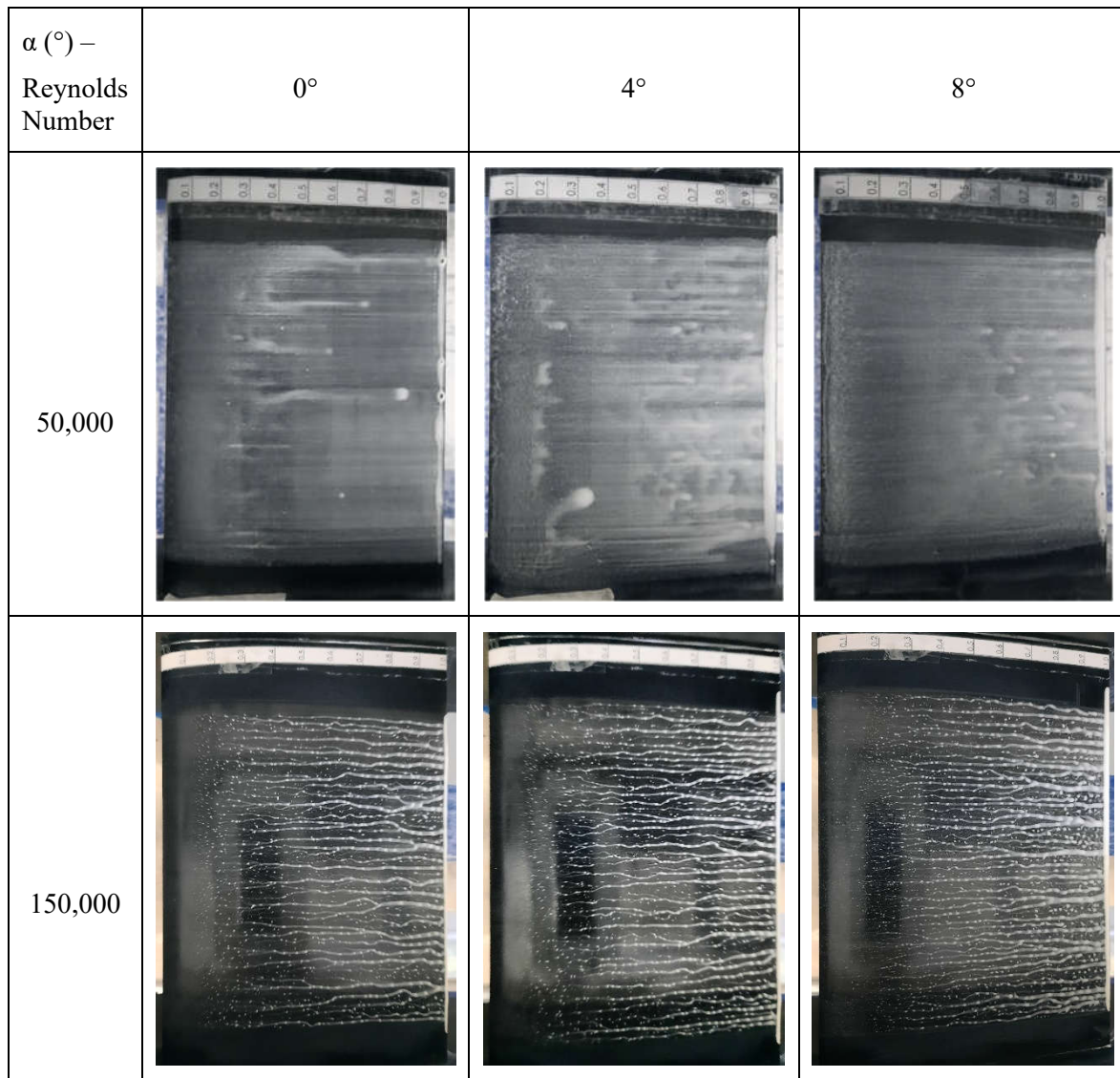


Figure 5. Flow visualization results of the NACA 0012 airfoil (FST=10.5%).

Conclusion and Recommendations

In this study, the effects of increasing turbulence intensity on the NACA 0012 airfoil in terms of aerodynamic behavior were investigated experimentally. The experiments were carried out at 50,000 and 150,000 Reynolds numbers. According to the pressure coefficient measurement results, it was observed that the pressure differences along the wing chord increased under turbulent conditions. The effect of turbulence became clearer as the angle of attack increased. The oil flow visualization results show that the increase in turbulence caused the LSB to shorten in length or to disappear completely. Thanks to the high turbulence intensity, flow separation was prevented by increasing momentum, which positively affected the performance. The obtained results are important in terms of airfoil performance analysis, especially in applications such as unmanned aerial vehicles and wind turbines.

Thanks and Information Note

The authors would like to acknowledge funding from the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) under the project number: 122M826.

References

- Tani, I., 1964. Low Speed Flows Involving Bubble Separations. *Progress in Aerospace Sciences*, 5, 70-103.
- Genç M. S., Ozisik G., Kahraman N., 2008. Investigation of aerodynamics performance of NACA00-12 aerofoil with plain. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology*, 28(1), 1-8.
- Genç M. S., Koca K., Açikel H. H., Özkan G., Kırış M. S., Yıldız R., 2016. Flow characteristics over NACA4412 airfoil at low Reynolds number. *EPJ Web of Conferences*, 114, 02029.
- Genç M. S., Lock G., Kaynak U., 2008. An experimental and computational study of low Re number transitional flows over an aerofoil with leading edge slat. *The 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO*, 8877.
- Fitzgerald E. J., Mueller T. J., 1990. Measurements in a separation bubble on an airfoil using laser velocimetry. *AIAA JOURNAL*, 28(4), 584–592.
- Genç, M. S., Karasu, İ., & Açikel, H. H. (2012). An experimental study on aerodynamics of NACA 2415 aerofoil at low Re numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 39, 252- 264.
- Carmicheal, B. H. Low Reynolds number airfoil survey. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1981.
- Devinant, P., Laverne, T., & Hureau, J. (2002). Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(6), 689-707.
- Wang, S., Zhou, Y., Alam, M. M., & Yang, H. (2014). Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 26(11), 115107.
- Kurelek, I., & Yarusevych, S. (2018). Turbulence intensity effects on laminar separation bubbles formed over an airfoil. *Smith Engineering*, Queen's University.

THE EFFECT OF THE TURBULENCE ON FLOW OVER CAMBERED AIRFOIL AT DIFFERENT REYNOLDS NUMBERS Part I-Numerical Analysis**Muhammet HATEM**

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Eren ANIL SEZER

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Sinem KESKİN

PhD. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department
of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

Turbulence is a critical element in terms of aerodynamics, as it has major effects on flow efficiency, performance, and stability. Being able to accurately model and control the effects it can create is particularly important for wind turbines and various aircraft. In order to understand its effects, experimental or numerical modeling (CFD) methods can be used, as it is changing to be solved analytically due to its complex structure. Our study demonstrates how turbulence reacts on a cambered airfoil using numerical methods. NACA 4418 was selected as the airfoil and two-dimensional numerical analysis was performed at low Reynolds numbers ($Re=1.5 \times 10^5$, $Re=2.5 \times 10^5$) and different angles of attack (0° , 4° , 8°). An optimization study was carried out to set the different turbulence intensities as initial condition. Transition SST model was selected for the analyses. The main objective of this study is to try to determine the characteristics and dynamics of laminar separation bubbles (LSB) at different Reynolds numbers and angles of attack together with turbulence. The study results provide detailed information about the stability and dimensions of flow separations, apart from the changes in the basic parameters (lift and drag coefficients) affecting the aerodynamic performance. The findings provide important contributions to a better understanding of aerodynamics in low Reynolds number regimes and the role of turbulence in improving airfoil performance under these conditions. Based on the results of the study, the control and elimination effect of the turbulence level on laminar separation bubbles was emphasized.

Keywords: Airfoil; Low Reynolds Number; Turbulence Intensity.

Introduction

One of the most popular topics in fluid dynamics applications today is low Reynolds aerodynamics. Such flow phenomena are often encountered in technologies such as wind turbines, electronic component cooling and drones. The issues that increase the importance of low Re number flows are that the flow is unstable and is prone to phenomena such as transition or laminar separation bubbles. For a better understanding of this topic, viscous flows and boundary layer theory should be taken into account first (Schlichting & Gersten, 2016). Many experimental and numerical studies (Koca et al., 2021) have been previously conducted to determine the characteristics of flow separation and laminar separation bubbles that may occur in low Reynolds number flows. Demir et al (2017) experimentally investigated the size and unsteady characteristics of LSB under different conditions. Moreover, Acikel et al (2018) presented a method controlling the LSB by using partially flexible surface material experimentally. Numerical studies were also performed to evaluate the effect of LSB on aerodynamic performance in terms of dynamic characteristics. A LES (Large Eddy Simulation) study was conducted with an aim of investigating the near-stall flow characteristics of an airfoil (AlMutairi et al., 2017).

Another numerical study, explaining the transition from laminar to turbulent over a flat plate with a freestream turbulence intensity by DNS (Direct Numerical Solution) was performed by Hosseinverdi & Fasel (2015). In order to increase the accuracy of numerical studies, especially in low Re number flows, the transition from laminar to turbulent and reattachment to the surface by gaining momentum from freestream after the flow is separated should be modeled accurately. New correlations were developed to predict the transition (Mayle, 1991) and also LSB at different turbulence intensities that was used later (Suzen, 2000) in which the intermittency-based transition correlations were integrated as well. Later, based on Suzen's work, Menter (2002) published this transition modeling consisting of 4 equations called Transition SST. In this modeling, parameters such as transition onset and critical Re number for LSB characterization were used. This model has been developed for different applications with various changes over the years, and new correlations have also been added to this model in the light of current experiments (Menter & Langtry, 2012). In this study, by using the Menter's Transition SST model, a numerical study was conducted on NACA4418 airfoil for investigating the effect of different levels of turbulence intensities (%1, %4.9, and %10.5) on flow characteristics in terms of LSB formation, separation, and reattachment at different Re numbers (1.5×10^5 , 2.5×10^5) and angles of attack (0° , 4° , and 8°).

Materials and Methods

There are both experimental and numerical methods in the examination of low Reynolds number applications. Setting up a numerical solution requires a precise application of various steps from a properly adjusted flow domain to solution steps chosen. In order to investigate the flow characteristics of NACA4418 airfoil numerically, one of the widely-used CFD solvers, FLUENT was used.

- Geometry

Specifications of the geometry, or flow domain should be determined with respect to the mesh generation approach and methods. For the estimation of aerodynamic forces and also boundary layer issues, C type, structured mesh is used. On the other hand, since this study aims to predict the turbulence effects in terms of flow separations, reattachments and laminar separation bubble, putting more grid much over the airfoil surface will be unnecessary and time consuming. It is because a non-structured mesh approach was selected except boundary layer modeling. Therefore, a rectangular shaped flow domain was created as the chord length and its dimensions to be 1 meter and $20c \times 30c$, respectively. Details of the geometry can be checked in the next subsection, mesh generation.

- Mesh Generation

Mesh generation approach used in a numerical solution should be decided according to aim of the study. As explained above, a non-structured mesh algorithm, except for boundary layer modeling, was chosen. Besides, one of the crucial parameters of solving CFD problems, y^+ , was set to 4, a suitable value for applied turbulence model that will be explained in the next section, by adjusting the first cell height as 10^{-4} millimeters and a proper number of layers.

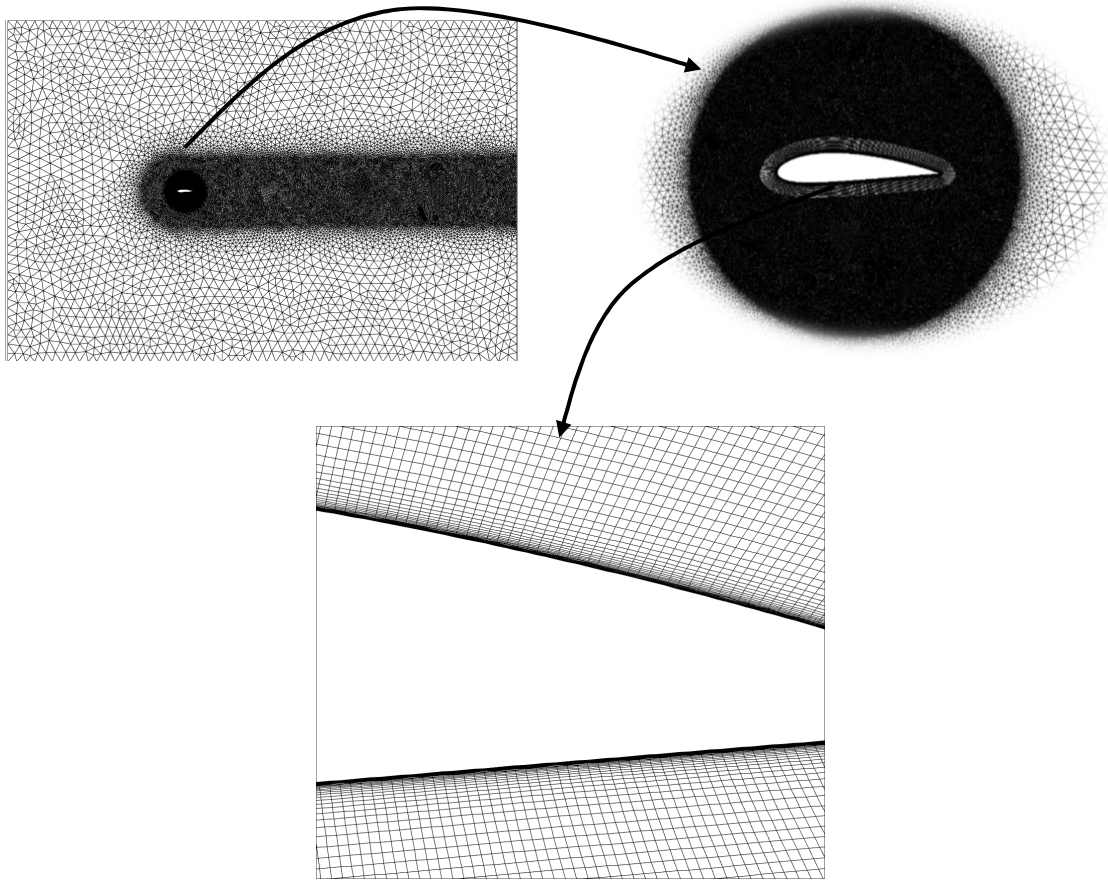


Figure 1. Numerical Grid: whole domain, airfoil region, and boundary layer modeling, respectively.

- Setup and Solution Methods

Following the previous steps, Transition SST turbulence model, also known as 4 equation model, which was developed to solve the low Reynolds number flows in which transition from laminar to turbulence may be involved, specifically. Furthermore, velocity inlet-pressure outlet is set as initial condition. Reynolds number was adjusted according to the chord length of the airfoil. In addition to those, 2nd order solution methods were applied with coupled algorithm providing more accurate solutions. Another issue to be set is adjustment of the turbulence intensities. In this study, turbulence levels of %1, %4.9, and %10.5 were considered. In order to have those levels in front of the airfoil in the numerical model, an optimization study was also performed which estimates the required inlet turbulence intensity and viscosity ratio values to be given as an initial condition in setup step. Finally, convergence criteria for all parameters were set to 10^{-5} .

Findings and Discussion

Numerical analysis was conducted at two different Reynolds numbers (1.5×10^5 , 2.5×10^5) and three turbulence intensities (%1, %4.9, %10.5). In addition, 0° , 4° , and 8° angles of attack were performed. Figure 2 shows the effect of varying turbulence intensity at Reynolds numbers 1.5×10^5 , 2.5×10^5 on pressure coefficient (C_p), respectively at 0° angle of attack.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

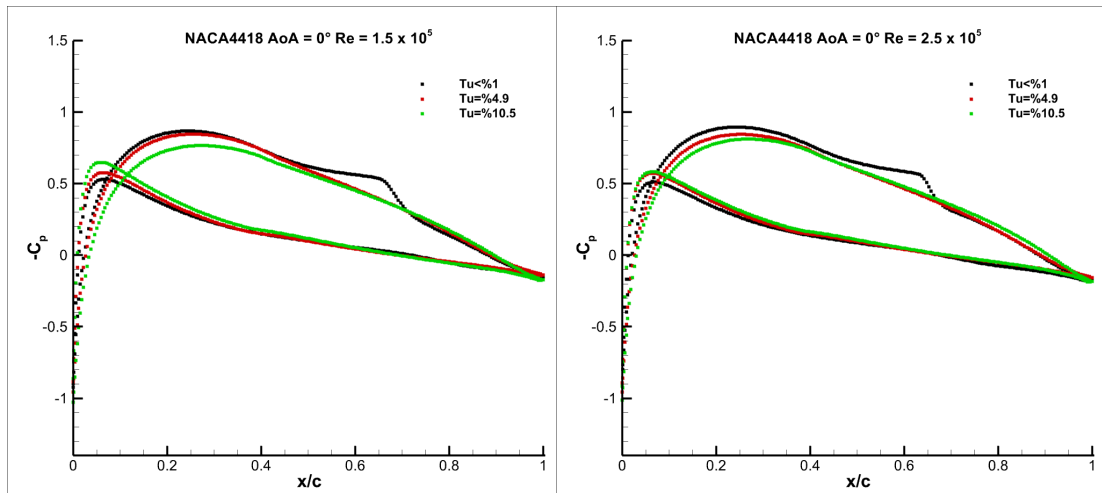


Figure 2. Effect of Tu intensity on C_p at $Re = 1.5 \times 10^5$, 2.5×10^5 at $AoA=0^\circ$.

In C_p graphs, a horizontal, or straight-line behavior represents the formation of laminar separation bubble since flow separates from the surface and then reattaches as a consequence of momentum gain from the freestream resulting transition to turbulence. In that region, the existence of flow is not observed generally, or reverse flow may be faced which causes a pressure difference of “0”. At all Reynolds numbers, separation and reattachment of the flow were seen with a turbulence intensity value of %1. Below are other representations for 4° and 8° angles of attack in Figure 3.

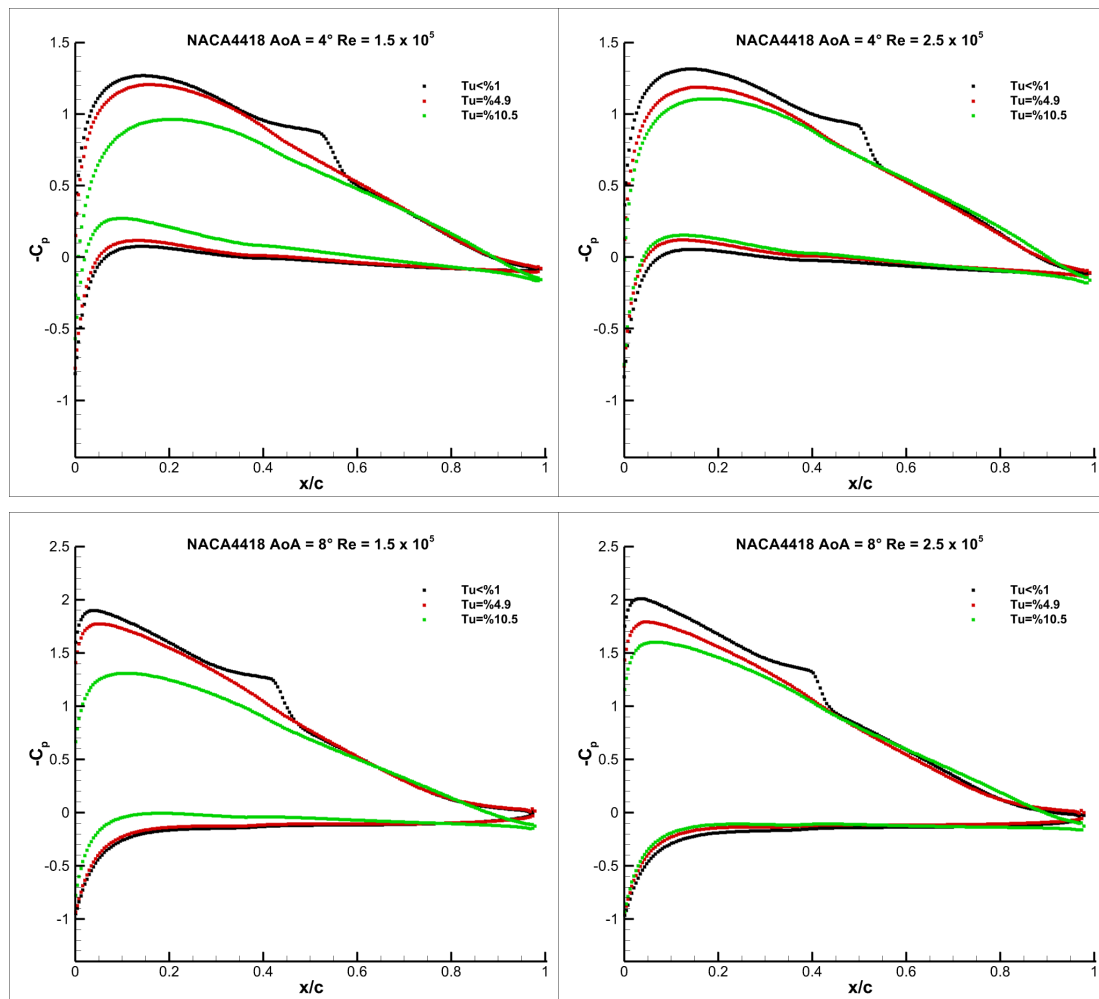


Figure 3. Effect of Tu intensity on C_p at $Re = 1.5 \times 10^5$, 2.5×10^5 at $AoA=4^\circ$, 8° .

The results for all Re numbers and angle of attacks indicate that formation of laminar separation bubble is observed in all cases with a turbulence intensity of <1%. Besides, positions of the separation and reattachment points shift upstream as Re increases while those are more markable with increasing angle of attack. Also, length of the laminar separation bubble gets smaller at higher angles of attack. On the other hand, at higher turbulence intensity values ($Tu=4.9\%$ and $Tu=10.5\%$), it is clear to state that separation-reattachment of the flow and laminar separation bubble formation are controlled or prevented.

Another representative way to explain that effect is wall shear stress, C_{fx} , which takes a negative value in case of flow separations, then back to the positive with reattachment. In addition to that, the position where C_{fx} is at its minimum value below the x-axis marks the onset of transition.

$$C_{fx} = \frac{x \text{ wall shear}}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

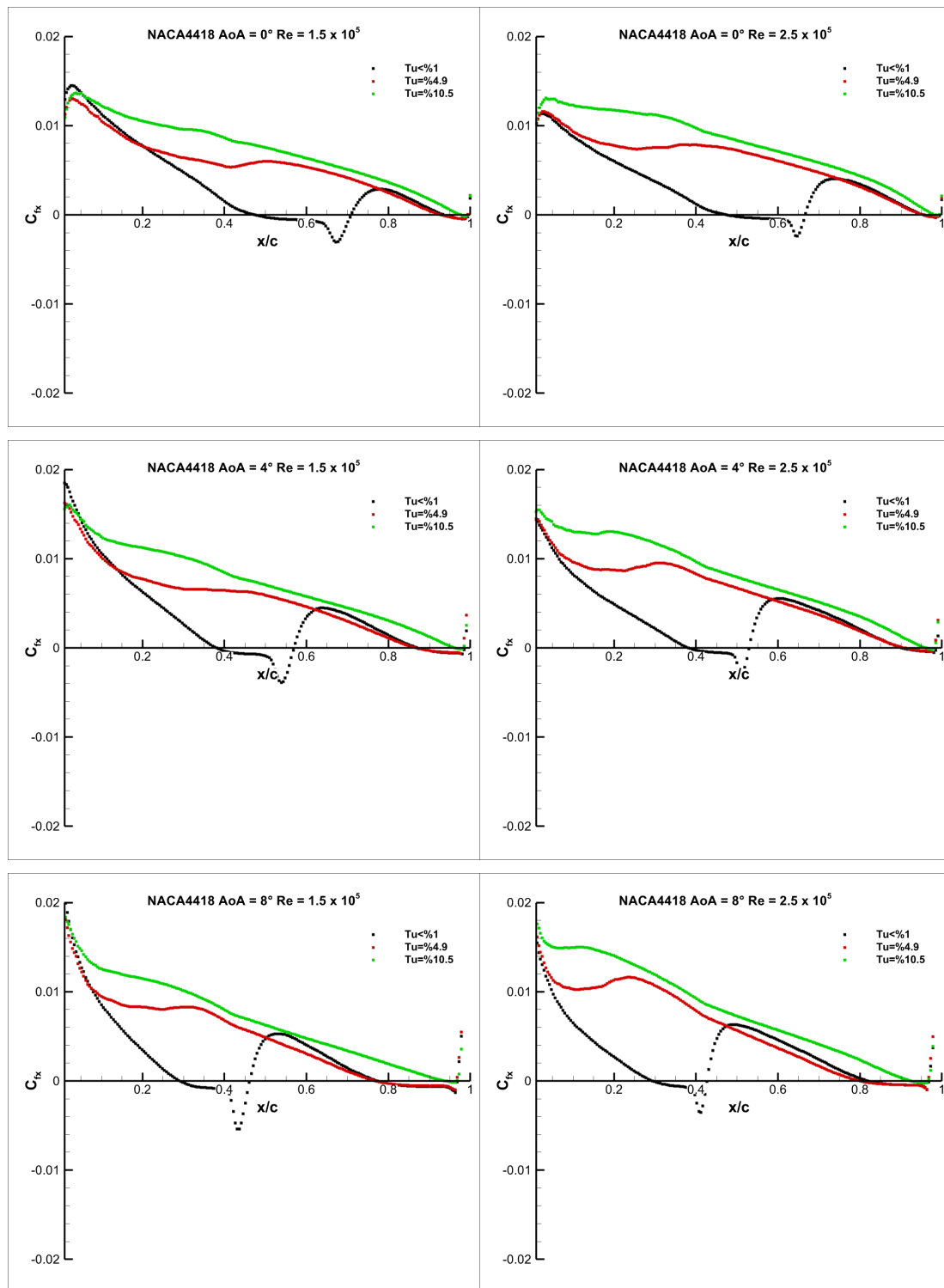


Figure 4. Effect of Tu intensity on C_{fx} at $Re = 1.5 \times 10^5, 2.5 \times 10^5$ at $AoA = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$.

By investigating the graphs above in the Figure 4, a fitting with pressure coefficient graphs is clear. Changes in the position of flow separation and reattachment points to upstream direction take place minimally with increasing Re number, however, it is more observable with increasing angle of attack. An interpretation can be made by pointing out the separation-reattachment position of the case $Re = 1.5 \times 10^5$, at angles of attack $0^\circ, 4^\circ$, and 8° where separation point is 0.45, 0.40, and 0.30, respectively. Same result can be seen in the $Re = 2.5 \times 10^5$ cases. Intercalarly, the effects of increasing turbulence intensity are also evident; unlike the situations at low turbulence levels, separation-reattachment phenomenon that would create separation bubbles have not

been observed except for separation situations in regions close to the trailing edge which again prove that raises in the turbulence intensity take the LSB related issues under control.

Conclusion and Recommendations

Flows with low Reynolds number are generally unstable and as a result, separation-reattachment and associated laminar separation bubble formation may occur. To determine these phenomena, a numerical study was carried out on the NACA4418 airfoil at low Reynolds numbers, 3 different angles of attack, and 3 different turbulence intensities, and the results were evaluated by creating pressure coefficient and surface shear stress graphs. In cases where the turbulence level is less than 1 percent, the laminar separation bubble shifts to the upstream direction and its length decreases at low levels with increasing Reynolds number and at more significant levels with the angle of attack, while separation-reattachment points are not revealed in the other 2 turbulence levels (4.9% and 10.5%). Considering all the results, it can be stated that the increasing turbulence level partially or completely eliminated the laminar separation bubble.

Thanks and Information Note

The authors would like to acknowledge funding from the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the Project no: 122M826

References

- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). Boundary-Layer theory. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- Koca, K., Genç, M. S., & Özkan, R. (2021). Mapping of laminar separation bubble and bubble-induced vibrations over a turbine blade at low Reynolds numbers. *Ocean Engineering*, 239, 109867. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109867>
- Demir, H., & Genç, M. S. (2017). An experimental investigation of laminar separation bubble formation on flexible membrane wing. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 65, 326–338. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2017.05.010>
- Açikel, H. H., & Genç, M. S. (2018). Control of laminar separation bubble over wind turbine airfoil using partial flexibility on suction surface. *Energy*, 165, 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.040>
- AlMutairi, J., ElJack, E., & AlQadi, I. (2017). Dynamics of laminar separation bubble over NACA-0012 airfoil near stall conditions. *Aerospace Science and Technology*, 68, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.05.015>
- Hosseinverdi, S., & Fasel, H. F. (2015). Laminar-turbulent transition in a laminar separation bubble in the presence of free-stream turbulence. *Procedia IUTAM*, 14, 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2015.03.066>
- Mayle, R. E. (1991). The 1991 IGTI Scholar Lecture: The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines. *Journal of Turbomachinery*, 113(4), 509–536. <https://doi.org/10.1115/1.2929110>
- Suzen, Y. B., & Huang, P. G. (2000). Modeling of flow transition using an intermittency transport equation. *Journal of Fluids Engineering*, 122(2), 273–284. <https://doi.org/10.1115/1.483255>
- Menter, Esch, T., & Kubacki, S. (2002b). TRANSITION MODELLING BASED ON LOCAL VARIABLES. In *Elsevier eBooks* (pp. 555–564). <https://doi.org/10.1016/b978-008044114-6/50053-3>
- Menter, F. R., Langtry, R. B., Likki, S. R., Suzen, Y. B., Huang, P. G., and Völker, S. (2004). A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation. *ASME. J. Turbomach.* doi: <https://doi.org/10.1115/1.2184352>

Menter, F.R., Langtry, R. & Völker, S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes. Flow Turbulence Combust 77, 277–303 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10494-006-9047-1>

Menter, Florian & Langtry, RB. (2012). Transition Modelling for Turbomachinery Flows. 10.5772/38675.

THE EFFECT OF THE TURBULENCE ON FLOW OVER CAMBERED AIRFOIL AT DIFFERENT REYNOLDS NUMBERS Part II- Experimental Analysis**Meva Yasemin BAŞTUĞ**

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Zafer İPEKLİ

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Sinem KESKİN

PhD. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering,
Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department
of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

This paper investigates the effects of freestream turbulence (FST) intensity and Reynolds number on the aerodynamic performance and flow behavior of a NACA 2415 airfoil. Experiments were conducted in a low-speed wind tunnel at chord-based Reynolds numbers of 50,000 and 150,000, with angles of attack of 0°, 4°, and 8°. A turbulence-generating grid was used to achieve a freestream turbulence intensity of 4.9%. Oil-flow visualization and surface pressure measurements were employed to analyze flow structures, including laminar separation bubbles (LSBs) and surface pressure distributions. Results indicate that increasing FST significantly alters the LSB characteristics, with higher turbulence intensities reducing the bubble length and causing earlier reattachment. At higher Reynolds numbers, the LSB was completely suppressed, resulting in enhanced aerodynamic performance. The pressure coefficient distributions further demonstrated that turbulent flow increased momentum near the surface, alleviating separated flow effects. This study provides insights into the interaction between FST and flow behavior, contributing to a deeper understanding of aerodynamic performance under varying turbulence conditions.

Keywords: Turbulence grid; Low Reynolds number; Laminar separation bubble; Oil Flow Visualization; Pressure Measurement Method.

Introduction

Aerodynamic studies at low Reynolds numbers are gaining significant attention due to their relevance in small-scale air vehicles, renewable energy systems, and other engineering applications (Mueller & DeLaurier, 2003). Under these conditions, flow separation, transition, and reattachment phenomena become more prominent and significantly impact the aerodynamic performance of airfoils (Lissaman, 1983). One of the critical aspects in this regime is the formation of laminar separation bubbles (LSBs), which occur when the laminar boundary layer separates due to an adverse pressure gradient and subsequently transitions to turbulence before reattaching to the surface. The size, location, and behavior of the LSB are influenced by factors such as incidence (AoA), surface roughness, Reynolds number, and flow turbulence intensity (FST). The occurrence of LSB can induce significant drag penalties and alter lift characteristics, thereby impacting the overall aerodynamic efficiency. Additionally, the transition induced by the bubble—known as bubble-induced transition—can be sensitive to upstream flow disturbances, making the study of controlled turbulence particularly relevant in this context process (Delafin et al., 2014, Açıklık & Genç, 2018).

Freestream turbulence plays a pivotal role in influencing LSB behavior and the subsequent transition process (Matsubara & Alfredsson, 2001, Simoni et al., 2017). UAVs operating at low altitudes and wind turbines exposed to the atmospheric boundary layer (ABL) often encounter significant levels of freestream turbulence. Turbulence intensity in the ABL can reach up to 30% in urban zones and 50% around tall buildings. Thus, the interaction between the turbulent flow and the airfoil's boundary layer becomes a key factor influencing performance in these environments (Selig, & Guglielmo, 1997, Watkins, 2020). Many studies investigated the effect of turbulence on flow structure, both based on grid-generated turbulence and inlet velocity (Balzer & Fasel 2016, McAuliffe & Yaras, 2010). I was examined how varying FST (between 0.09 and 2.03%) impacts laminar separation bubbles on a NACA 0018 airfoil. Higher turbulence intensity causes earlier flow transition and reattachment, shortening the bubble. The findings also reveal a wider range of unstable frequencies at increasing turbulence levels, suggesting a shift towards bypass-transition formation (Istvan et al. 2018). Breuer (Breuer, 2018) presented the influence of FST on the flow on airfoil at a low Reynolds number. It was shown that increasing FST caused the LSB to shrink and eventually vanish, enhancing aerodynamic performance by improving the lift-to-drag ratio. Additionally, smaller FST raised the receptivity of the boundary layer, promoting bypass transition and altering the flow dynamics around the airfoil.

The present study focuses on the unique investigation of freestream turbulence effects on the flow characteristics of the NACA 2415 airfoil, specifically at Reynolds numbers of 50,000 and 150,000. By employing a turbulence-generating grid in a controlled wind tunnel environment, this research systematically explores the effect of FST levels on the formation, transition, and reattachment processes associated with LSBs. The methodology of study combines oil-flow visualization and surface pressure measurements. The findings, which highlight the interplay between FST and flow separation dynamics, contribute significantly to understanding aerodynamic performance at low Reynolds numbers and provide critical experimental data.

Materials and Methods

Wind Tunnel Setup, Turbulence Grid, Test Specimen

The experiments were conducted in a low-speed wind tunnel with a rectangular test section. The dimensions of the test section were 0.5m x 0.5m, and the freestream turbulence intensity without the grid was under 1%. A turbulence-generating grid structure was placed at the entrance of the test section to modulate the incoming flow conditions. Velocity and turbulence scanning was performed in the test room with a hot-wire probe, and test airfoil was placed where the freestream turbulence value considered in the study (4.9%) was obtained. The experiments were conducted at chord-based Reynolds numbers, of 50,000 and 150,000. The angles of attack tested were 0°, 4°, and 8°.

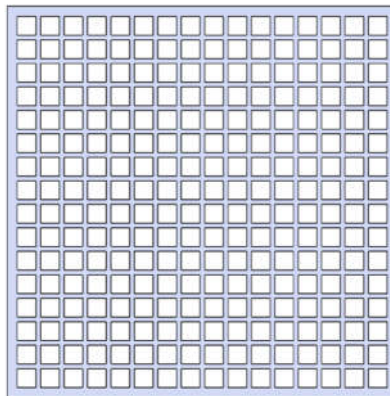


Figure 1. Grid structure of used turbulence curtain.

The curtain grid consists of squares with 6 mm edge length. Curtain dimensions are designed according to the wind tunnel and produced in 0.5×0.5 m dimensions. A NACA 2415 airfoil model with a chord length of 180 mm and a span of 300 mm was used in the experiments. The airfoil was mounted within the tunnel, with endplates to minimize three-dimensional effects. Pressure taps were installed along the chord at 56 locations on airfoil surfaces to measure the surface pressure distribution.

Experimental Methods

To investigate the flow structure around the NACA 2415 airfoil, two primary experimental techniques were employed: oil-flow visualization and surface pressure measurements. These methods provided a detailed understanding of the flow behavior, including separation and reattachment processes.

Oil-flow visualization was used to map the surface flow patterns and identify key flow features such as separation and reattachment lines. A mixture of engine oil and titanium dioxide powder was prepared, ensuring an optimal consistency for adhesion to the airfoil surface and responsiveness to shear forces from the flow. The titanium dioxide particles served as tracers, forming streak patterns that revealed the underlying flow structure. The mixture also included a small amount of oleic acid to enhance its spreading capability and adhesion to the airfoil's surface. High-resolution photographs were recorded during the tests to capture the flow patterns, which were later analyzed to deduce the flow characteristics under different test conditions.

To determine the surface pressure distribution along the airfoil chord, a series of pressure taps were installed on both the suction and pressure sides of the airfoil. The pressure measurements were conducted using a high-precision pressure transducer system capable of capturing minute variations in static pressure. The pressure data were collected and processed to calculate the non-dimensional pressure coefficient C_p is defined as:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho U_\infty^2}$$

where P is the measured static pressure at a given point on the airfoil surface, P_∞ is the freestream static pressure, ρ is the air density, and U_∞ is the freestream velocity.

Findings and Discussion

In this study, oil flow experiments were conducted on the NACA 2415 airfoil to investigate the flow behavior and its impact on aerodynamic performance. The oil flow technique is an effective method for visualizing the flow on the surface of the airfoil and identifying features such as LSBs at its separation and reattachment points. As seen in Table 1, a shortening of the LSB length is observed with the increase of the angle at both Reynolds numbers considered, especially with the attachment point moving significantly upstream for $FST < 1$. This can be attributed to the acceleration with increasing angle and therefore the gain in momentum. This allowed the reattachment to occur earlier. When the turbulence intensity is 4.9, the LSB structure is seriously affected. As can be seen in Table 2, at Reynolds 50,000, it is difficult to understand whether the oil flows down after a certain point due to its own weight or the turbulence intensity. However, at Reynolds 150,000, it is clear that the LSB is completely suppressed due to the higher turbulence.

Table 1. Oil visualization results of NACA 2415 airfoil at $FST < 1\%$.

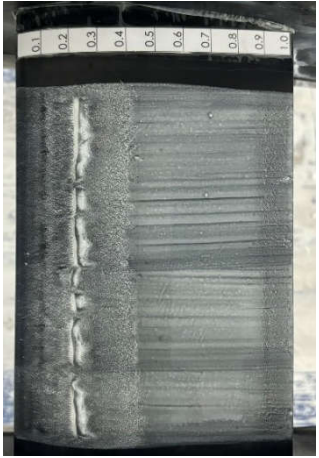
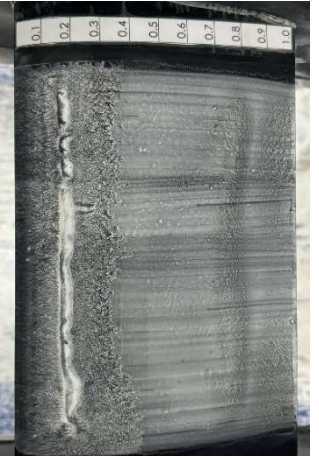
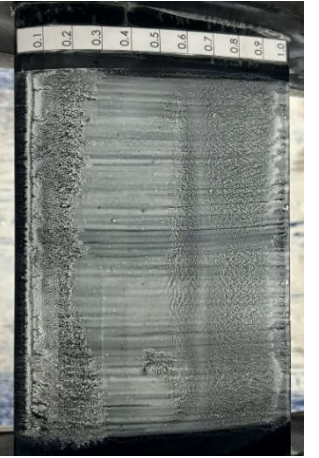


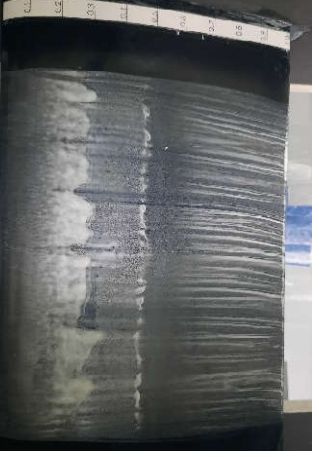
Re	AoA=0°	AoA=4°	AoA=8°
50.000			
150.000			

Table 2. Oil visualization results of NACA 2415 airfoil at FST=%4.9.


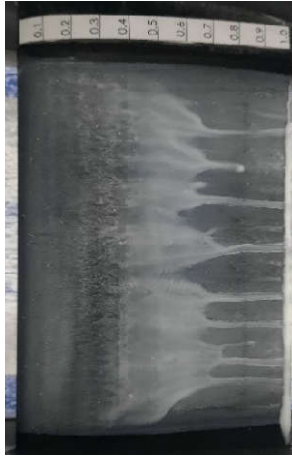
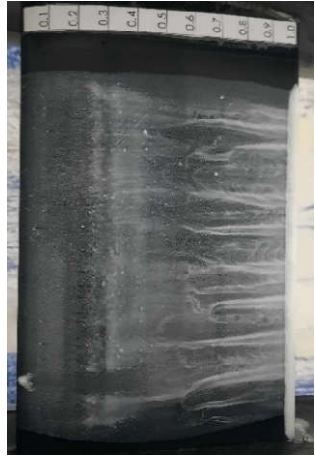



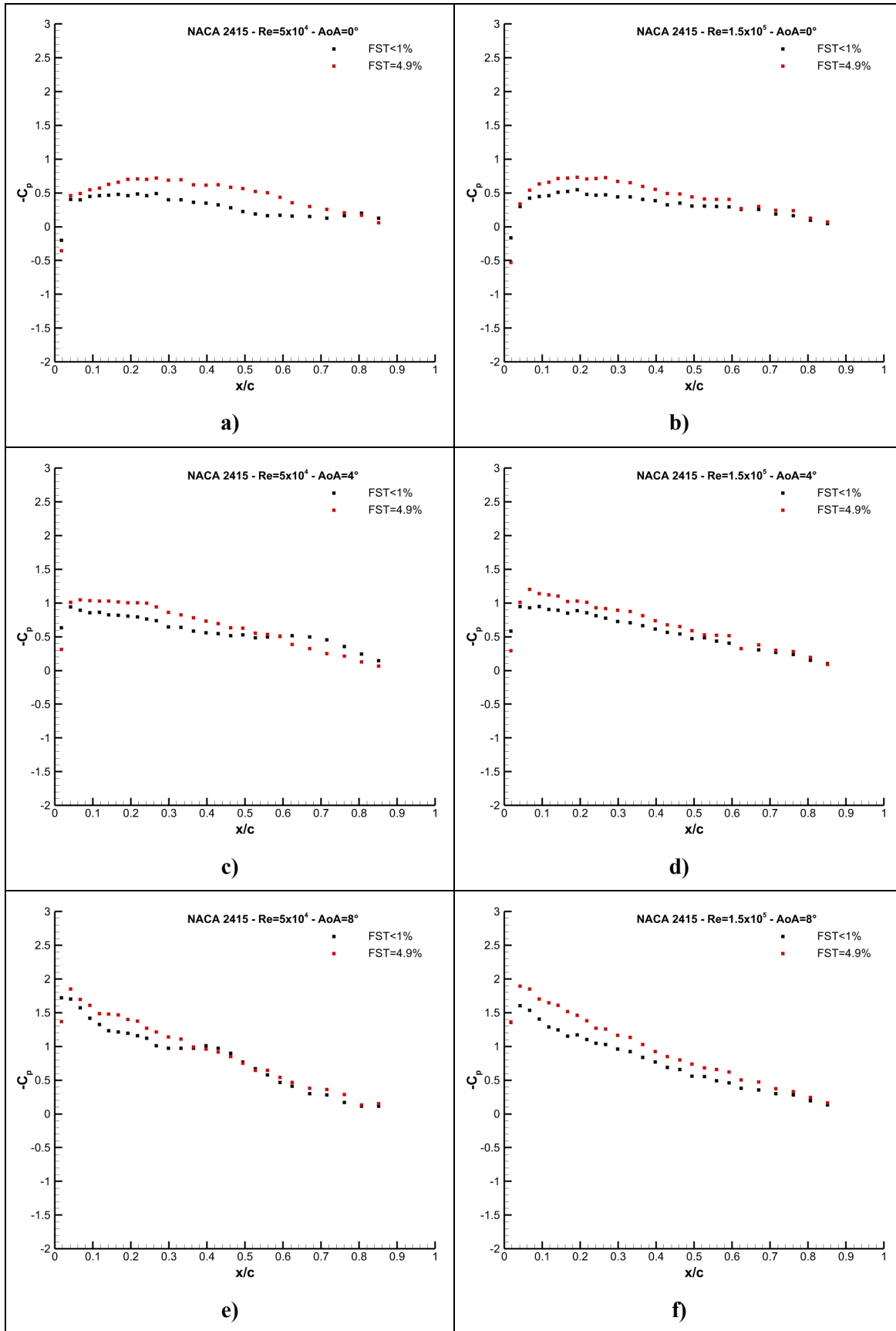
Re	AoA=0°	AoA=4°	AoA=8°
50.000			
150.000			

Table 3 presents the results of the pressure coefficient distribution along the chord at different Reynolds numbers and FST. The use of turbulence curtain (FST=4.9) generally resulted in higher pressure difference distribution along the chord in all cases (Table 3). When the C_p graphs were examined at 50,000 Reynolds, no significant change was observed at 0 degrees, and the effect of the FST on the flow at 4 and 8 degrees was more pronounced. It was observed that the LSB, which was clearly evident at these two angles, alleviated with increasing FST. Instead of the dead zone created by the circulation of the LSB, a flow structure with more momentum due to the turbulent flow structure replaces the separated flow effects. At a Reynolds number of 150,000, it was seen that the part where the pressure remained constant, and therefore the LSB, completely disappeared.

Table 3. Pressure coefficient results on the upper surface of the airfoil along the chord.



Conclusion and Recommendations

This experimental study highlights the significant influence of freestream turbulence intensity on the aerodynamic behavior of the NACA 2415 airfoil at Reynolds numbers of 50,000 and 150,000. The oil-flow visualization results reveal that increasing FST leads to earlier transition and reattachment, thereby shortening or completely eliminating the laminar separation bubble. At higher turbulence levels, the enhanced momentum near the surface prevents flow separation, improving aerodynamic performance. The pressure coefficient measurements confirm these findings, showing increased pressure differences along the chord under turbulent conditions. Notably, the effects of FST become more pronounced at higher angles of attack, where the dead zone caused by LSBs is replaced by a more energetic, turbulent flow. These results underline the importance of considering freestream turbulence in performance evaluation of wind turbine and MAV blades, particularly for applications involving turbulent inflow conditions.

Thanks and Information Note

The authors would like to acknowledge funding from the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the Project no: 122M826.

References

- Açikel, H. H., & Genc, M. S. (2018). Control of laminar separation bubble over wind turbine airfoil using partial flexibility on suction surface. *Energy*, *165*, 176-190.
- Balzer, W., & Fasel, H. F. (2016). Numerical investigation of the role of free-stream turbulence in boundary-layer separation. *Journal of Fluid Mechanics*, *801*, 289-321.
- Breuer, M. (2018). Effect of inflow turbulence on an airfoil flow with laminar separation bubble: An LES study. *Flow, Turbulence and Combustion*, *101*(2), 433-456.
- Delafin, P. L., Deniset, F., & Astolfi, J. A. (2014). Effect of the laminar separation bubble induced transition on the hydrodynamic performance of a hydrofoil. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, *46*, 190-200.
- Istvan, M. S., Kurelek, J. W., & Yarusevych, S. (2018). Turbulence intensity effects on laminar separation bubbles formed over an airfoil. *Aiaa Journal*, *56*(4), 1335-1347.
- Lissaman, P. B. S. (1983). Low-Reynolds-number airfoils. *Annual review of fluid mechanics*, *15*(1), 223-239.
- Matsubara, M., & Alfredsson, P. H. (2001). Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence. *Journal of fluid mechanics*, *430*, 149-168.
- McAuliffe, B. R., & Yaras, M. I. (2010). Transition mechanisms in separation bubbles under low-and elevated-freestream turbulence.
- Mueller, T. J., & DeLaurier, J. D. (2003). Aerodynamics of small vehicles. *Annual review of fluid mechanics*, *35*(1), 89-111.
- Selig, M. S., & Guglielmo, J. J. (1997). High-lift low Reynolds number airfoil design. *Journal of aircraft*, *34*(1), 72-79.
- Simoni, D., Lengani, D., Ubaldi, M., Zunino, P., & Dellacasagrande, M. (2017). Inspection of the dynamic properties of laminar separation bubbles: free-stream turbulence intensity effects for different Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, *58*, 1-14.
- Watkins, S., Burry, J., Mohamed, A., Marino, M., Prudden, S., Fisher, A., ... & Clothier, R. (2020). Ten questions concerning the use of drones in urban environments. *Building and Environment*, *167*, 106458.



STUDYING THE EFFECTS OF ADDING BRONZE TO POLYMER COMPOSITE SLIDING BEARINGS FOR VEHICLE APPLICATIONS ON VIBRATION, NOISE, AND FRICTION COEFFICIENT

Mithat ŞİMŞEK

Dr., Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Tokat-Türkiye, ORCID: 0000-0002-0534-1133

Nurullah GÜLTEKİN

Dr., Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Tokat-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0002-0139-1352

ABSTRACT

The rapid increase in the world population has also increased the need for materials. Manufacturers who used to produce mainly from metal materials in the past have turned to low-cost polymer materials. Therefore, the use of polymer materials is increasing day by day. In order to expand the usage area of these materials, their physical properties are improved by using different additives. Improvement of physical properties will enable the production of journal bearings used in internal combustion engines from polymer composites. In this way, part production costs can be reduced. In this study, tests of sliding bearings made of polymer composite material with different proportions of bronze added (40%–60%) were carried out. The tests were carried out at three different loads (15-30-45 N) and two different speeds (0.20-0.40 m/s). In the tests, the effect of bronze addition on the friction coefficient, mechanical vibration, and noise was determined. When some of the experimental data were evaluated, it was determined that the polymer composite with 60% bronze added reduced the average friction coefficient by 8.5%, increased the noise by 0.9 dBA, and reduced mechanical vibration by 3.5% compared to the sliding bearing material with pure polymer material under the conditions of 45 N load and 0.40 m/s speed.

Keywords: Polymer composite; Bronze, Coefficient of friction; Mechanical Vibration; Noise

Nomenclature

<i>BZ</i>	: <i>Bronze</i>
<i>PTFE</i>	: <i>Politetrafloroetilen</i>
<i>Cu</i>	: <i>Copper</i>
<i>CNC</i>	: <i>Computer Numerical Control</i>
μ	: <i>Coefficient of friction</i>
<i>g</i>	: <i>m/sn²</i>
<i>40BZ60PTFE</i>	: <i>40% BZ + 60% PTFE</i>
<i>60BZ40PTFE</i>	: <i>60% BZ + 40% PTFE</i>

1. Introduction

Many new types of materials are used in vehicles. It is of great importance that these materials are low-cost and available (Barta, et al. 2018; Figlus, et al. 2019; Galińska 2020). These parameters are vital for manufacturers in a competitive environment. Therefore, the use of low-cost and easy-to-produce polymer materials is increasing day by day (Blatnický, et al. 2020; Łepicka, et al. 2019). Vehicle weight reduction is effectively possible with polymer materials (Ganesarajan, et al. 2022). In this way, the amount of energy required to move the vehicle will be reduced, and it will be possible to reduce emissions that have harmful effects on the environment (Candela, et al. 2024). However, these materials have poor resistance to mechanical loads and high temperatures during use. Different additives can improve the weak properties of these materials.

In recent years, the automotive sector has preferred composite polymer materials (Blatnický, et al. 2020; Ľepická, et al. 2019).

Many different additives can be added to the polymer composite. The type and ratio of these additives can be used to improve the desired properties of the material. Focusing on this issue, Nuruzzaman et al. (Muhammad Nuruzzaman, et al. 2011) conducted an experimental study on the variation of friction coefficient and wear rate with load for stainless steel pins sliding on different types of materials. The study observed a decrease in the friction coefficient values for glass fiber, nylon, and polytetrafluoroethylene (PTFE) as the normal load increased. Krishnakumar et al. (Krishnakumar, et al. 2019), who conducted experimental studies with composite materials, used nickel, aluminum, and silicon alloys in their studies. They investigated microhardness and wear behavior in the study. They determined that the addition of nickel increased the hardness and reduced the wear rate. When other studies on the subject are evaluated together, it is seen that the hardness of the material used has an effect on wear resistance. The literature also sees the use of various additives to enhance the chemical and mechanical properties of sliding bearing materials used in vehicles. Researchers have stated that overheating bearings used in vehicles can cause them to wear out and lead to premature failure (Anusha, et al. 2020; Raadnui, et al. 2008). Since the wear resistance of the sliding bearing material has a decisive influence on the life of the bearing, improving the wear resistance of the bearings can increase their service life (Du, et al. 2022; Kim 2011). Zhao et al. (Zhao, et al. 2022), tested aluminum bronze (BZ) and tin bronze-based bearings under different loads. As a result of the tests, they found that the average friction coefficient of aluminum-bronze-based material was low.

When the studies carried out to improve the physical and chemical properties of polymer composite materials are examined, it is seen that the addition of bronze has a positive effect on the coefficient of friction and wear. It is possible to use polymer composites with bronze addition in the production of parts that will operate in areas exposed to high friction. Hasan et al. (Hasan, et al. 2022), who studied on this subject, tested titanium carbide and graphite particle-reinforced bronze alloy composites. In the tests, they determined that wear resistance and hardness increased with alloy reinforcement. In another study parallel to this study, Tüfekçi et al. (Tüfekçi, et al. 2006) experimentally examined copper, tin, carbon, and iron-based bearings at different sliding speeds, loads, and temperatures. In the study, it was determined that copper-added sliding bearings have better wear and friction properties than iron-added bearings.

When the studies in the literature are evaluated in general, there are many studies aimed at improving the wear and friction properties of sliding bearings produced by adding different additives. However, it is seen that there are few studies on noise and mechanical vibration, which have many negative effects on machines and humans. Therefore, this study focused on mechanical vibration and noise. The study tested sliding bearings made of pure PTFE, PTFE with 40% bronze (BZ) addition (40% BZ + 60% PTFE), and PTFE with 60% BZ addition (60% BZ + 40% PTFE). The goal of the study is to ascertain how the BZ additive in the polymer material affects the bearing friction coefficient, mechanical vibration, and noise pollution.

2. Material and method

The equipment used in the experimental study is shown in Fig. 1. Friction tests were performed on a radial sliding bearing test device [19]. The device records data once a second from the computer interface. A Geratech DT 8820 noise measuring device was used to obtain noise data. The device recorded data at a distance of 200 mm from the test bed. PCE-VD 3 vibration device was used to obtain vibration values. The device is magnetically mounted on the bearing carrier body. Data is recorded at 500 ms intervals with the help of a computer connected to the device. The program on the computer records the vibration data in the x, y, and z planes and can calculate the average mechanical vibration data.

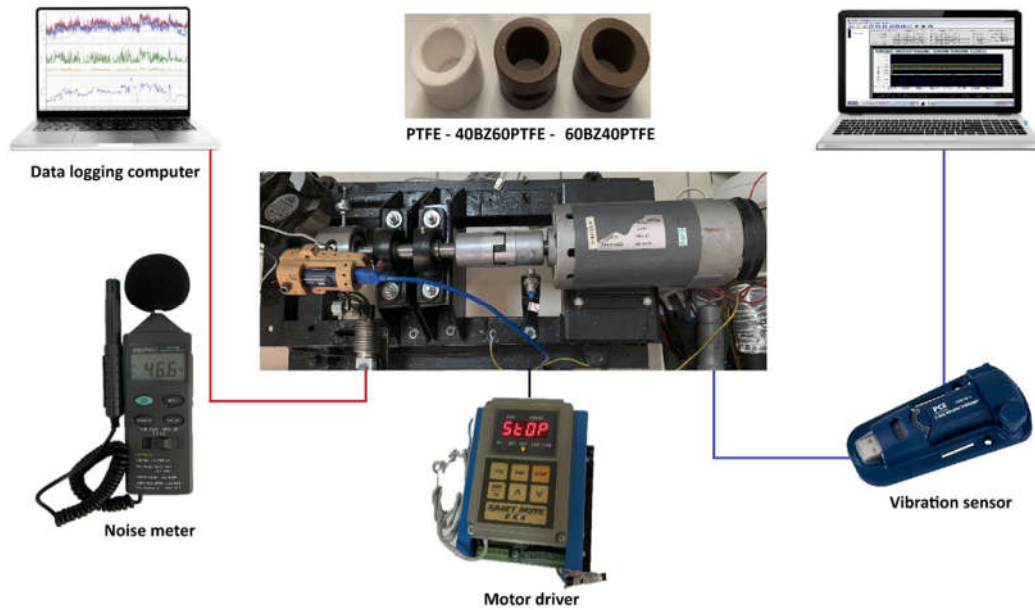


Fig. 1. Experimental setup and equipment.

Three different bearing materials were used in the study: pure PTFE, PTFE material with 40% BZ addition (40BZ60PTFE), and PTFE material with 60% BZ addition (60BZ40PTFE). The properties of the materials used are given in Table 1. The tests were carried out at two different speeds (0.20, 0.40 m/s), three different loads (15, 30, 45 N), and dry friction conditions. Each test was repeated three times at a sliding distance of 250 m, and the average values were taken.

Table 1- Physical, chemical and thermal properties of materials.

Properties	Pure	Bronze + PTFE	
	PTFE	40BZ60PTFE	60BZ40PTFE
Density (gr/cm ³)	2.1-2.2	3.05-3.15	3.8-4.0
Tensile strength (Kg/cm ²)	140-380	150-280	140-220
Strain failure	200-400	180-280	110-220
Compressive strength	45-50	100-105	105-110
Impact Resistance (Izod, notched), (Kj/m ²)	15.5-16.5	11-12	10-11
Hardness (Shore D)	54-60	64-68	65-70
Coefficient of Friction, Static	0.04	0.05	0.07
Coefficient of Friction, Dynamic	0.06	0.12	0.13
Thermal conductivity (x10 ⁻⁴) 30°C (Cal/cm.sn.°C)	5.5-6	17-20	17-20
Coefficient of Expansion (x10 ⁻⁵), (25°C-100°C), (°C ⁻¹)	12.5-16	8-9.5	7.5-9
Working Temperature, Min. (°C)	-260	-260	-260
Working Temperature, Max. (°C)	+270	+270	+270

The material of the sliding bearings was purchased from POLİKİM company and manufactured on a Computer Numerical Control (CNC) machine with a machining method and a bearing diameter and width of 25 mm. Since the heat generated in the bearing during the experiments will cause expansion, a bearing clearance of 0.075 mm (bearing diameter x 3.10⁻³) was given. The shaft used to perform the friction tests was made of 1050 steel.

A PCE-VD 3 vibration device was used to obtain vibration data in the experiments. Technical specifications of the device are shown in Table 2. Data were taken between 100 and 150 meters for each experiment.

Table 2- Vibration device characteristics.

Properties	Value
Measurement range	±16 g
Accuracy	± 0.5 g
Resolution	0.004 g
Frequency range	0 ... 60 Hz
Memory	8 Mbit (normal measuring mode: 168042 record/ motion detection: 112028 records)
Measurement rate / Record interval	50 ms ... 12 hours
Interface	USB
Operating conditions	0 ... 40 °C
Storage conditions	-10 ... 60 °C

3. Results and discussions

3.1. Coefficient of friction (μ)

If sliding bearings are exposed to high friction during operation, this causes the material to deteriorate and the machine element to become inoperable. Therefore, it is desired that the friction coefficient of sliding bearings be low. The low coefficient of friction of polymer materials makes their use in sliding bearings attractive. At the same time, if different additives are used, the coefficient of friction of the polymer material changes. The friction coefficient values of the bearing materials used in the experimental study depending on the road at 15, 30, 45 N loads and 0.20, 0.40 m/s sliding speeds are shown in Fig. 3-5.

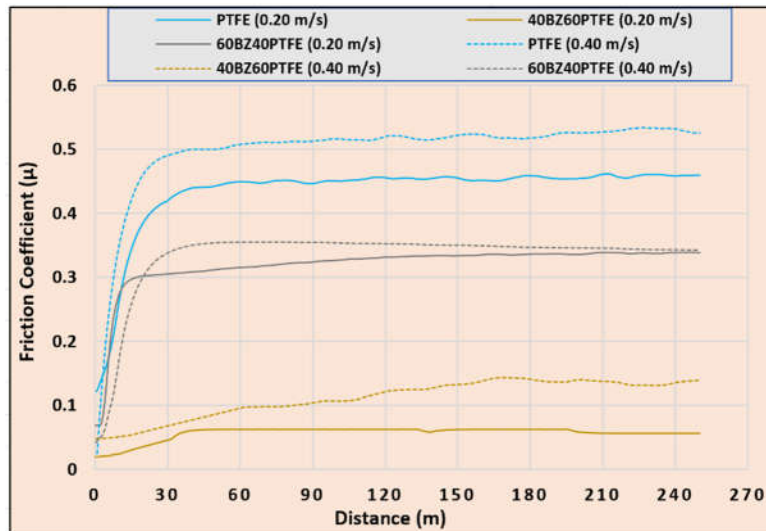


Fig. 2. Friction coefficient variation with distance under 15 N load.

In the experiments conducted at 15 N load, it was determined that the friction coefficient increased depending on the speed. While the average creep coefficient during the experiment period was 0.445 at a speed of 0.20 m/s in the use of PTFE material, the average friction coefficient increased by 12% and reached 0.501 when the speed was increased to 0.40 m/s. The main reason for this situation is that the interaction between the materials becomes more pronounced as the speed increases. It was determined that the friction coefficient decreased significantly with the use of 40BZ60PTFE material at a speed of 0.20 m/s compared to pure PTFE and decreased slightly with the use of 60BZ40PTFE material. It was found that when the speed was increased to 0.4 m/s, the average friction coefficient using 40BZ60PTFE material decreased significantly compared to pure PTFE. This is due to the lower adhesion properties of bronze compared to PTFE.

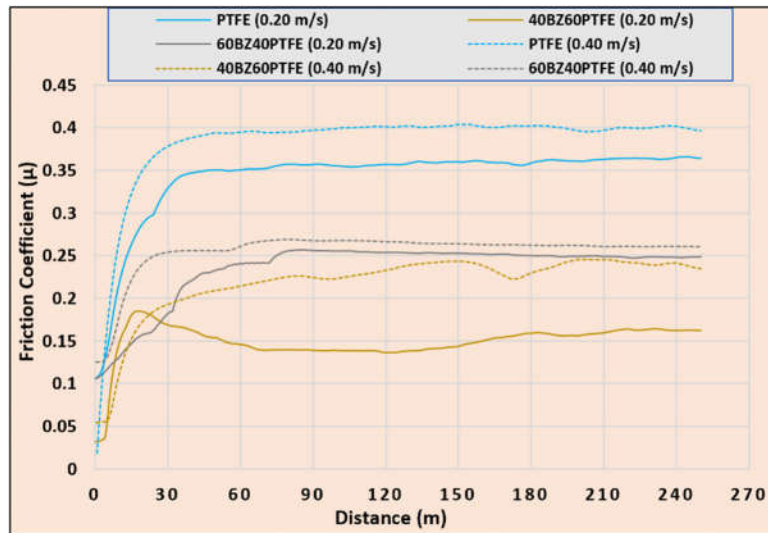


Fig. 3. Friction coefficient variation with distance under 30 N load.

In the experiments performed under a 30 N load, it was ascertained that the friction coefficient escalated with increasing speed. The average creep coefficient during the experimental period was 0.353 at a velocity of 0.20 m/s using PTFE material, while the average friction coefficient rose by 9% to 0.384 when the velocity increased to 0.40 m/s. The primary cause of this situation is that the interaction among the materials intensifies with the increase in velocity. At a speed of 0.20 m/s, it was found that the friction coefficient decreased considerably when 40BZ60PTFE material was used in comparison to pure PTFE, and it decreased slightly when 60BZ40PTFE material was used. By increasing the speed to 0.4 m/s, it was found that the use of 40BZ60PTFE material resulted in a 43% decrease in the average friction coefficient when compared to pure PTFE. This is because bronze has poorer adhesion qualities than PTFE.

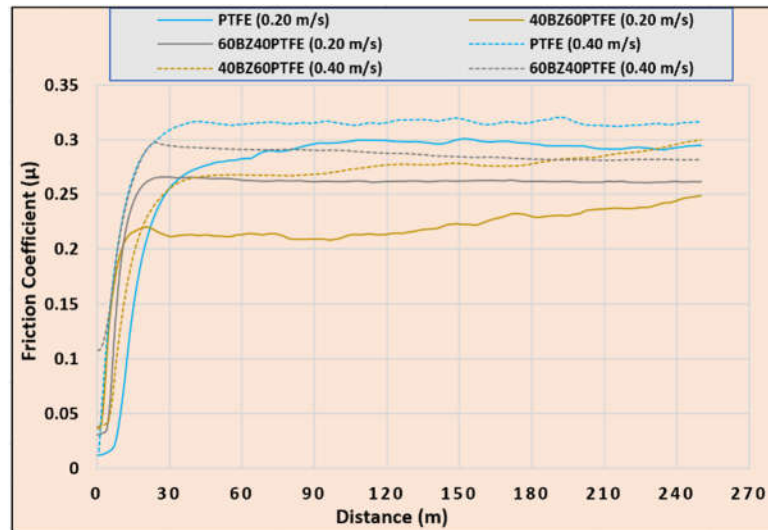


Fig. 4. Friction coefficient variation with distance under 45 N load.

The friction coefficient increased with speed in experiments with a 45 N load. While the average creep coefficient during the experiment period was 0.287 at 0.20 m/s using PTFE material, the average friction coefficient increased by 6% to 0.306 when the speed was increased to 0.40 m/s. The main reason for this situation is that the interaction between the materials becomes more pronounced as the speed increases. It was determined that the friction coefficient decreased significantly (24%) when 40BZ60PTFE material was used at a speed of 0.20 m/s in comparison to pure PTFE, and the decrease was less pronounced (12%) when 60BZ40PTFE material was used. It was proven that the average friction coefficient decreased by 14% when

the speed was increased to 0.4 m/s with 40BZ60PTFE material and by 9% when the speed was increased to 60BZ40PTFE material in comparison to pure PTFE. This is a result of the superior sliding properties of bronze in comparison to PTFE.

3.2. Vibration

The point that manufacturers focus on the most in machine manufacturing is the vibrations that occur as a result of the operation of the machine. The main purpose here is to prevent the machine from shortening its life due to high vibration. In this study, the main subject is to examine the vibration that occurs in sliding bearings. It is expected that the use of sliding bearings produced from polymer material will reduce vibration. However, additives added to the polymer may cause increased vibration. The vibration values of the bearing materials used in the study under different loads (15, 30, 45 N) and speeds (0.20 and 0.40 m/s) are shown in Fig. 5.

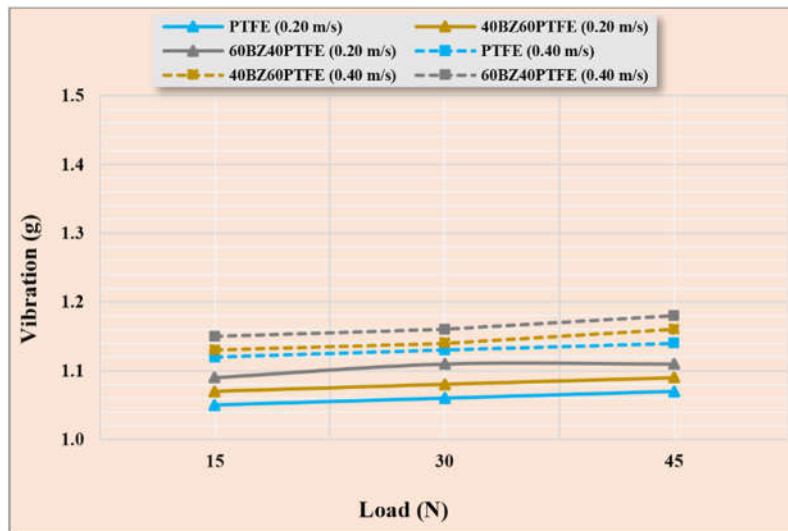


Fig. 5. Changes in mechanical vibration values depending on speed and load.

In the experiments, it was determined that the vibration increased with increasing speed. When the PTFE material was used under a load of 15 N and the speed was doubled, the vibration increased by 7.25% and reached 1.12 g. When the load was increased from 15 N to 45 N at low speed, the vibration increased from 1.05 g to 1.07 g when the PTFE material was used. When the material properties were evaluated, it was determined that the vibration was increased by 2% with the use of 40BZ60PTFE material at a 15 N and a speed of 0.20 m/s compared to pure PTFE and by 4% when using 60BZ40PTFE. It was determined that the vibration was increased by 1% with the use of 40BZ60PTFE material by increasing the speed to 0.40 m/s at the same load and the vibration was increased by 2.5% when using 60BZ40PTFE material. This is due to the higher hardness of bronze compared to PTFE.

3.3. Noise (dBA)

In recent years, studies have proven the negative effects of noise on human health. Especially in people exposed to high machine noise in closed areas, permanent hearing loss and tinnitus problems have been detected and recorded [17, 18]. Therefore, it is desired that the noise level of operating machines is low and does not affect the environment. Material selection and design during the machine manufacturing phase affect noise. The noise levels of polymer materials are lower than metal materials. Therefore, the use of polymer materials in machine manufacturing has increased in recent years. The noise values of the bearing materials used in the study under different loads (15, 30, and 45 N) and speeds (0.20 and 0.40 m/s) are shown in Fig. 6.

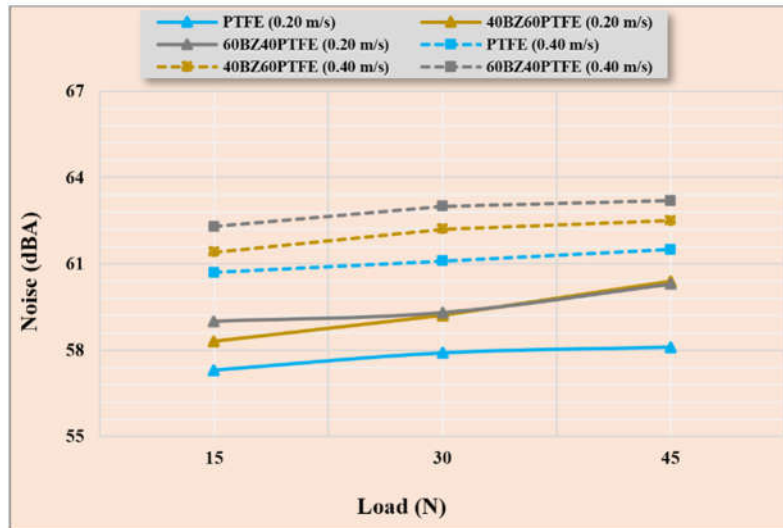


Fig. 6. Changes in noise values depending on speed and load.

In general, it was determined in the experiments that the noise level increased with increasing speed and load. When PTFE material was used under 30 N load and the speed was doubled, the noise increased by 3.2 dBA and reached 61.1 dBA. When the load increase was evaluated, when the load was increased from 15 N to 45 N, the noise increased by 0.8 dBA and reached 61.5 dBA when PTFE material was used at a speed of 0.40 m/s.

When the material properties were evaluated, it was determined that the noise increased by 1.3 dBA to 59.2 dBA with the use of 40BZ60PTFE material at a load of 30 N and a speed of 0.20 m/s compared to pure PTFE. It was determined that the noise increased by 1.4 dBA to 59.3 dBA with the use of 60BZ40PTFE material. It was determined that the noise increased with the addition of bronze material. This is due to the higher hardness of bronze compared to PTFE.

4. Conclusions and recommendations

In this study, where the addition of bronze to the PTFE material used in bearing materials was examined at different loads and speeds, the following results were obtained.

- The friction coefficient of the PTFE material decreased as the bronze addition increased. However, when the bronze addition was 60%, the friction coefficient was higher than when the bronze addition was 40%. This situation supports the idea that the addition of bronze to the PTFE material in the sliding bearing material should be limited to a certain extent.
- The friction coefficient decreased with the increase in bearing pressure.
- It has been determined that mechanical vibration increases with increasing speed and load. In experiments conducted under 15 N load, the mechanical vibration value of the PTFE material was 1.05 g at a speed of 0.20 m/s, while it increased to 1.12 g at a speed of 0.40 m/s. When we increased the load to 45 N for the same material, it became 1.07 g.
- The mechanical vibration increased when the bronze additive was added. At 30 N load and 0.20 m/s speed, the mechanical vibration values increased by 2% and 4.6%, respectively, in the use of 40BZ60PTFE and 60BZ40PTFE materials compared to PTFE material.
- It was determined that noise increased with increasing speed and load. In the experiments carried out under 30 N load, the noise value of PTFE material was 57.9 dBA at 0.20 m/s speed, while it became 61.1 dBA when the speed was increased to 0.40 m/s. In the same material, it became 58.1 dBA when the load was increased to 45 N and the speed was low.

- The noise level increased when the bronze additive was increased. At 30 N load and 0.20 m/s speed, mechanical vibration values increased by 1.3 dBA and 1.4 dBA, respectively, in the use of 40BZ60PTFE and 60BZ40PTFE materials compared to PTFE material.
- The use of new types of materials obtained by adding additives to polymer materials is quite common in automotive production. It is also possible to use these materials as sliding bearings. The study supports this situation.

Thanks and Information Note

The authors express their gratitude to Tokat Gaziosmanpaşa University.

REFERENCES

- Anusha E, Kumar A, Shariff S (2020). Diode laser surface treatment of bearing steel for improved sliding wear performance. *Optik* 206:163357
- Barta D, Mruzek M, Labuda R, Skrucany T, Gardynski L (2018). Possibility of increasing vehicle energy balance using coating. *Advances in Science and Technology Research Journal* 12:
- Blatnický M, Sága M, Dižo J, Bruna M (2020). Application of light metal alloy EN AW 6063 to vehicle frame construction with an innovated steering mechanism. *Materials* 13:817
- Candela A, Sandrini G, Gadola M, Chindamo D, Magri P (2024). Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: Review of the main materials and methods. *Heliyon*
- Du F, Li D, Sa X, Li C, Yu Y, Li C, Wang J, Wang W (2022). Overview of friction and wear performance of sliding bearings. *Coatings* 12:1303
- Figlus T, Koziół M, Kuczyński Ł (2019). The effect of selected operational factors on the vibroactivity of upper gearbox housings made of composite materials. *Sensors* 19:4240
- Galińska A (2020). Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part I: bolted joining. *Polymers* 12:2252
- Ganesarajan D, Simon L, Tamrakar S, Kiziltas A, Mielewski D, Behabtu N, Lenges C (2022). Hybrid composites with engineered polysaccharides for automotive lightweight. *Composites Part C: Open Access* 7:100222
- Hasan F, Jaiswal R, Kumar A, Yadav A (2022). Effect of TiC and graphite reinforcement on hardness and wear behaviour of copper alloy B-RG10 composites fabricated through powder metallurgy. *JMST Advances* 4:1-11
- Kim K (2011). Friction behaviours of molybdenum-based coatings under fretting condition. *International Journal of Surface Science and Engineering* 5:169-179
- Krishnakumar M, Mohnbabu A, Saravanan R (2019). Impact of surface alloying of nickel on microstructure, hardness and wear on aluminium–12% silicon alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals* 72:2395-2402
- Łepicka M, Grądzka-Dahlke M, Pieniak D, Pasierbiewicz K, Kryńska K, Niewczas A (2019). Tribological performance of titanium nitride coatings: A comparative study on TiN-coated stainless steel and titanium alloy. *Wear* 422:68-80
- Muhammad Nuruzzaman D, Asaduzzaman Chowdhury M, Lutfar Rahaman M (2011). Effect of duration of rubbing and normal load on friction coefficient for polymer and composite materials. *Industrial lubrication and tribology* 63:320-326
- Raadnu S, Mahathanabodee S, Tongsri R (2008). Tribological behaviour of sintered 316L stainless steel impregnated with MoS₂ plain bearing. *Wear* 265:546-553

Tüfekci K, Kurbanoglu C, Durak E, Tunay RF (2006). Friction and wear properties of Cu and Fe-based P/M bearing materials. *Journal of mechanical science and technology* 20:513-521

Zhao L, Li J, Yang Q, Wang Y, Zhang X, Li H, Yang Z, Xu D, Liu J (2022). Study on friction and wear properties of new self-lubricating bearing materials. *Crystals* 12:834



HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRİK YÜK ANALİZİ KAPSAMINDA BATARYA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Seda BELEN

Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği (YL), İstanbul, Türkiye ORCID:
<https://orcid.org/0009-0005-2717-1066>

Ramazan AYZ

Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6201-1181>

Özet

Uçaklarda sistem ve motor çalıştırma gücü ile acil durumlarda (jeneratör arızası vb.) uçağın enerjilendirilmesi bataryalar üzerinden sağlanır. Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration, FAA) yönetmeliklerinde, hava araçlarında kullanılan bataryalar için acil durum koşullarında minimum 30 dakikalık güç gereksinimi mevcuttur. Bataryaların performans analizi, elektrik yük analizi (Electrical Load Analysis, ELA) kapsamında yapılmaktadır ve bu analiz bataryanın acil durumlarda gerekli gücü sağlama kapasitesine sahip olup olmadığını göstermektedir. Uçaklarda katatsrofik tehlikelerden kaçınmak için ELA'nın, tüm uçuş fazlarında, elektrik yüklerinin en kötü durum kombinasyonları (maksimum talep) ve tüm olası senaryolar (havada 3 kez motor çalıştırma sonrası batarya dayanım süresinin hesaplanması vb.) göz önüne alınarak yapılması gerekmektedir. Uçakların güç taleplerindeki artış ile havacılık sektöründe yaygınlaşan ve milli uçak projelerimize de yansıyan Ni-Cd bataryadan Li-ion bataryaya geçiş, ELA' da batarya analiz yönteminin Ni-Cd bataryaya nazaran daha detay veri sağlayan Li-ion batarya üzerinde geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Literatürde Li-ion bataryalara eğilim ve bu bataryaların avantaj ve dezavantajlarına yönelik çalışmalar yeterince mevcuttur. Ancak Elektrik Yük Analizi kapsamında Li-ion bataryaların analizleri konusunda kaynak sınırlıdır. Bu çalışma kapsamında, ELA içeriğinde olması gereken asgari bölümler, hesaplamaları etkileyecek varsayım ve kriterler ele alınarak batarya analiz metodu gösterilmektedir. Aynı yükler üzerinde, eş kapasiteli (Ah) nikel kadmiyum ve lityum iyon bataryanın şarj durumu (State of Charge, SOC) ve kullanım ömrü (End of Life, EOL) parametreleri göz önüne alınarak batarya dayanım süreleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan süreler uçakta acil modda beslenmesi gerekli ekipmanlar için farklı senaryolarda (uçağın tüm operasyonel fazlarında yük kombinasyonları düşünülerek, ekipmanların çalışma sürelerinde (5s, 5dk, sürekli) ayrı ayrı hesaplanması vb.) ne kadar süre güç sağlanabileceğinin göstergesidir. Her iki tip eş kapasiteli batarya için elde edilen analiz sonuçları, lityum iyon bataryanın batarya dayanım süresinin (battery endurance time/battery duration) nikel kadmiyum bataryadan daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Li-ion batarya, Ni-Cd batarya, Elektrik Yük Analizi.

1. GİRİŞ

Hava araçlarında farklı amaçlara yönelik olsa, elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için elektrik enerjisi depolama ünitesi(leri) olarak bataryalar kullanılmaktadır.

Uçakların güç taleplerindeki artışın batarya malzemeleri ve teknolojisindeki ilerleme ile birleşmesiyle, havacılık sektöründe batarya seçimindeki mevcut eğilimlerin, Ni-Cd bataryadan Li-ion bataryaya geçiş yönünde olduğu gözlemlenmiştir. Li-ion teknolojisine yönelme nedeni, lityum iyon bataryaların benzerleri karşısında sergiledikleri yüksek enerji yoğunlukları, yüksek özgül güç, hafıza etkisinin olmaması ve kendi kendine düşük deşarj oranıdır. Lityum iyon piller için, kendi kendine deşarj oranı ayda maksimum %5 oranında çok düşüktür ve pil ömrü 1500'den fazla döngüye ulaşabilir (Özcan, 2021).

Nikel-kadmiyum bataryalar, 1899'da Waldmar Jungner tarafından icat edilmiştir. 1980'lerin sonlarına doğru da %60 daha yüksek kapasiteli hale getirilerek geliştirilmiştir. Ni-Cd bataryalar basit ve hızlı şarj oranına sahiptir. Ayrıca yüksek sayıda şarj/deşarj döngüsüne (yaklaşık 1000 döngü) sahip olduklarından döngü başına maliyet açısından düşük maliyetli bataryalar arasında yerini almaktadır. Bununla birlikte, 'hafıza etkisi'

(periyodik olarak tam kapasitesini boşaltmak) gibi dezavantajları da söz konusudur. Li-ion bataryalar ile karşılaştırıldıklarında, düşük özgül enerji yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca yüksek bir kendi kendine deşarj oranına sahiptir ve toksik bir metal olduğu için kadmiyum atılması kritik bir problem olmaya devam etmektedir (Bernard & Lippert, 2015).

Şarj edilemeyen tipte Lityum bataryalar 1970'lerin başlarında ortaya çıkmıştır. Metal bazlı Lityum bataryaların, özellikle şarj sırasında birçok güvenlik problemi ile karşılaşıldığından, araştırmacılar odak noktalarını metalik olmayan Lityum-iyon bataryalara kaydırmıştır (Tarascon & Armand, 2001). Standartlaştırılmış bir formatta ilk ticari batarya, 1991 yılında Sony tarafından piyasaya sürülmüştür. Lityum-iyon'un enerji yoğunluğu, Nikel-kadmiyum'un yaklaşık iki katıdır. Ayrıca 'hafıza etkisi' yoktur ve düşük kendi kendine deşarj oranı ile bakım kolaylığı mevcuttur. Tüm bu avantajlara rağmen kırılmalıdır ve güvenli çalışmaları için koruma devresi ihtiyaçları mevcuttur ve diğer pillere nazaran pahalıdır (Mohd & Ali & Chandana & Amit, 2017).

Li-ion bataryaların diğer bataryalara nazaran hacimsel enerji yoğunluğunun daha yüksek olması aynı miktarda depolanan enerji için daha küçük boyutta olmalarını sağlar. Lityum-iyon bataryalar yüksek özgül enerjiye sahip olduğundan, depolanan aynı miktarda enerji için diğer bataryalardan daha düşük ağırlığa sahiptir. Li-ion bataryaların Ni-Cd bataryalara kıyasla yüksek özgül güce sahip olmaları; uçakta motor çalıştırma gibi hızlı şarj veya deşarjın önemli olduğu uygulamalar için oldukça önemlidir. Ayrıca, NiCd pillerin hafıza etkisi kaynaklı tam olarak boşalmadan şarj edilmesi durumunda maksimum kapasitelerinde azalma söz konusuysen lityum-iyon pilleri şarj etmek için tamamen boşalmalarını beklemek veya tam olarak şarj etmek gerekmez. Bu avantajları göz önüne alınarak, milli uçak projelerinde Li-ion bataryalar Ni-Cd bataryaların yerini almaktadır.

Uçaklarda ikincil elektrik güç üretim kaynakları olarak kullanılan bataryalar, kritik sistemlere sağlanan gerilim seviyesinin anlık gerilim düşmelerinden etkilenmeyecek şekilde belli limitlerde tutulması, motor çalıştırma, birincil güç kaynaklarının arızalanması durumunda güvenli uçuş ve iniş için gerekli yüklerin yeterli sürelerde beslenmeleri ve acil inişlerde yolcu tahliyesi için gerekli aydınlatmanın sağlanması gibi fonksiyonlar için kullanılabilirler (Bengi, 2009). Bataryaların bu kritik işlevleri nedeniyle güvenilirlikleri ve performansları büyük önem taşımaktadır. Bataryaların performans analizi, elektrik yük analizi kapsamında yapılmaktadır ve bu analiz sonucu bataryanın gerektiğinde gerekli gücü sağlama kapasitesine sahip olup olmadığını gösterir.

Hava araçlarında güç üretim ve dağıtım operasyonları, kaynakların ve dağıtım elemanlarının kapasiteleri, tüm olası koşullarda ve sürelerde yeterlilikleri elektrik yük analizi çalışmaları kapsamında değerlendirilmektedir. Bunun için güç ihtiyacı olan ekipmanların nominal ve anlık güç ihtiyaçları, güç üretim ekipmanları kayıpları da dahil olmak üzere, bazı ekipmanların arızalanmaları senaryoları ve uçağın görev profili de göz önünde bulundurularak, tüm olası çalışma koşullarında hesaplanmakta ve bulunan değerlerin güç kaynaklarının belirlenen senaryolarda sağlayabilecekleri kapasiteler ile uyumları incelenmektedir.

Bir hava taşıtının ELA'sının nihai kullanımı, güç kaynağı bileşenlerinin özelliklerinin ve kapasitesinin listelenmesi ve bunun sonucunda ekipmanın normal, anormal, acil durum çalışma gücü koşulları altında tatmin edici performansının sağlanmasıdır.

Bu çalışma kapsamında ELA hazırlığı altında, ELA içeriğinde asgari hangi bölümlerin yer alacağı, ELA giriş bölümünde hava aracı elektrik sistemi ile ilgili minimum hangi bilgilere yer verilmesi gerektiği, ELA'da batarya analizi için varsayım ve kriterlerin nasıl belirlendiği ve aynı yükler altında eş kapasiteli Ni-Cd ve Li-ion batarya analizinin sadeleştirilmiş batarya analiz metodu üzerinden yapılarak karşılaştırılması ele alınmıştır.

2. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

2.1. ELA'nın Hazırlanması

ASTM F 2490-05_4.3'e göre elektrik yük analizinin (ELA) birincil amacı; elektrik yüklerinin en kötü durum kombinasyonlarını (maksimum talep) sağlamak için gereken elektrik sistemi kapasitesini belirlemektir. ELA normal, anormal ve acil durum koşullarında güç kaynaklarının yeterliliğini belirler. ELA sisteme elektrik yükleri ekleyebilecek veya kaldırabilecek elektrik sistemindeki değişiklikleri kaydetmek için hava taşıtının ömrü boyunca muhafaza edilmelidir (ASTM F 2490-05).

ASTM F 2490-05_4.4'e göre hava aracı tip sertifikasyonu için üretilen ELA, sonraki değişiklikler için temel belge olarak kullanılmalıdır. Mümkün olduğunca, metodoloji ve yaklaşımda tutarlılığı sağlamak için orijinal ELA'nın temel formatı izlenmelidir (ASTM F 2490-05).

2.1.1. ELA İçeriği

Yük ve güç kaynağı kapasite analizi minimum aşağıdaki bölümleri içermelidir:

- Giriş
- Varsayımlar ve Kriterler
- Yük Analizi (Jeneratör ve Batarya Analizleri)
- Özet ve Sonuçlar

2.1.2. ELA Giriş Bölümü

ASTM F 2490-05_6.2.1.'e göre ELA raporuna giriş, okuyucunun hava aracının çalışma aşamaları ile ilgili olarak elektrik sisteminin işlevini anlamasına yardımcı olacak özet bilgileri içermelidir (ASTM F 2490-05).

ELA raporuna girişte asgari; uçağın beklenen operasyonel rolünü içeren uçak tipinin açıklaması, normal, anormal ve acil durum operasyonları, devre kesicilerle bara yapılandırması ve her bara için bağlı yükleri tanımlayan elektrik sistemi çalışması, jeneratör ve diğer güç kaynağı tanımlamaları ve güç kaynaklarının elektrik güç bilgileri verilmelidir. Sistemin çalışma mantığı (örneğin; otomatik anahtarlama, manuel yük atma vb.) özetlenmelidir. Ayrıca uçağın operasyonel fazlarının tarifi yapılmalıdır.

Hava araçlarında operasyonel fazlar uçaktan uçağa değişmekle beraber temel olarak aşağıdaki fazlar dokümanlarda yer alır. Bunlara ilave fazlar ya uçağın görev profilindeki ekstralara (savaş uçağı, akrobasi uçağı vb.) ya da elektrik güç sisteminin mimarisine ve güç manevralarına göre çoğaltılabilir. Müşteri ve sertifikasyon gereksinimlerine göre de ilave fazlar ortaya çıkabilir.

Fazların adlarına karşılık gelen kodlandırmada MIL-STD-7016F_3.5.3.2 referans alınabilir. Örnek fazlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Operasyonel Fazlar

<i>Fazın adı</i>	<i>Tavsiye Edilen Kod</i>	<i>İçeriği</i>
Yer Operasyonları ve Yükleme (Ground Operations and Loading)	G3	Uçağın uçuşa hazır hale getirilmesinden önceki durumdur.
Motor Çalıştırma (Engine Start)	G4	Taksiye başlama hazırlığından itibaren olan durumdur.
Taksi (Taxi)	G5	Taksi; uçağın kendi gücüyle ilk hareketinden, kalkış koşusunun başlangıcına ve inişin tamamlanmasından, motorun kapanmasına kadar olan durumdur.
Kalkış ve Tırmanış (Take-off and Climb)	G6	Kalkış koşusu ile başlayan ve uçağın dengelenerek seyir için ayarlanması ile sonlanan durumdur.
Seyir (Cruise)	G7	Uçağın düz uçuşta olduğu durumdur.

<i>Fazm adı</i>	<i>Tavsiye Edilen Kod</i>	<i>İçeriği</i>
İniş (Landing)	G9	İniş yaklaşımına özgü seyrüsefer ve gösterge ekipmanlarının çalışmasıyla başlayan ve inişin tamamlanması ile sonlanan durumdur.
Acil Durum - Jeneratör Arızası (Emergency – Generator Failure)	G10	Jeneratör kaybindan veya batarya(lar) ile çalışmaya neden olan başka bir arızadan sonra meydana gelen durumdur. Bu durumda batarya(lar) iniş için gerekli yüklerle güç sağlar.

2.1.3. Varsayımlar ve Kriterler

Elektrik yük analizi dokümanının nihai çıktısı güç kaynaklarının yeterliliğinin gösterilmesidir. Güç kaynakları temel analiz metodu anlamında ikiye ayrılabilir:

- Jeneratör analizi
- Batarya analizi

Bu çalışmada, ELA kapsamında batarya analizi inceleneceği için sadece batarya analizini etkileyecek varsayım ve kriterler ele alınmıştır.

2.1.3.1. Batarya Analizi Varsayım ve Kriterleri

Batarya analiz hesaplamalarını etkileyecek varsayım ve kriterler, standartlardan derlenmeli ve proje dinamiklerinden gelen maddeler ile birlikte listelenmelidir. Standartların analizler için belirlediği gereksinimlere uygun bir batarya analizi, analizin güvenilirliği açısından kritiktir. Aşağıda batarya analizini etkileyen standarttan derlenmiş örnek varsayım ve kriterler listelenmiştir.

- (1) Uçağın çalışmasının bekleneceği en ağır yüklenme koşulları ve operasyonel ortamın gece ve buzlanma koşullarında olduğu varsayılr (ASTM F 2490-05).
- (2) Elektrikle çalışan valfler gibi birkaç saniye içinde açılıp kapanan anlık/aralıklı yükler hesaplamalara dahil edilmez. Ancak elektrik gücü gereksiniminin temel bir değerlendirmesine varmak için, sistem gerilimini veya frekans kararlılığını veya her ikisini bozacak büyüklük ve sürede olan geçici talep/yük gereksinimlerini veya güç kaynaklarının kapasitesini kısa süreli aşan aralıklı/anlık döngüsel yükleri de dikkate almak gerekir. Dolayısıyla bu tip yüklerin hangilerinin analize dahil edilip edilmeyeceği proje dinamiklerine bağlı olarak belirlenmelidir (ASTM F 2490-05).
- (3) Bara ve ekipman arasındaki gerilim düşüşü, ekipmandaki terminal geriliminin tahmininde, normal, anormal ve acil durum çalışma koşulları altındaki bara gerilimleriyle birlikte dikkate alınmalıdır. Yani hesaplamalara eklenecek ekipman güç tüketim değerleri, ekipman terminal gerilimi üzerinden hesaplanmalıdır (ASTM F 2490-05).
- (4) Sabit güçlü yüklerde, bataryadan (örn, 20-24 V DC) çekilen akımlar, jeneratörden (örn, 28 V DC) çekilene göre daha yüksektir ve bu durum batarya ile acil uçuş koşullarını etkileyecektir. Rezistif (omik) yükler için ise, daha düşük batarya gerilimi nedeniyle çekilen akım azalacaktır. Hesaplamalarda ekipman güç tüketim değerleri dahil edilirken, ekipman karakteristikleri (rezistif, sabit akım veya sabit güçlü yük) dikkate alınmalıdır. Kullanılan çarpanlar da varsayım olarak belirtilmelidir (ASTM F 2490-05).
- (5) Jeneratör kaybı sonrası, uçuş ekibi tarafından herhangi bir manuel yük atılmasından önce 5 dakikalık bir sürenin geçeceği varsayılmaktadır. Herhangi bir otomatik yük atma işleminin ise anında gerçekleştiği varsayılmaktadır. Yani manuel atılacak yükler, sürekli çalışan bir yük dahi olsa, batarya analizinde sadece 5 dakika yüklerine dahil edilmelidir. Ancak uçuş ekibine jeneratör arızası sonrası yanıp sönen dikkat çekici bir uyarı verilmiyor ise manuel yük atma öncesi süre 10 dakika alınmalıdır (ASTM F 2490-05).
- (6) Aşağıdaki gibi ekipman çalışma süreleri için belirli aralıklar kullanılarak tablo oluşturulması hesaplamalarda kolaylık sağlayacaktır (ASTM F 2490-05).

- 5 saniye analizi: 0,3s'den uzun süren tüm yükler.
- 5 dakika analizi: 5s'den uzun süren tüm yükler
- Süreklilik analizi: 5 dk'dan uzun süren tüm yükler.

2.1.4. Batarya Analizi

ELA kapsamında batarya analizi, bataryanın gerektiğinde gerekli gücü sağlama kapasitesine sahip olup olmadığını göstermektedir.

Bir batarya kapasitesi şu şekilde ifade edilir:

(1)

Batarya kapasitesi (Ah)

$$= \text{deşarj oranı (A)} * \text{belirli bir voltaj seviyesinedeşarj süresi (h)}$$

Bu analiz, 60Ah kapasiteli bir Li-Ion batarya ve Ni-Cd batarya üzerinden örneklendirilmiştir. Aşağıda verilen analiz adımlarından 23°C'de her iki tip batarya için ayrı ayrı hesaplamalar takip edilebilir.

- (1) Uçağın tüm çalışma fazları için bu fazlarda etkin yükler listelenmeli ve her faz için toplam akım değerine ulaşılmalıdır. Yüklerin güç tüketim değerleri, ekipman karakteristikleri (rezistif, sabit akım veya sabit güçlü yük) göz önüne alınarak hesaplamalara dahil edilir. Örneğin; sürekli çalışan bir TACAN (Taktik Hava Navigasyon Sistemi, Tactical Air Navigation System) ekipmanı sürekli güç tüketim değeri 28 V DC'de 1,7A ise; jeneratör arızası durumunda, yani sistem bataryaya kaldığı durumda sistem gerilimi batarya eğrilerinden Ni-Cd batarya için 24 V, Li-ion batarya için 25,6 V olarak belirlenmiş ise;

İlgili ekipman;

- Rezistif yük (resistive) ise; güç tüketim değeri; Li-ion bataryada $1,7*25,6/28= 1,55$ A, Ni-Cd bataryada $1,7*24/28= 1,46$ A,
- Sabit güçlü yük (non-resistive/constant power) ise; güç tüketim değeri; Li-ion bataryada $1,7*28/25,6= 1,86$ A, Ni-Cd bataryada $1,7*28/24= 1,98$ A,
- Sabit akımlı yük (constant current) ise; güç tüketim değeri her iki bataryada 1,7A olarak alınmalıdır.

Örnek yük tablosu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Örnek Yük Tablosu

Ekipman	Çalışma Süresi	Ekipman Karakteristiği	Nominal Akım (A)			Ni-Cd Bataryada Çekilen Akım(A)			Li-ion Bataryada Çekilen Akım (A)			Operasyonel Fazlar		
			5s	5dk	Sürekli	5s	5dk	Sürekli	5s	5dk	Sürekli	G7 (Seyir)	G9 (İniş)	G10 (Acil Durum)
Ekipman-A	sürekli	Sabit güçlü	1,5	1,5	1,5	1,75	1,75	1,75	1,64	1,64	1,64	*	*	*
TACAN	sürekli	Sabit güçlü	3	1,7	1,7	3,50	1,98	1,98	3,28	1,86	1,86	*	*	-
Ekipman-B	sürekli	Rezistif	10	10	10	8,57	8,57	8,57	9,14	9,14	9,14	*	*	-
Ekipman-C	6 s	Rezistif	40	1,5	0	34,29	1,29	0	36,57	1,37	0	*	*	*
Ekipman-D	5 s	Rezistif	1,3	0	0	1,11	0	0	1,19	0	0	*	*	*
Diğer Yükler	sürekli	Rezistif	145	120	55	169,17	140,00	64,17	158,59	131,25	60,16	*	*	*
Toplam Yük	201	135	68	218	154	76	210	145	73	*	*	*

- (2) Hesaplamalar en kötü koşullar altında yapılacağı için belirlenen tüm varsayım ve kriterlerin işlenerek hesaplandığı, jeneratör arızası durumunda bataryadan beslenen uçuşu sürdürmek için gereken minimum seyir yükleri, G10 (Acil Durum - Jeneratör Arızası) fazı altında toplanır. Analiz metodunun basitçe anlaşılabilmesi için Tablo 2 üzerinden örnek hesaplamaya devam edilmiş ve G10 fazında aktif olan seyir

yüklerinin (örnek tablo 2'ye göre TACAN ve Ekipman-B hariç diğer tüm yüklerin 5s, 5dk, sürekli çalışma sürelerinde bataryaya kaldığı durumlarda çektiği akım değerlerine göre) toplam akım değeri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. G10 Fazı Toplam Yük Değeri

	Nominal Akım (A)			Ni-Cd Bataryada Çekilen Akım(A)			Li-ion Bataryada Çekilen Akım (A)		
	5s	5dk	Sürekli	5s	5dk	Sürekli	5s	5dk	Sürekli
G10 (Acil Durum)	188	123	57	206	143	66	198	134	62

- (3) ASTM 2490-05_6.5.6.9'a göre aksi belirtilmediği sürece, normal ortam koşullarında kullanılabilir batarya kapasitesi, nominal kapasitenin yaklaşık %72'si (*0,8*0,9)'dir. Detay veri sunmayan Ni-Cd batarya için şarj durumu (State of Charge, SOC) ve kullanım ömrü (End of Life, EoL) değeri ASTM 2490-05_6.5.6.9'a uygun hesaplamalara dahil edilmiş olup, Li-İon batarya için bu çalışma kapsamına alınan bataryanın batarya eğrileri (Deşarj Karakterizasyonu/Aşırı Sıcaklık Gerilimi, Discharge Characterization/Voltage over Temperature) üzerinden belirlenmiştir.

(2)

Kullanılabilir Batarya Kapasitesi(Ah)

$$= \text{Nominal Kapasite(Ah)} * \text{Şarj Durumu (SoC)} * \text{Kullanım Ömrü(EoL)}$$

- 60Ah Ni-Cd batarya; SoC: %80 EoL: %90;

Kullanılabilir batarya kapasitesi= 60Ah * 0,8 * 0,9 = 43,2 Ah = 43,2*60 = 2592 Amin (Amper dakika)

- 60Ah Li-ion batarya; SoC: %95, EoL: %90;

Kullanılabilir batarya kapasitesi= 60Ah * 0,95 * 0,9 = 51,3Ah = 51,3*60 = 3078 Amin (Amper dakika) olarak hesaplanır.

- (4) Manuel atılacak yüklerin 5 dakika içerisinde pilot tarafından atılacağı varsayımı yapılmıştır. Bu yükler sürekli çalışan bir yük dahi olsa, batarya analizinde sadece 5 dakika yüklerine dahil edilmesi gerektiğini belirtmiştik. Hesaplamayı örnek yük tablosu üzerinden yürüterek basitleştirebilmek adına; sürekli çalışan manuel atılacak yük olmadığı kabulü yapılarak Tablo 3 değerleri kullanılmıştır. (Normal şartlarda sürekli çalışan manuel atılacak yüklerin akım değeri sürekli çalışan seyir yüklerinden çıkarılarak 5 dakika seyir yüklerine dahil edilmelidir.) Tablo 3' e göre;

- 60Ah Ni-Cd batarya için;

5 dakika seyir yükleri (5min Cruise Load) = 143A'dır.

- 60Ah Li-ion batarya için;

5 dakika seyir yükleri (5min Cruise Load) = 134A'dır.

- (5) İniş için gereken yüklerin (İniş yükleri, Landing Load) toplam akım değeri; 55A olsun. (Yük tablosu bu çalışma kapsamında detaylandırılmadığından ve bu detaya girilmemesi minör etki yaratacağından iniş için gereken yüklerin her iki batarya tipi için aynı akım çektiği varsayımı ile hesaplamalara devam edilmiştir.) Hesaplamalarda iniş süresi 5 dakika olarak kabul edilmiştir.

- (6) Tablo 3' e göre her iki tip batarya için ayrı ayrı sürekli seyir süreleri; (batarya analizinde çalışma süresi 5 saniye olan yükler hesaplamalara dahil edilmez. G10 fazında yüklerin 5 dakika nominal akım değerleri (4) numaralı adımda belirtildiği şekilde hesaplamalara dahil edilmiş olup, bu adımda G10 fazında sürekli seyir süresi hesaplanmaktadır.)

(3)

Sürekli Seyir Süresi(dk)

$$= \frac{\text{Kullanılabilir Batarya Kapasitesi(Amper dakika)} - 5dk \text{ Seyir Yükleri}(A) * 5dk - \text{İniş Yükleri}(A) * 5dk}{\text{Sürekli Seyir Yükleri}}$$

➤ 60Ah Ni-Cd batarya için;

Sürekli Seyir Yüğü (Continious Cruise Load) = 66A (Tablo 3' e göre)

Sürekli Seyir Süresi (dk) = (2592 Adk – 143A*5dk – 55A*5dk)/66A =24,3 dk 'dır.

➤ 60Ah Li-ion batarya için;

Sürekli Seyir Yüğü (Continious Cruise Load) = 62A (Tablo 3' e göre)

Sürekli Seyir Süresi (dk) = (3078 Adk – 134A*5dk – 55A*5dk)/62A =34,4 dk 'dır.

(7) Her iki tip batarya için ayrı ayrı batarya dayanım süresi;

(4)

Batarya Dayanım Süresi (dk)

$$= \text{Sürekli Seyir Süresi (dk)} + 5dk \text{ Seyir Süresi} + 5dk \text{ iniş süresi}$$

➤ 60Ah Ni-Cd batarya için;

Batarya Süresi = 24,3dk + 5 + 5 = 34,3dk 'dır.

➤ 60Ah Li-Ion batarya için;

Batarya Süresi = 34,4dk + 5 + 5 = 44,4dk 'dır.

Bataryanın iniş için gerekli sistem yüklerini minimum 30 dakika enerjilendirmesi gerektiğini belirtmiştik. Bu örnek veriler üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda her iki tip bataryanın uygunluğunu teyit edebiliyoruz. Ancak bu örneğin analiz metodunun anlaşılabilmesi için verilmiş çok basit bir hesaplama örneği olduğu unutulmamalıdır.

3. SONUÇ

Elektrik yük analizi, çeşitli güç kaynaklarının analizde tanımlandığı gibi en ağır çalışma koşullarında, normal ve anormal çalışmayı sürdüren, gerekli ekipmanlara elektrik gücünü tam olarak sağlayabildiğini doğrulayan durumları içermelidir. Güç kaynaklarının sınırlarının aşılmadığı ELA içerisinde onaylanmalıdır.

Batarya analizinde batarya verilerinin kullanılması ve analizin daha doğru varsayım ve kriterler ile yapılması kritiktir. Hava araçları için yazılmış tüm standartlar ELA'yı etkiler gereksinimler ışığında taranmalıdır. Kaynak alınan tepe dokümanların kapsamı ve sınırlamalarını aşan bir varsayımda bulunulamaz. Fakat kaynak alınan tepe dokümanların varsayımlarını kapsayan daha kötü bir koşul referans alınabilir. Bu durumun sınırları projenin dinamiklerine bağlıdır.

Yukarıda basit bir örnek ile tariflenen analiz metodu, lityum-iyon bataryaların en büyük avantajlarından biri olan hem uçuş öncesi hem uçuş esnasında hem de uçuş sonrasında detay veri sunma özelliği kullanılarak daha güvenilir hale getirilmelidir.

Bu çalışmada Elektrik Yük Analizi kapsamında Ni-Cd ve Li-ion batarya analizi ayrı ayrı yapılarak, uçağın bataryaya kaldığı durumda iniş için pilota sağlanabilecek süre olan batarya dayanım süreleri kıyaslanmıştır. Aynı yükler altında eş kapasiteli Ni-Cd ve Li-Ion bataryada batarya dayanım süresinin Ni-Cd bataryaya nazaran Li-ion bataryada daha yüksek olduğu görülmektedir.

4. KAYNAKÇA

- Özcan ÖF. (2021). Karadağ T., Altuğ M., Özgüven Ö., Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması, Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 8(2), 276-298, (2021).
- Bengi K. (2009). Uçak Elektrik Güç Sistemleri Teknolojileri ve Eğilimleri, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi ve Fuarı Bildirileri, <https://www.emo.org.tr>
- Bernard, P., Lippert, M.(2015). ‘Nickel–cadmium and nickel–metal hydride battery energy storage’, in Moseley, P.T., Garche, J. (Eds.): ‘Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing’ (Elsevier, Amsterdam,2015), pp. 223–251.
- Tarascon, J.M., Armand, M. (2001). ‘Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries’, Nature, 2001, 414, (6861), pp. 359–367
- Mohd Tariq, Ali I. Maswood, Chandana Jayampathi Gajanayake, Amit Kumar GuptaI (2017). Aircraft Batteries: Current Trend Towards More Electric Aircraft, IET Electr. Syst. Transp., 2017, Vol. 7 Iss. 2, pp. 93-103.
- Oğuzhan Vıçıl (2011). Yeni Nesil Lityum-İyon Pil Teknolojileri, <https://services.tubitak.gov.tr>, TÜBİTAK, Bilim ve Teknik, Şubat 2011
- ASTM F 2490-05 (2007). Standart Guide for Aircraft Electrical Load and Power Source Capacity Analysis.
- MIL-E-7016F (1976). Military Specification: Electric Load and Power Source Capacity, Aircraft, Analysis of,1976.
- David G. Vutetakı and John B. Timmons (2008). A Comparison of Lithium-İon and Lead-Acid Aircraft Batteries; SAE Technical Paper Series; 2008-01-2875.
- Hector Silberman, William R. Johnson; Minimum Operation Performance Standart for Aircraft Batteries; SAE Technical Paper Series; 2008-01-2906.
- Matthew Clarke, Juan J. Alonso (2021). Lithium-İon Battery Modeling for Aerospace Applications; Journal of Aircraft; 2021



YENİLENEBİLİR ENERJİ UYGULAMALARI İÇİN FOTOVOLTAİK PANEL BESLEMELİ KADEMELİ YÜKSELTEN LUO DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

Ahmet GANI¹

¹Kayseri Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kayseri, Türkiye.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-6066>

Özet

Doğru akım-doğru akım (DA-DA) güç dönüştürücüleri farklı güç uygulamaları için farklı gerilim seviyeleri sunabildikleri için yenilenebilir enerji üretim sistemlerinde önemli bir konuma sahiptir. Güneş enerjisi santrallerinde fotovoltaik (FV) panellerden elde edilen gücün yüke aktarımı için DA-DA güç dönüştürücüleri kullanılır. Genel olarak azaltan, yükselten veya azaltan-yükselten gibi klasik DA-DA güç dönüştürücüleri basit yapıları nedeniyle tercih edilir. Ancak, parazitik bileşenlerin varlığı, bobin manyetik doygunluğu, diyotlar ve güç anahtarları nedeniyle sınırlı gerilim transfer kazancı gibi çeşitli sorunlara da neden olabilirler. Dahası, klasik güç dönüştürücülerindeki görev oranı, istenen çıkış gerilimi artışı nedeniyle önemli ölçüde artar ve bu da dönüştürücü için daha yüksek anahtarlama kaybına neden olur. Kademeli yükselten Luo güç dönüştürücüleri klasik güç dönüştürücülerinin dezavantajlarının üstesinden gelmek için kullanılabilir. Modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo güç dönüştürücüsü yenilenebilir enerji uygulamaları için kademeli şekilde yüksek gerilim kazancı sağlar. Modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo güç dönüştürücüsü, akım ve gerilim dalgalanmalarını azaltır ve diğer klasik DA-DA güç dönüştürücülerine kıyasla düşük anahtarlama elemanı kaybı, yüksek çıkış gerilimi ve yüksek güç dönüştürme verimliliği sağlar. FV panellerin çıkış gerilimleri düşüktür. FV panellerin çıkış gerilimlerini artırmak için seri bağlanmaları gerekir. Seri bağlama maliyeti artırmaktadır. Bu çalışmada, düşük çıkış gerilimine sahip bir FV panelin çıkış gerilimini daha yüksek gerilim seviyelerine çıkarmak için modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli bir Luo güç dönüştürücü tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, FV panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo güç dönüştürücüsü Matlab/Simulink benzetim ortamında modellenmiştir. FV panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo güç dönüştürücüsü standart test koşulları altında (1000 W/m² güneş ışınımı ve 25 °C panel sıcaklığı) sabit görev oranı ve yük ile analiz edilmiştir. Benzetim çalışmasının bulguları, FV panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo güç dönüştürücü topolojisinin yenilenebilir enerji uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel, modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü, yenilenebilir enerji uygulamaları

DESIGN OF PHOTOVOLTAIC PANEL-FED STEP-UP LUO CONVERTER FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS

Abstract

Direct current-direct current (DC-DC) power converters have an important position in renewable energy production systems because they can provide different voltage levels for different power applications. DC-DC power converters are used to transfer the power obtained from photovoltaic (PV) panels to the load in solar power plants. In general, classical DC-DC power converters such as step-down, step-up or step-down-step-up are preferred due to their simple structures. However, they can also cause various problems such as limited voltage transfer gain due to the presence of parasitic components, coil magnetic saturation, diodes and power switches. Moreover, the duty ratio in classical power converters increases significantly due to the desired output voltage increase, which results in higher switching loss for the converter. Step-up Luo power converters can be used to overcome the disadvantages of classical power converters. The modified positive voltage-lift Luo power converter provides high voltage gain in a step-up manner for renewable energy applications. The modified positive voltage-lift Luo power converter reduces current and voltage ripple and provides low switching element loss, high output voltage and high power conversion efficiency compared to other classical

DC-DC power converters. The output voltages of PV panels are low. PV panels need to be connected in series to increase their output voltage. Series connection increases the cost. In this study, it is aimed to design a modified positive voltage-lift Luo power converter to increase the output voltage of a PV panel with low output voltage to higher voltage levels. For this purpose, the PV panel fed modified positive voltage-lift Luo power converter is modelled in MATLAB/Simulink simulation environment. The PV panel fed modified positive voltage-lift Luo power converter is analysed under standard test conditions (1000 W/m² solar irradiance and 25 °C panel temperature) with fixed duty ratio and load. The findings of the simulation study showed that the PV panel fed modified positive voltage-lift Luo power converter topology is suitable for renewable energy applications.

Keywords: Photovoltaic panel, the modified positive voltage-lift Luo converter, renewable energy applications

Giriş

Güç elektroniğinde büyük öneme sahip DA-DA dönüştürücüler yenilenebilir enerji kaynakları ve yük arasında enerji dönüşüm elemanı olarak kullanılırlar. (Özdemir, 2018). Literatürde çeşitli DA-DA dönüştürücü topolojileri bulunmaktadır. En yaygın kullanılan dönüştürücü topolojileri arasında geleneksel DA-DA dönüştürücüler yer almaktadır (Yılmaz ve ark., 2018) Geleneksel DA-DA dönüştürücüler genellikle devre modellerindeki parazitik elemanlar nedeniyle sınırlı bir çıkış gerilimi ve güç dönüşüm verimliliği sağlarlar. Bu nedenle, bu sorunu ortadan kaldırmak için yüksek gerilim kazançlı DA-DA dönüştürücüler kullanılır (He ve Luo, 2005). Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde yenilenebilir enerji uygulamaları için tasarlanan fotovoltaiik panel beslemeli kademeli gerilim yükselten Luo dönüştürücüler ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bazıları tablo 1 'de verilmiştir.

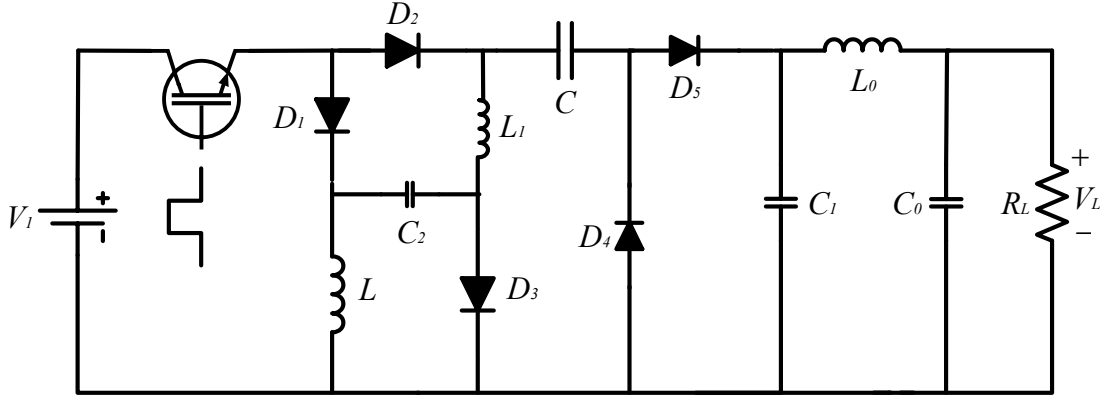
Tablo 1. Fotovoltaiik panel beslemeli kademeli gerilim yükselten Luo dönüştürücüler ile ilgili çalışmalar

Çalışmalar	Dönüştürücü Tipi	Gerilim Kazancı
(Keçecioglu ve ark., 2021)	Modifiye Edilmiş Pozitif Gerilim Yükseltmeli Luo	5.02
(Hussein ve ark., 2022)	Modifiye Edilmiş Süper Gerilim Yükseltmeli Luo	8
(Pansare, 2017)	Modifiye Edilmiş Pozitif Gerilim Yükseltmeli Luo	5.55

Yukarıda bahsedilen çalışmalar genel olarak özetlenecek olursa farklı gerilim kazançlarında maksimum güç noktası takipçili fotovoltaiik panel beslemeli kademeli gerilim yükselten Luo dönüştürücüler tasarlanmıştır. Bu çalışmada ise daha önceki çalışmalardan farklı olarak tasarlanan modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü ile sabit görev oranında daha yüksek gerilim kazancı elde edilmiştir. Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde ifade edilebilir. İkinci bölüm materyal ve metot kısmında modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü tasarımı verilmiştir. Üçüncü bölüm bulgular kısmında benzetim çalışmaları verilmiştir. Dördüncü bölüm sonuçlar kısmında ise benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlara göre genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Materyal ve Metot

Modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü sürekli iletim modunda çalışırken analiz edilmektedir. Sürekli iletim modunda analiz yapılırken devre elemanlarının ideal olduğu düşünülmüştür. Sürekli iletim modu analizi devrede anahtarlama devre elemanının kapalı ve açık durumu için gerçekleştirilmektedir. Devre şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü

Modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü sürekli iletim modunda çalışırken indüktörlerdeki akım değişimleri ve kapasitörlerdeki gerilim değişimleri esas alınarak eleman sınır değerleri denklem (1-8) kullanılarak hesaplanmaktadır.

L indüktöründen geçen akımın değişim oranı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\zeta = \frac{\Delta I_L / 2}{I_L} = \frac{R_L k}{M^2 f L} \quad (1)$$

Benzer şekilde L_1 indüktörü için değişim oranı şu şekilde verilir:

$$\zeta_1 = \frac{\Delta I_{L_1} / 2}{I_{L_1}} = \frac{R_L k}{M^2 f L_1} \quad (2)$$

C kondansatörü üzerindeki gerilimin değişim oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma = \frac{\Delta V_C / 2}{V_C} = \frac{1}{f C R_L (1 + k)} \quad (3)$$

Benzer şekilde C_1 kondansatörü için değişim oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta V_{C_1} / 2}{V_{C_1}} = \frac{1}{f C_1 R_L M} \quad (4)$$

C_2 kondansatörü için değişim oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_2 = \frac{\Delta V_{C_2} / 2}{V_{C_2}} = \frac{M}{2 f C_2 R_L} \quad (5)$$

L_0 indüktöründen geçen akımın değişim oranı şu şekilde verilir:

$$\zeta_0 = \frac{\Delta I_{L_0} / 2}{I_{L_0}} = \frac{1}{8 f^2 C_1 M L_0} \quad (6)$$

C_0 kondansatörü üzerindeki gerilimin değişim oranı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_0 = \frac{\Delta V_{C_0} / 2}{V_{C_0}} = \frac{1}{64 R_L M f^3 L_0 C_0 C_1} \quad (7)$$

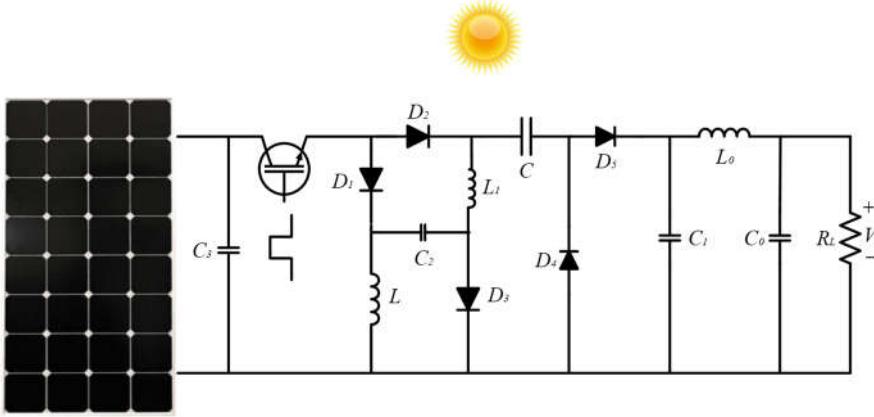
Ve son olarak da dönüştürücünün gerilim kazancı aşağıdaki gibi verilebilir:

$$M = \frac{V_L}{V_1} = \frac{2}{1-k} \quad (8)$$

Burada k dönüştürücü görev oranını temsil etmektedir (Keçecioglu,2019).

Bulgular

Benzetim çalışmalarında Matlab/Simulink programının 2024b lisanslı versiyonu kullanılmıştır. Çalışmanın benzetim süresi 1s olup örnekleme zamanı $100\mu s$ seçilmiştir. Fotovoltaik panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü şekil 2’de verilmiştir.



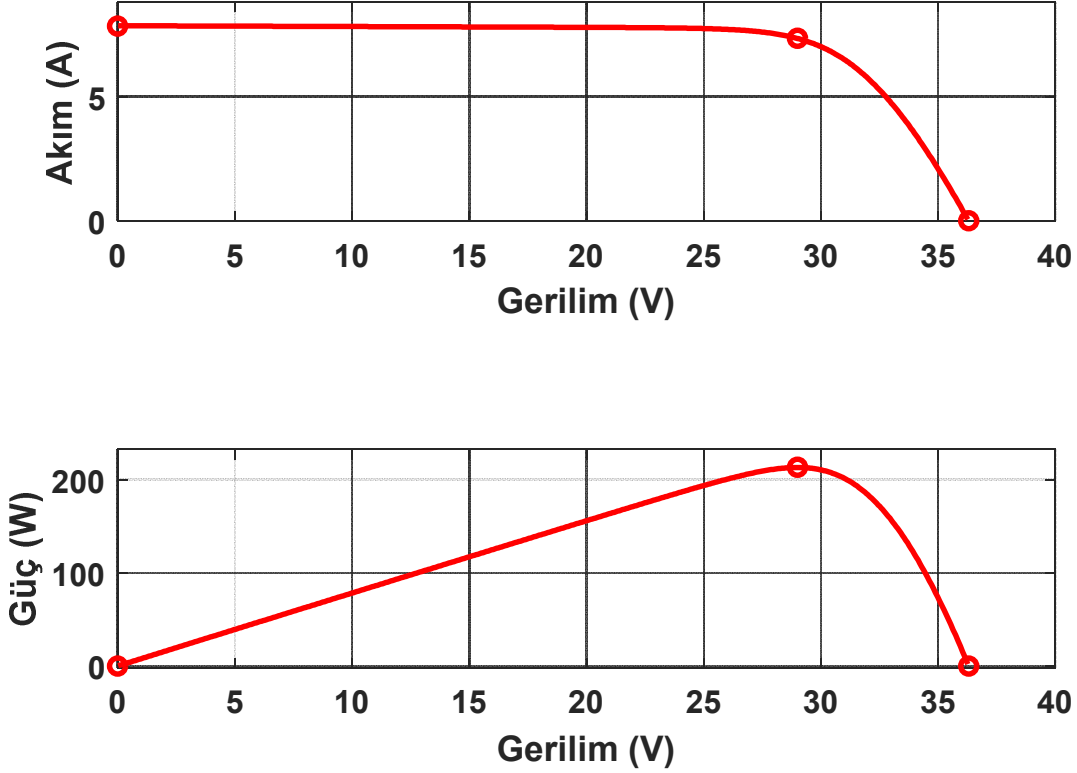
Şekil 2. Fotovoltaik panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü

Benzetim çalışmaları için belirlenen ve seçilen modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü eleman değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü için belirlenen ve seçilen değerler

Belirlenen değerler		
Giriş Gerilimi	V_{FV}	35.8V
Çıkış Gerilimi	V_L	400V
Çıkış Akımı	I_0	0.052A
Yük Direnci	R_L	7.5k Ω
Güç	P	21.33W
Anahtarlama Frekansı	f	40Khz
C_0, C, C_L, C_2 kondansatörleri üzerindeki gerilimlerin dalgalılık oranları	$\sigma_0, \sigma, \sigma_1, \sigma_2$	%1
L_0, L, L_1 indüktörlerinden akan akımların dalgalılık oranları	ζ_0, ζ, ζ_1	%20
Verim	η	%75.39
Gerilim Kazancı	M	11.17
Seçilen Değerler		
İndüktör	L	10mH
İndüktör	L_0	10mH
İndüktör	L_1	10mH
Kapasitör	C_0	10 μ F
Kapasitör	C	100 μ F
Kapasitör	C_1	10 μ F
Kapasitör	C_2	470 μ F
Kapasitör	C_3	150 μ F

Fotovoltaik panelden çekilen akım ve alınan gerilim ortam şartlarına bağlıdır. Bu çalışmada fotovoltaik panel standart test koşullarında (1000 W/m^2 ışınım ve 25°C sıcaklık) çalıştırılmıştır. Fotovoltaik panelin standart test koşullarındaki akım-gerilim ve güç gerilim karakteristikleri şekil 3'te verilmiştir.



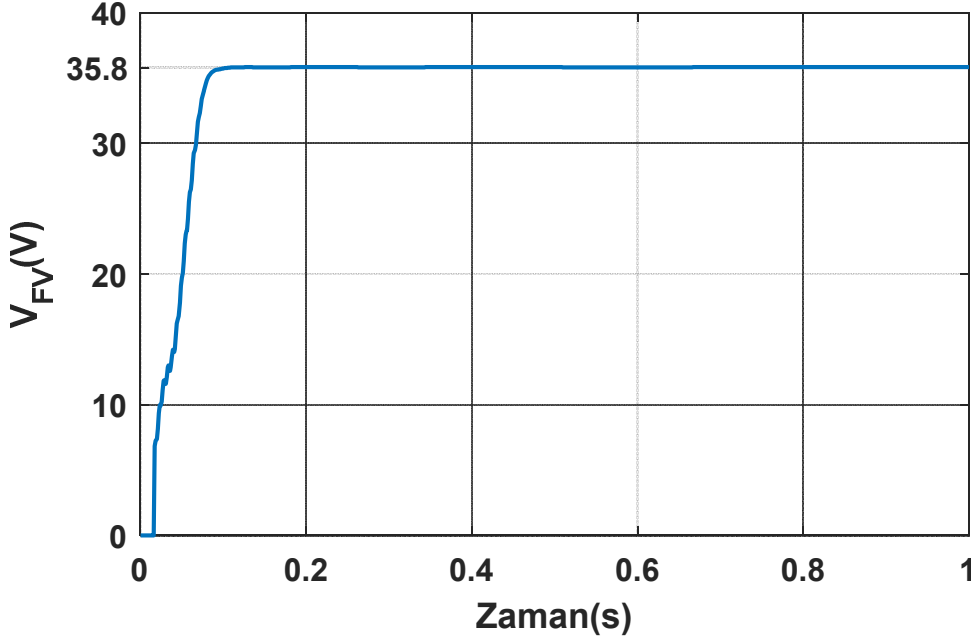
Şekil 3. Fotovoltaik panelin standart test koşullarındaki akım-gerilim ve güç gerilim karakteristikleri

Şekil 3'te görüldüğü gibi fotovoltaik panelin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri doğrusal değildir ve farklı çalışma noktaları vardır. Çalışmada kullanılan fotovoltaik panelin etiket değerleri tablo 3'te verilmiştir.

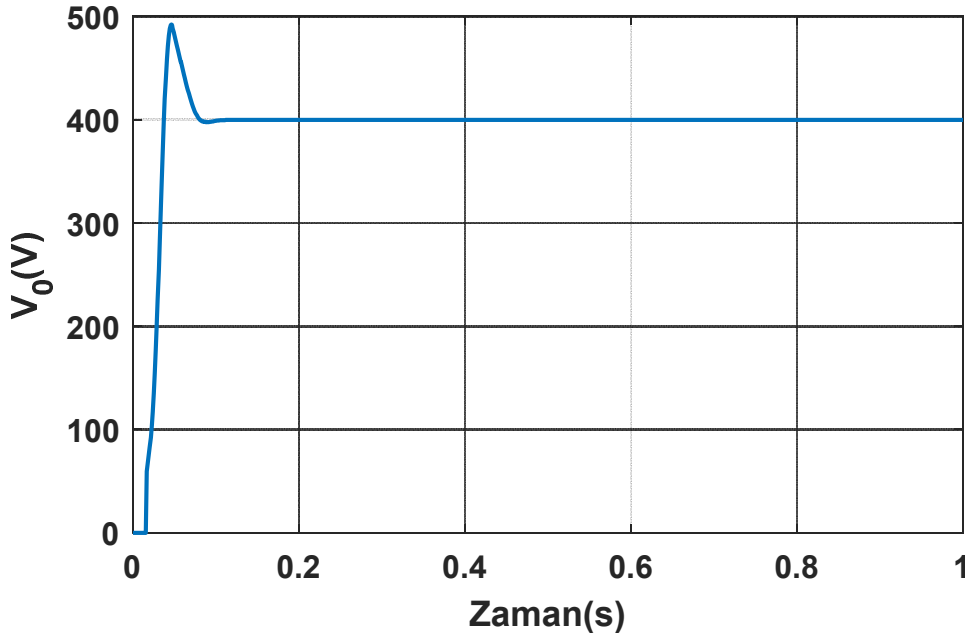
Tablo 3. Fotovoltaik panelin etiket değerleri

Panel Tipi	Polikristal
Panel Model	1STH-215-P
Maksimum Çalışma Noktası Gerilimi	29V
Maksimum Çalışma Noktası Akımı	7.35A
Açık Devre Gerilimi	36.3V
Kısa Devre Akımı	7.84A
STK için Maksimum Güç	213.15W
Panel Verimi	%13.7
Bağlantı Tipi	1seri- 1paralel

Şekil 4 ve 5'te ise sabit görev oranında (0.822) fotovoltaik panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4. Sabit görev oranında (0.822) fotovoltaik panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücünün giriş gerilimi



Şekil 5. Sabit görev oranında (0.822) fotovoltaik panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücünün çıkış gerilimi

Şekil 4-5 incelendiğinde standart test koşullarında sabit görev oranında çalışan fotovoltaik panel beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücünün giriş ve çıkış geriliminin tasarım için belirlenen değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuçlar

Bu çalışmada düşük çıkış gerilimine sahip fotovoltaik panel için standart test koşullarında modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücü standart test koşullarında

11.17 kat yüksek gerilim kazancıyla sabit görev oranında kararlı ve dayanıklı sonuçlar vermiştir. Gelecek çalışmalarda çift yönlü yüksek kazançlı dönüştürücü devrelerinin tasarımı hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- Hussein, H.A.K & Motlak, H.J. (2022). Improving the design of super-lift Luo converter using hybrid switching capacitor-inductor cell for PV system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 25(2), 710-720. DOI:10.11591/ijeecs.v25.i2.pp710-720.
- He, Y & Luo, F.L. (2005). Analysis of Luo converters with voltage-lift circuit. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 152(5), 1239-1252.
- Kececioglu, O.F. Gani, A. & Şekkeli, M. (2021). Improved hybrid intelligent controller design for MPPT of stand-alone PV System. *Turkish Journal of Engineering*, 5(1), 20-28. DOI: [10.31127/tuje.652229](https://doi.org/10.31127/tuje.652229).
- Kececioglu, O. F. (2019). Robust control of high gain DC-DC converter using Type-2 fuzzy neural network controller for MPPT. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(1),941-951. DOI: 10.3233/JIFS-181770.
- Özdemir L. (2018). PEM tipi yakıt pili için yüksek kazançlı DA-DA dönüştürücü tasarımı ve benzetimi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,78s, Kahramanmaraş.
- Pansare, C. Sharma, S. K. Jain, C. & Saxena, R. (2017). Analysis of a modified positive output Luo converter and its application to solar PV system. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-6.
- Yilmaz, U. Kircay, A. Borekci, S. (2018). PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81(1), pp.994-1001. DOI: [10.1016/j.rser.2017.08.048](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.048).



SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ UYGULAMALARI İÇİN YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

Ahmet GANI¹

¹Kayseri Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kayseri, Türkiye.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-6066>

Özet

Güneş panelleri güne ve mevsimlere göre değişiklik gösteren ışınım miktarına bağlı olarak elektrik enerjisi üretirler. Aynı şekilde bir rüzgâr türbininin üretebileceği elektrik enerjisi de rüzgâr durumuna dolayısıyla da ortam şartlarına bağlıdır. Yakıt hücreleri ihtiyaç olan her yerde sürekli biçimde ortam koşullarına bağlı olmadan enerji üretimine katkı sağlayabilmektedirler. Dolayısıyla sürdürülebilir enerji uygulamaları için önemlidirler. Ortam şartlarına bağlı olmadan ve sürekli biçimde enerji üretimi yapan yakıt hücreleri, dünyada olduğu gibi ülkemizde de giderek önemli hale gelecek ve geniş uygulama alanlarına sahip olacaktır. Yakıt hücreleri elektro-kimyasal olaylar ile hidrojeni kullanarak elektrik enerjisi üretirler. Hidrojen endüstriyel uygulamalarda kullanılabilen, elektrik enerjisi üretilebilen ve çevre dostu bir yakıt türüdür. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının sonucunda ortaya çıkan ürün sadece su ve su buharı olmaktadır. Yakıt hücrelerinde kimyasal enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Yakıt hücreleri içinde proton değişim zarlı (PEM) yakıt hücreleri ön plana çıkmaktadır. PEM yakıt hücreleri düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güçte çalıştırılabilmesi ve yüksek enerji verimliliklerinden dolayı özellikle elektrikli/hibrit araçlarda potansiyel bir güç kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Yakıt hücrelerinin tek hücresinden elde edilen gerilimin düşük olması nedeniyle seri bağlantı yapıları geliştirilmiştir ve bu sayede istenilen çıkış gerilim değerlerine ulaşılmaktadır. Ancak bu durum hem boyutu hem de maliyeti arttırdığından yakıt hücresinin çıkışından istenilen gerilimin elde edilmesi için çeşitli doğru akım (DA) dönüştürücü devreleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada sürdürülebilir enerji kaynaklarından olan 6kW nominal güçte çalışan PEM yakıt hücresi için yükselten bir DA-DA dönüştürücüsü Matlab/Simulink benzetim ortamında tasarlanmıştır. Benzetim çalışmaları PEM yakıt hücresi için nominal çalışma şartlarında sabit görev oranı ve yük ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar PEM yakıt hücresinin nominal çalışma şartları için tasarlanan yükselten DA-DA dönüştürücüsünün düşük çıkış gerilimine sahip PEM yakıt hücresi ile sürdürülebilir enerji uygulamalarında birlikte etkin bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir enerji, PEM yakıt hücresi, Yükselten dönüştürücü

DESIGN OF BOOST CONVERTER FOR SUSTAINABLE ENERGY APPLICATIONS

Abstract

Solar panels produce electrical energy depending on the amount of radiation that varies according to the day and season. Similarly, the electrical energy that a wind turbine can produce depends on the wind conditions and therefore the ambient conditions. Fuel cells can contribute to energy production wherever needed, continuously, without being dependent on ambient conditions. Therefore, they are important for sustainable energy applications. Fuel cells, which produce energy continuously and without being dependent on ambient conditions, will become increasingly important in our country as well as in the world and will have wide application areas. Fuel cells produce electrical energy using hydrogen through electrochemical events. Hydrogen is an environmentally friendly fuel type that can be used in industrial applications, can produce electrical energy. The product that emerges as a result of using hydrogen as fuel is only water and water vapor. Chemical energy is directly converted into electrical energy in fuel cells. Proton exchange membrane (PEM) fuel cells stand out among fuel cells. PEM fuel cells emerge as a potential power source especially in electric/hybrid vehicles due to their low operating temperatures, high power operation and high energy efficiency. Due to the low voltage obtained from a single cell of fuel cells, serial connection structures have been developed and thus the desired output voltage values can be achieved. However, since this situation

increases both the size and the cost, various direct current (DC) converter circuits have been developed to obtain the desired voltage from the output of the fuel cell. In this study, a DC-DC boost converter for a PEM fuel cell operating at a nominal power of 6 kW, which is one of the sustainable energy sources, was designed in the Matlab/Simulink simulation environment. Simulation studies were carried out with a fixed duty ratio and load under nominal operating conditions for the PEM fuel cell. The results obtained from the simulation study confirmed that the DC-DC boost converter designed for the nominal operating conditions of the PEM fuel cell can be effectively used together with the PEM fuel cell with low output voltage in sustainable energy applications.

Keywords: Sustainable energy, PEM fuel cell, Boost converter

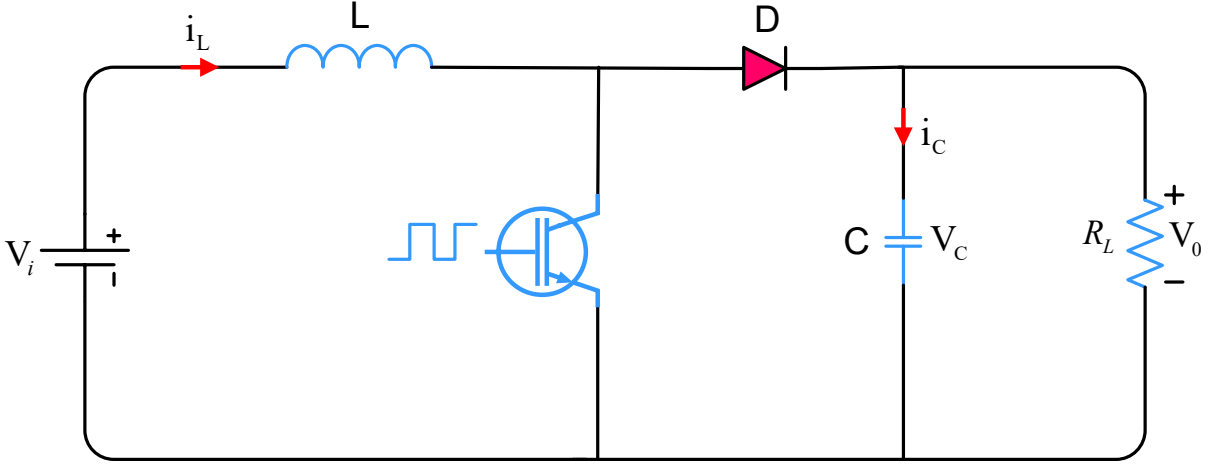
Giriş

Günümüzdeki sürdürülebilir enerji kaynaklarının en önemli dezavantajı, çıkış gerilimlerinin düşük seviyelerde olmasıdır. Bu sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri de PEM yakıt hücresidir (Kart, 2021). Bu çalışmada PEM yakıt hücresinin çıkış gerilimini yükseltmek için yükselten doğru akım (DA) dönüştürücü önerilmiştir. Çalışma literatürü incelendiğinde sürdürülebilir enerji uygulamalarında kullanılan PEM yakıt hücresi için tasarlanan DA dönüştürücüler ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Karaarslan ve Doğan yaptıkları çalışmada PEM yakıt hücresi için bir azaltan dönüştürücü tasarlamışlardır. (Karaarslan ve Doğan, 2017). Özkara ve ark. yaptıkları çalışmada PEM yakıt hücresiyle beslenen izoleli geri dönüşlü dönüştürücünün tasarımını gerçekleştirmişlerdir (Özkara ve ark., 2017). Bilhan yaptığı çalışmada yakıt hücresi uygulamaları için kademeli DA dönüştürücü ve klasik yükselten DA dönüştürücü devre yapılarını önermiştir (Bilhan, 2020). Gani yaptığı çalışmada PEM yakıt hücresinin ömrünü uzatmak için süper gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü önermiştir (Gani,2023). Yıldız yaptığı çalışmada PEM yakıt hücresi için paralel yapılı çift anahtarlı düşürücü yükseltici DA dönüştürücü tasarlamıştır (Yıldız,2016). Özdemir ve ark. yaptığı çalışmada elektrikli araçlarda kullanılmak üzere PEM yakıt hücresi beslemeli modifiye edilmiş pozitif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü önermişlerdir. (Özdemir ve ark., 2019). Kocaarslan ve ark. yaptıkları çalışmada PEM yakıt hücresi için kademeli yükselten dönüştürücü tasarlamışlardır (Kocaarslan ve ark., 2019). Kart ve ark. yaptıkları çalışmada PEM yakıt hücresi için tek anahtarlı kademeli yükselten dönüştürücü tasarlamışlardır. (Kart ve ark.,2024).

Yukarıda bahsedilen çalışmalar genel olarak özetlenecek olursa yakıt hücreleri için farklı DA dönüştürücü yapıları tasarlanmıştır. Bu çalışmada ise araştırma literatüründeki çalışmalardan farklı olarak basit tasarım yapısı ve uygulanabilirliğinden dolayı klasik yükselten DA dönüştürücü tasarımına odaklanılmıştır. Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde ifade edilebilir. İkinci bölüm materyal ve metot kısmında klasik yükselten dönüştürücünün analizi verilmiştir. Üçüncü bölüm bulgular kısmında benzetim çalışmaları verilmiştir. Dördüncü bölüm sonuçlar kısmında ise benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlara göre genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Materyal ve Metot

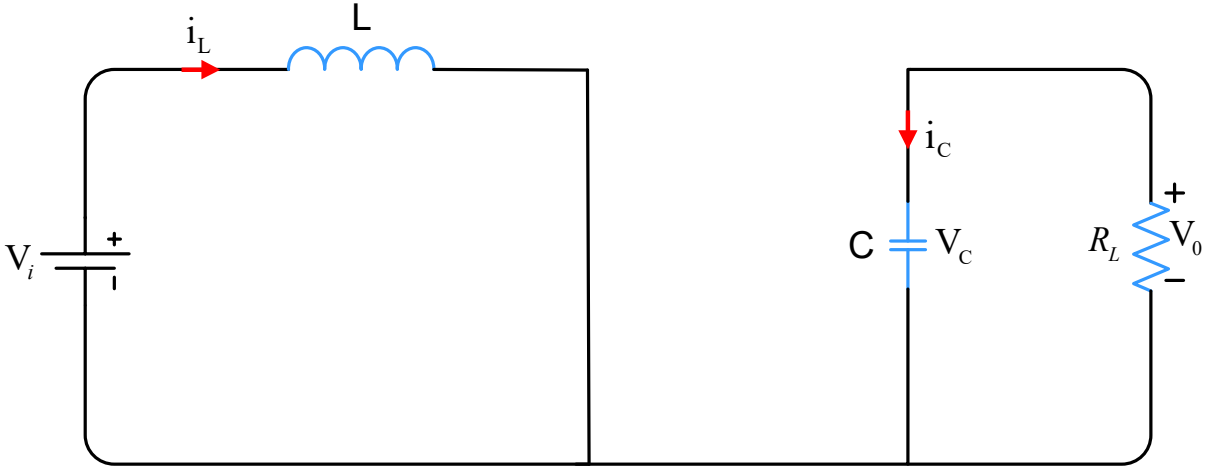
Yükselten DA dönüştürücü devre yapısı, girişindeki gerilim değerini çıkışında daha yüksek bir gerilim değerine getiren devre yapılarıdır (Rashid, 2011). Devre yapısı yarı iletken anahtarlama elemanı, indüktör, kondansatör, diyot ve yük direncinden oluşmaktadır (Keçecioglu ve ark. 2019). Yükselten DA dönüştürücü devresinin analizi, yarı iletken anahtarlama elemanının iletim ve kesim durumları dikkate alınarak yapılmaktadır (Gani ve Şekkel 2023). Şekil 1'de yükselten DA dönüştürücünün temel devre modeli verilmiştir.



Şekil 1. Yükselten DA dönüştürücünün temel devre modeli

2.1 Yarı İletken Anahtarın İletimde Olma Durumu

Yarı iletken anahtarın iletim durumu için yükselten DA dönüştürücünün eşdeğer devresi şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Yarı iletken anahtarın iletimde olma durumu

İlk olarak Şekil 2'de verilen yarı iletken anahtarın iletim durumu analiz edildiğinde; dönüştürücünün giriş gerilimi ile indüktör üzerindeki gerilim birbirine eşit olur ve denklem (1) ile ifade edilebilir:

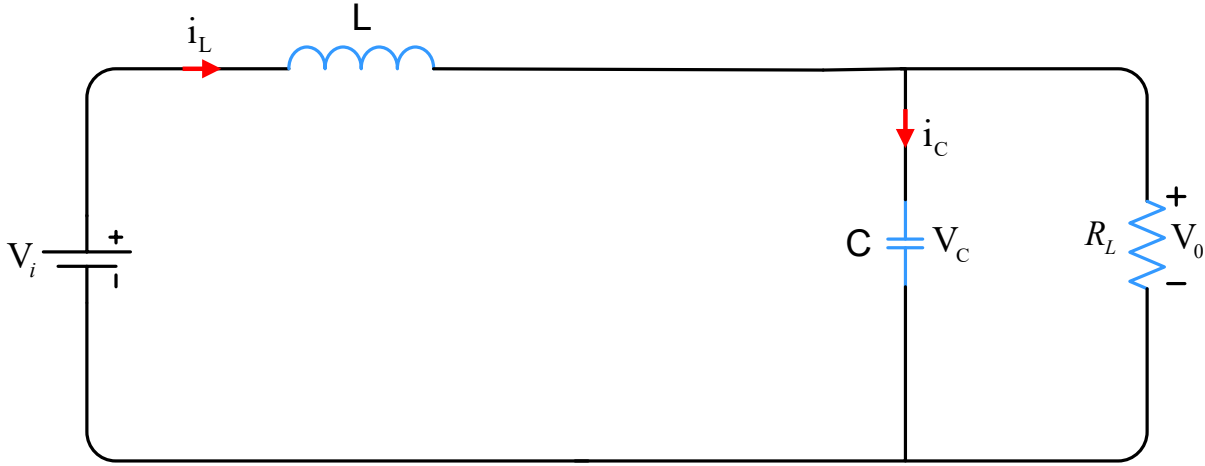
$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = V_i \quad (1)$$

Burada; V_i , giriş gerilimi ve di_L/dt , ise indüktör üzerinden geçen akımın değişimidir. İndüktör akımı değişimi denklem 2'de verilmiştir.

$$\Delta i_L = \frac{V_i dT}{L} \quad (2)$$

2.2 Yarı İletken Anahtarın Kesimde Olma Durumu

Yarı iletken anahtarın kesimde olma durumunun eşdeğer devresi şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Yarı iletken anahtarın kesimde olma durumu

Şekil 3’de verilen yarı iletken anahtarın kesim durumu için ilk olarak gerilimler arasındaki ifade aşağıdaki gibidir:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_i - V_0 \quad (3)$$

Burada; V_L , indüktör üzerindeki gerilimi, V_i giriş gerilimini ve V_0 ise çıkış gerilimini göstermektedir. İndüktör üzerinden geçen akımın değişimi ise aşağıdaki denklem ile elde edilebilir:

$$\Delta i_L = \frac{(V_i - V_0)(1 - d)T}{L} \quad (4)$$

Burada; d dönüştürücünün görev oranıdır. Yükselten DA dönüştürücü yapısının kararlı çalışma durumu düşünülürse iletim ve kesim durumlarında indüktör üzerinden geçen akımların değişimleri birbirine eşit olmalıdır.

$$\frac{V_i dT}{L} = \frac{(V_i - V_0)(1 - d)T}{L} \quad (5)$$

Denklem 5’de V_0 çekilirse;

$$V_0 = \frac{V_i}{1 - d} \quad (6)$$

2.3. Yükselten DA Dönüştürücü Eleman Değerleri Seçimi

Sürekli iletim modu indüktör akımının devamlı akmaya devam ettiği dolayısıyla yük üzerinde devamlı yük akımının aktığı çalışma durumudur. Sürekli iletim modunda çalışma için tasarlanmış bir yükselten DA dönüştürücünün minimum sınır indüktör ve çıkış kondansatör değerleri sırasıyla denklem 7-8’de verilmiştir.

$$L_{\min} = \frac{d(1 - d)^2 R}{2f} \quad (7)$$

$$C_{\min} = \frac{V_0 dT}{R \Delta V_C} \quad (8)$$

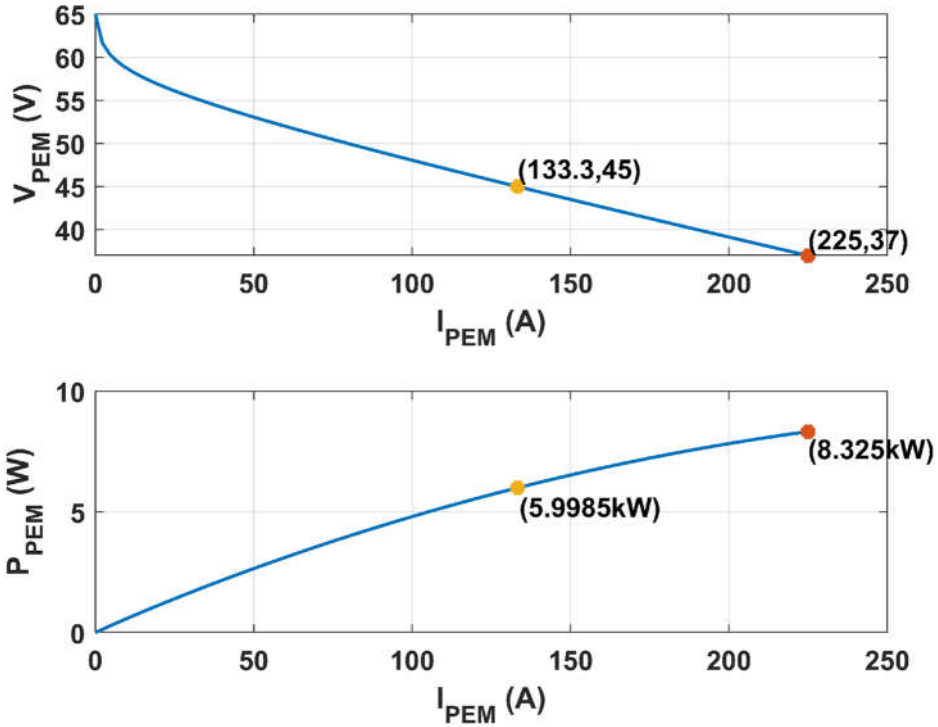
Sürekli iletim modunda çalışma için indüktör ve çıkış kondansatör değerleri hesaplanan sınır değerlerinden daha yüksek seçilmelidir (Açıkgöz ve Keçecioğlu, 2020). Benzetim çalışmaları için belirlenen, hesaplanan ve seçilen yükselten DA dönüştürücü eleman değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Benzetim çalışması için belirlenen, hesaplanan ve seçilen yükselten DA dönüştürücü eleman değerleri

Belirlenen değerler		
Giriş Gerilimi	V_i	45V
Çıkış Gerilimi	V_o	100V
Çıkış Akımı	I_o	60A
Yük Direnci	R	2Ω
Güç	P	6kW
Anahtarlama Frekansı	f	20Khz
C kondansatörü üzerindeki gerilimin dalgalılık oranı	ξ	0.05
Verim	η	%99.54
Hesaplanan Sınır Değerler		
İndüktör	L_s	4.62 μ H
Kapasitör	C_s	33.1mF
Seçilen Değerler		
İndüktör	L	500 μ H
Kapasitör	C	75mF

2.4. PEM Yakıt Hücresi

PEM yakıt hücresinde, akıma bağlı olarak gerilim ve güç değişimleri doğrusal olmamaktadır. Şekil 4'te 6 kW nominal güçte çalışan bir PEM yakıt hücresinin akım-gerilim (I-V) ve akım-güç (I-kW) karakteristiği verilmiştir.

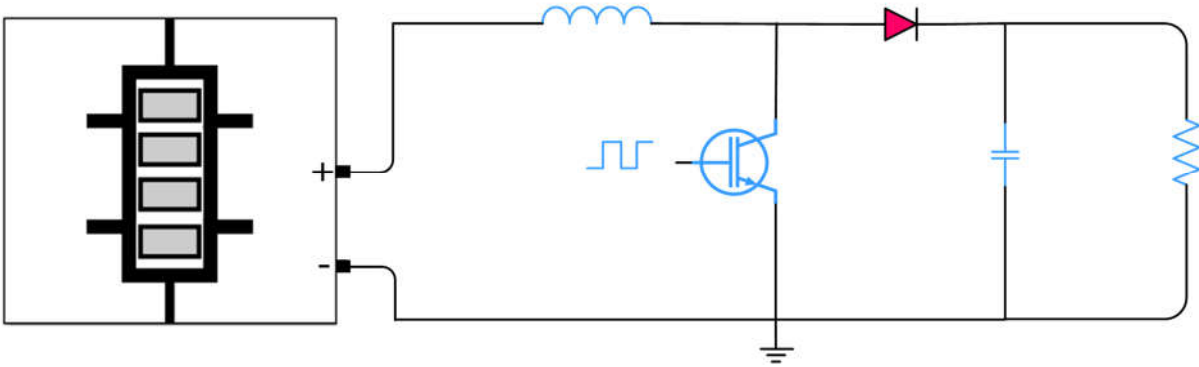


Şekil 4. 6kW nominal güçte çalışan bir PEM yakıt hücresinin (I-V) ve (I-kW) karakteristiği

Şekil 4'te yakıt hücresinin I-V karakteristiği incelendiğinde yakıt hücresinden çekilen akım arttıkça hücre geriliminin düştüğü görülmektedir. Yakıt hücresi I-kW karakteristiği incelendiğinde ise maksimum güç değerine (6kW) ulaşılan kadar yakıt hücresinden çekilen akım arttıkça yakıt hücresinden çekilen güç değerinin de arttığı gözlemlenmiştir (Gani ve Uçar ,2011).

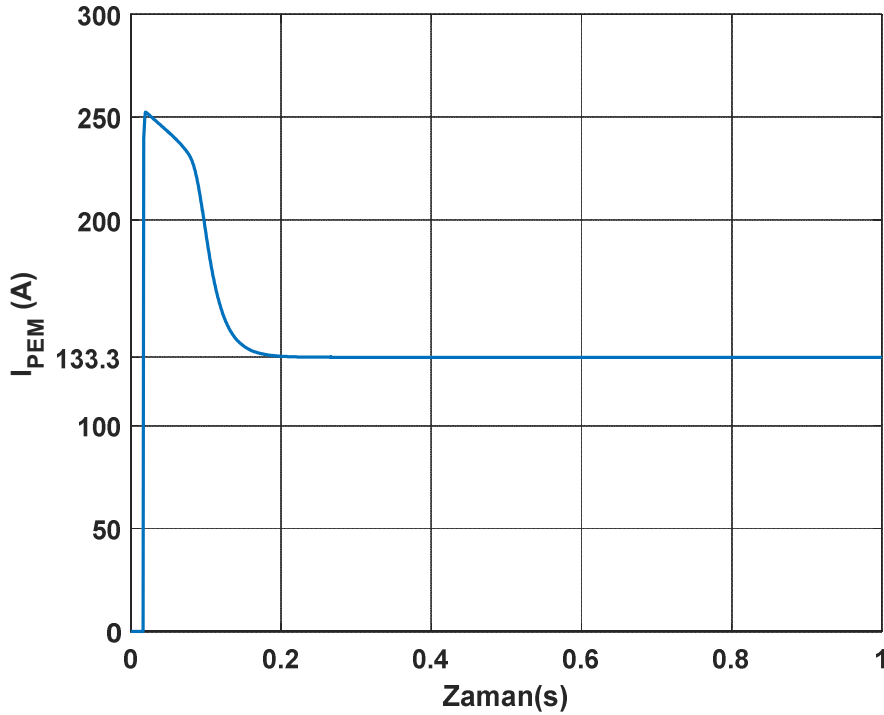
3. Bulgular

Benzetim çalışmalarında Matlab/Simulink programının 2019a lisanslı versiyonu kullanılmıştır. Çalışmanın benzetim süresi 1s olup örnekleme zamanı 100µs seçilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan PEM yakıt hücresi nominal çalışma şartlarında çalıştırılmıştır. PEM yakıt hücresi beslemeli yükselten DA dönüştürücü şekil 6'da verilmiştir.

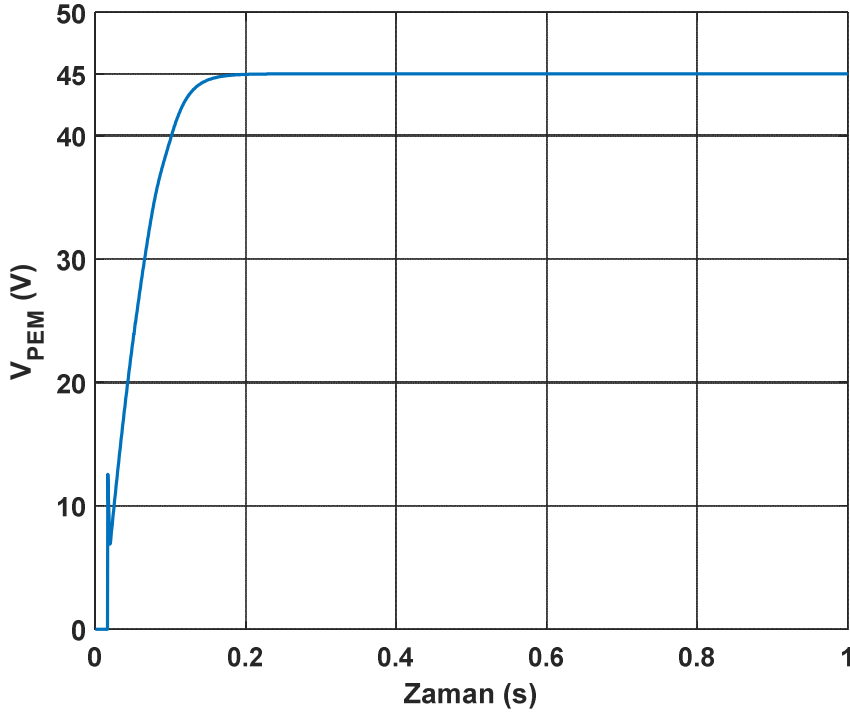


Şekil 6. PEM yakıt hücresi beslemeli yükselten DA dönüştürücü

Sabit görev oranı (0.55) ile çalıştırılan yükselten DA dönüştürücünün nominal çalışma şartlarına sahip PEM yakıt hücresinden çektiği akım ve hücre gerilimi sırasıyla şekil 7-8'de verilmiştir.

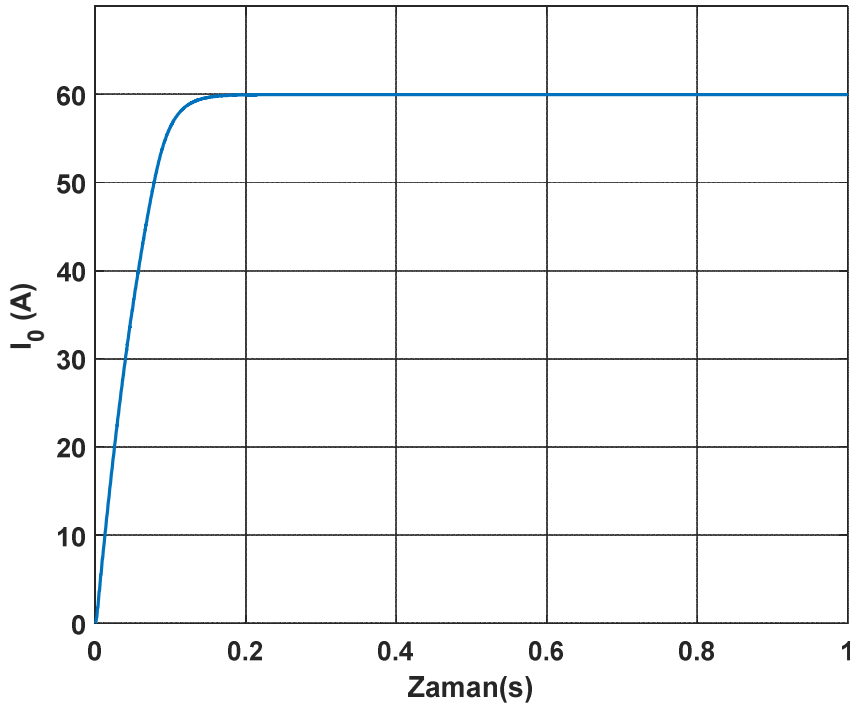


Şekil 7. PEM yakıt hücresinden çekilen akım

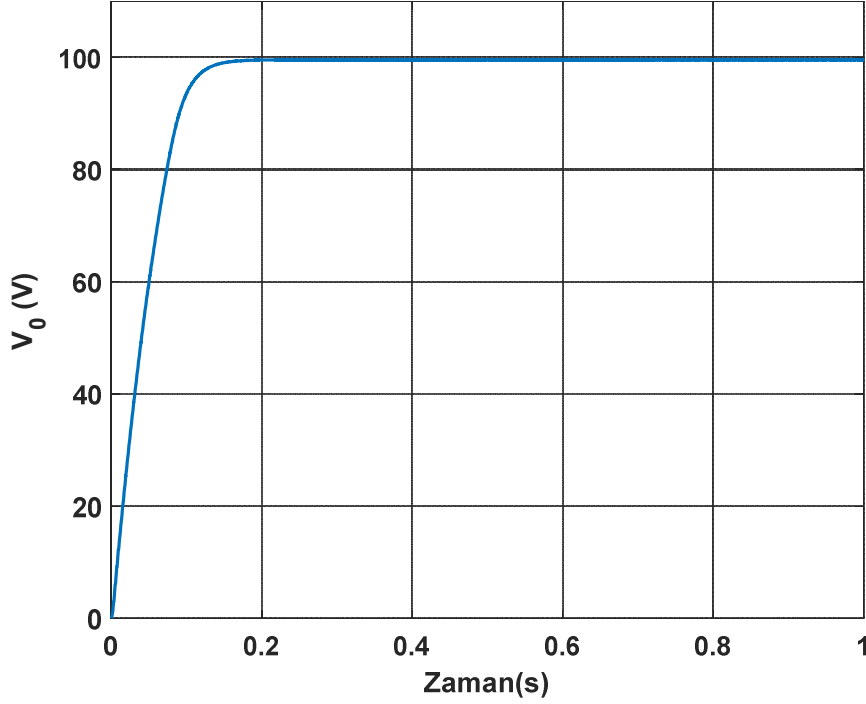


Şekil 8 PEM yakıt hücre gerilimi

Şekil 7-8 incelendiğinde PEM yakıt hücresinin nominal şartlardaki akım ve hücre gerilimi değerlerine ulaştığı görülmüştür. Şekil 9 ve 10'da ise sabit görev oranında (0.55) yükselten DA dönüştürücüsünün çıkış akımı ve gerilimi verilmiştir.



Şekil 9. Sabit görev oranında (0.55) yükselten DA dönüştürücüsünün çıkış akımı



Şekil 10. Sabit görev oranında (0.55) yükselten DA dönüştürücüsünün çıkış gerilimi

Şekil 9-10 incelendiğinde nominal şartlarda çalışan PEM yakıt hücresinin çıkış akım ve geriliminin belirlenen tasarım değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada düşük çıkış gerilimine sahip PEM yakıt hücresinin nominal çalışma şartları için yükselten DA dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan yükselten DA dönüştürücü %99.54 yüksek çalışma verimiyle nominal çalışma şartlarında kararlı ve oldukça tatmin edici sonuçlar vermiştir. Gelecek çalışmalarda farklı dönüştürücü devreleri kullanılarak çıkış akımı denetimli benzetim ve gerçek zamanlı çalışmalar yapılması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- Açıkgöz, H. & Keçecioglu, Ö.F. (2020). Aralıklı tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı yükselten tip DA-DA çevirici yapısının denetimi ve deneysel analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 1061-1074. DOI: 10.35193/bseufbd.735757.
- Bilhan, A. (2020). Yakıt pili uygulamaları için kademeli yükseltici DA/DA dönüştürücü devresinin tasarımı, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 29-37. DOI: 10.24012/dumf.527601.
- Gani, A. (2023). PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmaya yönelik temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici tasarımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 39(3), 403-416.
- Gani, A. & Şekkeli, M. (2023). Fotovoltaik panel beslemeli yükselten çeviricinin açık çevrim denetimi. 5. *Uluslararası Türk Dünyası Fen Bilimleri ve Mühendislik Kongresi 15-17 Eylül 2023*, Bişkek-Kırgızistan.
- Gani, A. & Uçar, I. (2024). Enhanced control of polymer electrolyte membrane fuel cell fed basic series positive super voltage lift Luo converter using interval type-2 fuzzy logic. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(2), 457-467. DOI: 10.29109/gujsc.1433379.
- Karaarslan, A. & Doğan, R. (2017). Modeling and control of DC-DC buck converter using PEM fuel cell. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*. 6: 94-105.

- Kocaarslan, I. Kart, S. Genc, N. & Uzmus, H. (2019). Design and application of PEM fuel cell-based cascade boost converter. *Electrical Engineering*, 101, 1323-1332. DOI: 10.1007/s00202-019-00871-0.
- Kart, S. (2021). Yakıt hücre sistemleri için çift katlı yükselten DA-DA dönüştürücünün kontrolü. 114s, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Kart, S. Demir, F. Kocaarslan, I. & Genc, N. (2024). Increasing PEM fuel cell performance via fuzzy-logic controlled cascaded DC-DC boost converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 84-95. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.130.
- Keçecioglu, Ö.F. Kılıç, E. Gani, A. & Şekkeli, M. (2019). Yükselten DA-DA dönüştürücünün LQR denetleyici kullanılarak optimal denetimi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 83-88.
- Rakhtala, S. M. Ghaderi, R. & Ranjbar, N.A. (2011). Prolong the stack life of PEM fuel cell system via higher order sliding mode control. In the 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation. pp. 13-18.
- Rashid, M.H. (2011). Power Electronics Handbook, Butterworth-Heinemann.
- Yıldız, E. (2016). PEM tipi yakıt pillerinde çıkış akımının dalgalanmasını azaltmaya yönelik bir DC/DC dönüştürücü tasarımı ve uygulaması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, İstanbul.
- Ozdemir, L. Gani, A. & Kececioglu, O.F. (2019). Design of high gain Luo converter for fuel cells in electrical vehicles. *International Symposium on Advanced Engineering Technologies*, 02-04 May 2019, Kahramanmaraş.
- Ozkara O, Tokgoz N, Dogan R, & Karaarslan A. (2017). The analysis of OCC and PI control method for isolated fly-back converter using PEM fuel cells. *Gaziosmanpasa Journal of Scientific Research*. 6: 40-49.

A NUMERICAL STUDY OF A VANADIUM-REDOX FLOW BATTERY WITH SEVERAL FLOW FIELD CHANNEL GEOMETRIES

İlker KAYALI

Erciyes University, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Türkiye
Kapadokya University, Kapadokya Vocational School, Nevşehir, Türkiye
ORCID: 0000-0001-9122-0700

Gülşah ELDEN

Erciyes University, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Türkiye
Erciyes University, Energy Conversions Research and Application Center, Kayseri, Turkey
(Responsible Author) ORCID: 0000-0003-2756-8483

Abstract

The aim of this study is to explore the effects of different channel geometries on overpotential, voltage performance, columbic, voltage, and energy efficiencies in a vanadium redox flow battery. For this purpose, square, rectangular, circle, and trapezoid channel geometries in the serpentine flow field are designed by keeping channel surface area at a constant value for each geometry. Two-dimensional numerical models are solved using COMSOL Multiphysic 5.5 under certain boundary conditions. The numerical results show that the channel geometry significantly affects overpotential, voltage performance, and these efficiencies. Among the considered channel geometries, the trapezoidal channel geometry has the highest voltage performance and energy efficiency because of the lowest overpotential in this channel geometry.

Keywords: Vanadium redox flow battery, Flow field design, Overpotential, Battery performance.

Introduction

Vanadium redox flow battery (VRFB) has many advantages such as scalability, fast response time, high storage capacity, low cost, high efficiency, long life, and low environmental efficiency (Lourenssen et al., 2019). This battery uses flow field channels to circulate liquid electrolytes stored in external tanks through a half-cell. The most commonly used flow fields for VRFB are conventional, parallel, interdigitated, and serpentine flow fields. In literature, there are some studies about flow field designs (Jyothi Latha & Jayanti, 2014, Lu and al., 2020, Sharma & Kumar, 2021, Wang and al., 2022). Kumar and Jayanti developed the serpentine field that produced the lowest pressure drop (Kumar & Jayanti, 2016). Researchers have shown that the electrolyte is distributed evenly in porous media using a serpentine flow field (Gundlapalli & Jayanti, 2019). A study using channel structure design found that electrolyte flow properties can be effectively improved without incurring costs, which can positively contribute to battery performance (Huang et al., 2022). Another study is to investigate the effects of different flow channel shapes (rectangle, square, circular and trapezoid) on battery performance, charge, mass and momentum transport during the discharge process in a VRFB with a serpentine flow field. The best potential performance of the battery shows that the best discharge capacity, electrode and electrolyte potential distributions are obtained in the trapezoidal flow channel model due to the good electrolyte distribution (Kayalı & Elden, 2021).

This study investigates the overpotentials for negative and positive electrodes for four different channel geometries. It also aims to investigate the effects of voltage, coulomb, and energy efficiency on the serpentine flow field. In the two-dimensional numerical study, channel geometry configurations have been determined as square, rectangle, circle, and trapezoid. To investigate the impact of channel geometry on VRFB performance, a steady-state numerical model is developed and COMSOL Multiphysics 5.5 software using the finite element approach is utilized.

2. Mathematical Model

The basic components of VRFB are electrodes, membrane, current collector layers, and external tanks where electrolyte solutions consisting of sulphuric acid and vanadium ions are stored. The schematic diagram of VRFB is shown in Figure 1. Furthermore, Two-dimensional different channel geometries are shown in Figure 2. During charging or discharging in VRFB, the following electrochemical reactions occur separately at the electrodes of the positive and negative half-cells.

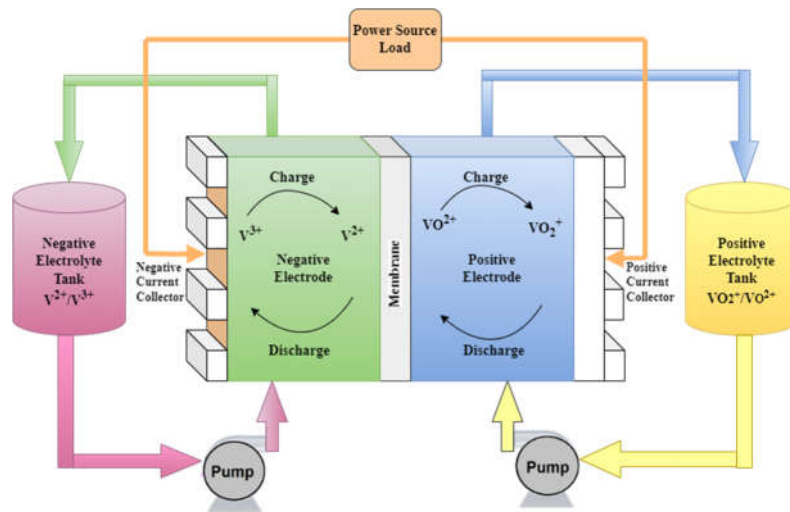
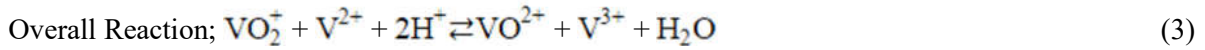


Figure 1. Schematic diagram of a single VRFB cell (Kayali İ., 2022)

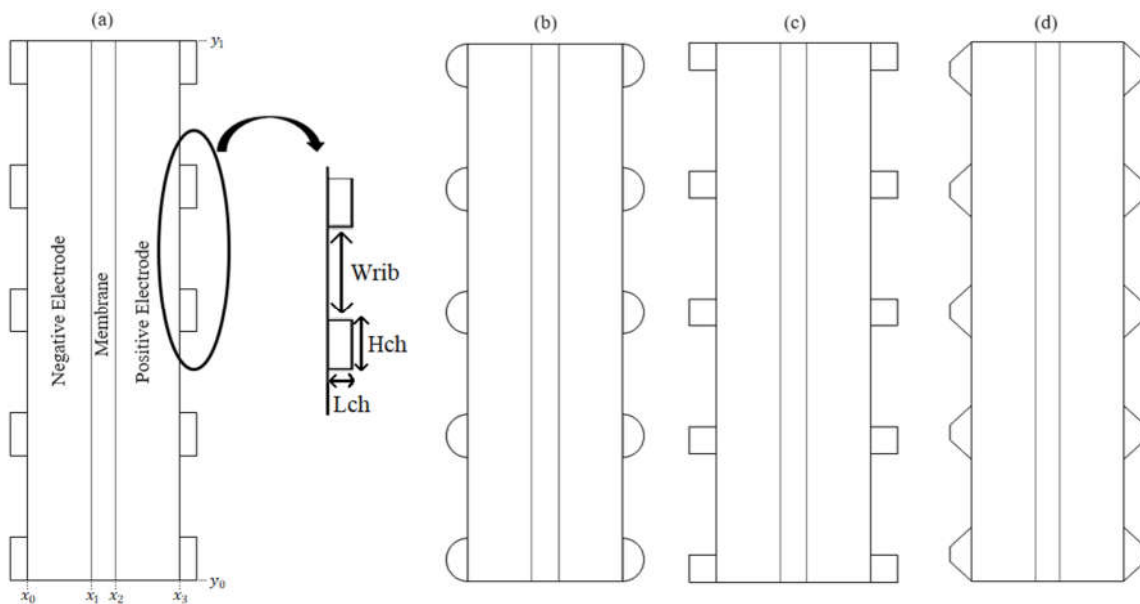


Figure 2. Two-dimensional different channel geometries; (a) rectangle, (b) square, (c) circle, (d) trapezoid (Kayali & Elden, 2021)

2.1. Model Assumptions

The numerical model equations are solved according to the following assumptions to simplify the simulations:

- The numerical model is steady-state.
- The electrolyte flow is laminar and incompressible.
- The side reactions of hydrogen and oxygen are neglected.
- All porous components are assumed isotropic and homogeneous.
- The cell is assumed to be isothermal.

2.2. Model Equations

The basic conservation equations applied to the numerical model are as follows (Al-Yasiri & Park, 2017):

Continuity Equation;

$$\rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

Momentum Conservation;

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left((\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] - \frac{2\mu}{3\varepsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \left(\frac{\mu}{K} + Q \right) \vec{u} + \vec{f} \quad (5)$$

Species Conservation;

$$\vec{N}_i = -D_i^{eff} \nabla C_i - z_i M_i C_i F \nabla \phi_i + \vec{u} C_i \quad (6)$$

Charge Conservation;

$$\vec{\nabla} \vec{i}_s = -\nabla \vec{\nabla} \vec{i}_l = -\sigma_s^{eff} \nabla^2 \phi_s = k_l^{eff} \nabla^2 \phi_l = S \quad (7)$$

Since the only ion that can move across the membrane is the hydrogen proton, the conservation equation is;

$$N_{H^+} = C_{H^+} v_m - \left(\frac{Z_{H^+} F}{RT} \right) D_{H_m^+} C_{H^+} \nabla \phi_m \quad (8)$$

In the continuity and momentum equations, ρ is density, \vec{u} is the flow velocity, ε is the electrode porosity, P is pressure, μ is dynamic viscosity, Q is the mass source and K is the permeability of negative/positive electrodes. In the equation for the conservation of species, D_i^{eff} is the effective diffusion coefficient, C_i (V^{5+} , V^{4+} , V^{3+} , V^{2+} , H_{pos} and H_{neg}) is the species concentration, z_i is fixed charge, M_i is the ionic mobility of electrolyte, ϕ_i is the ionic potential, F is the Faraday constant. In the equation for the conservation of charge, \vec{i}_s is the current density in the solid phase, \vec{i}_l is the current density in the electrolyte phase, σ_s^{eff} is the effective electrical conductivity of the porous electrode, k_l^{eff} is the ionic conductivity of the electrolyte, ϕ_s is the electrical potential. For the conservation equation occurring in the membrane, C_{H^+} hydrogen concentration, Z_{H^+} is the fixed acid concentration, R is the universal gas constant, T is the temperature, $D_{H_m^+}$ is the membrane proton diffusion coefficient, v_m is the liquid water velocity, and ϕ_m is the electrolyte potential in the membrane. VRFB operating parameters and kinetic properties included in the conservation equations for the two-dimensional numerical model are obtained from the literature (Al-Yasiri & Park, 2017). The geometric properties of different channel geometries are presented in Table 1.

Table 1. The geometric properties for channel geometries (Kayalı & Elden, 2021)

Symbols	Rectangle	Square	Circle	Trapezoid
H _{ch}	4 mm	2.521 mm	4 mm	5 mm
L _{ch}	1.59 mm	2.521 mm	2 mm	2 mm
W _{cell}	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm
L _e	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm
L _m	183 μm	183 μm	183 μm	183 μm

2.3. Performance Parameters

Including coulomb efficiency, voltage efficiency, and energy efficiency, all efficiencies of battery in the charge/discharge cycle have been investigated and these efficiencies are calculated by using following equations.

$$\text{Coulomb Efficiency} = \frac{I_{\text{discharge}}}{I_{\text{charge}}} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{Voltage Efficiency} = \frac{V_{\text{discharge}}}{V_{\text{charge}}} \times 100\% \quad (10)$$

$$\text{Energy Efficiency} = \frac{V_{\text{discharge}} \times I_{\text{discharge}}}{V_{\text{charge}} \times I_{\text{charge}}} \quad (11)$$

2.4. Boundary Conditions

The momentum equation for velocity and pressure boundary conditions

$$\text{At } y=y_0, \begin{cases} v_{in} = \frac{Q}{\varepsilon A} \\ c_i = c_{in}^i \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{At } y=y_1, \begin{cases} P = P_{out} \\ -D_i^{eff} \nabla c_i \cdot \vec{n} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

The charge conservation for the discharge process:

For Electrode;

$$\text{At } x = x_0, \sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \vec{n} = I \quad (14)$$

$$\text{At } x = x_3, \sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \vec{n} = -I \quad (15)$$

$$(x = x_1, x = x_2, y = y_0, y = y_1) = 0 \quad (16)$$

For Electrolyte;

$$\text{At } x = x_1, k_l^{eff} \nabla \phi_l \cdot \vec{n} = -I \quad (17)$$

$$\text{At } x = x_2, k_l^{eff} \nabla \phi_l \cdot \vec{n} = I \quad (18)$$

$$(x = x_0, x = x_3, y = y_0, y = y_1) = 0 \quad (19)$$

Furthermore, zero species flux conditions (20) are applied along the electrode-membrane interface and across the membrane bottom and top.

$$-\vec{n} \cdot \vec{N} = 0 \quad \begin{cases} x = x_1, x = x_2 \\ y = y_0, y = y_1 \end{cases} \quad (20)$$

The boundary conditions are used to solve the species conservation equations (21).

$$\text{At } y=0, \begin{cases} c_{in}^i = c_1^0 \cdot soc \text{ (for } c^{V^2} \text{ and } c^{V^5} \text{)} \\ c_{in}^i = c_2^0(1 - soc) \text{ (for } c^{V^3} \text{ and } c^{V^4} \text{)} \\ c_{in}^i = c_0^{H_{pos}} + c_1^0 \cdot soc \text{ (for } c^{H_{pos}} \text{)} \\ c_{in}^i = c_0^{H_{neg}} + c_1^0 \cdot soc \text{ (for } c^{H_{neg}} \text{)} \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{Other boundaries, } (-D_i^{eff} \nabla c_i + c_i \vec{v}) \cdot \vec{n} = 0 \quad (22)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

A comparison of a two-dimensional numerical model with experimental data in the literature (Al-Yasiri & Park, 2017) is given in Figure 3. As can be seen from this figure, the two-dimensional numerical model is reasonably familiar with experimental data. In addition, while the average relative error between the experimental data and the numerical model is less than 1% for the discharge condition, this error is less than 3% for the charge condition.

3.1 Analysis of overpotentials at the electrodes

The overpotentials occurring in both electrodes for different channel geometries are illustrated in Figure 4. During both the charging and discharging processes, the overpotential at the positive electrode is greater than the other electrode. Among the channel geometries, the square channel geometry has more overpotential compared to other channel geometries. Moreover, the trapezoidal channel geometry shows the lowest overpotential. Low overpotential during the charge and discharge operation leads to improved voltage performance. When examining the results of the trapezoidal channel shape, it is clear that it may provide the optimum voltage performance due to the low overpotentials at both electrodes.

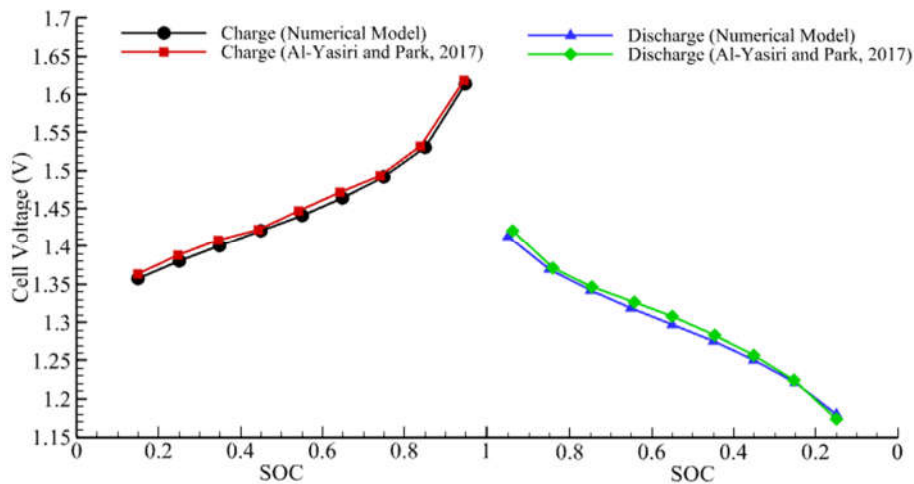


Figure 3. Comparison of two-dimensional numerical model with experimental data; (a) Charge process (b) Discharge process

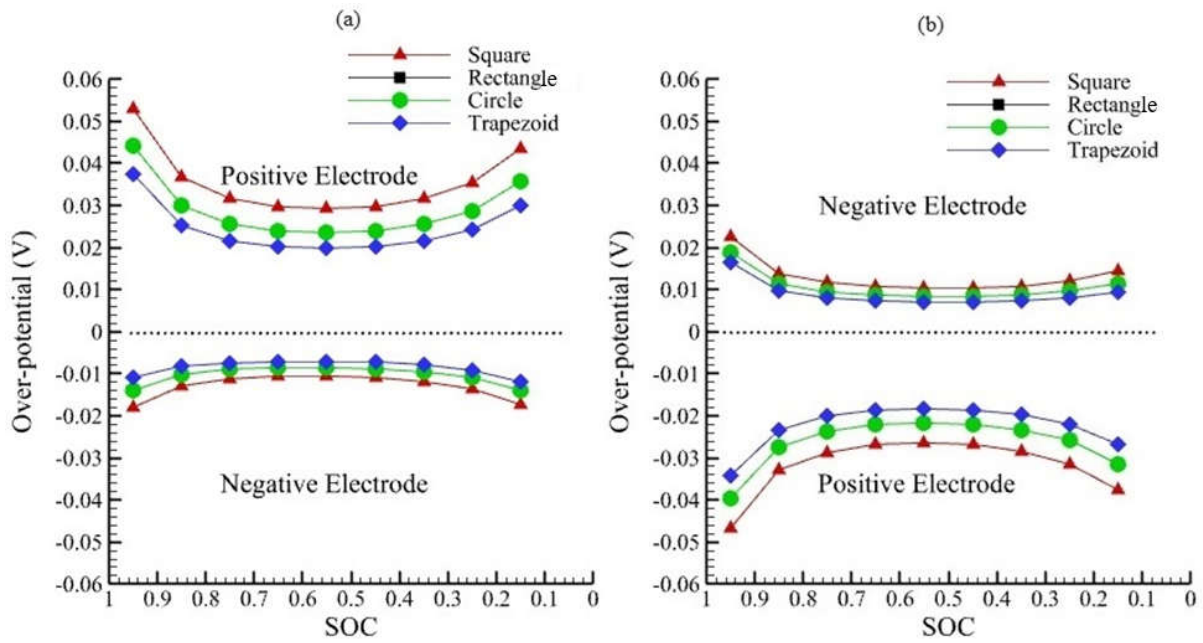


Figure 4. The overpotentials in both electrodes for different channel geometries; (a) Charge process (b) Discharge process

3.2 Battery Performance

The voltage efficiency, coulomb efficiency, and energy efficiency are investigated for the numerical model with the two-dimensional serpentine flow field. The efficiencies obtained from the numerical results are calculated at the constant current density of $40\text{mA}/\text{cm}^2$. Figure 5 presents the variation of coulomb efficiency with SOC for different channel geometries. For all channel geometries, the coulomb efficiency values are found to be close to each other.

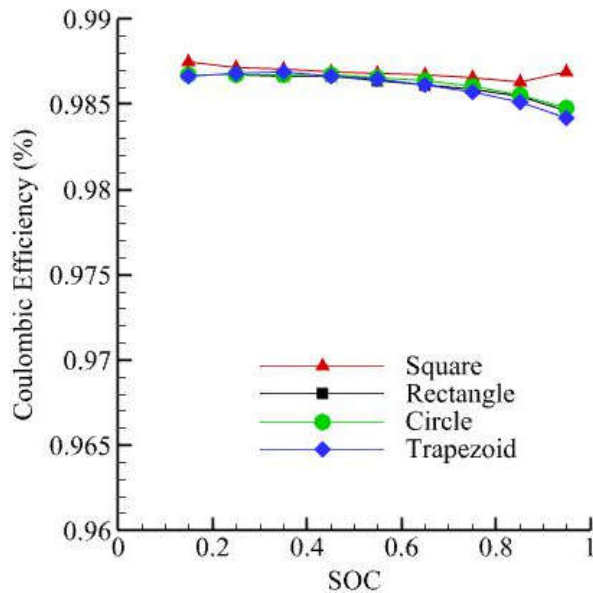


Figure 5. The coulombic efficiency of VRFB for different channel geometries

Figure 6 displays the voltage efficiency of VRFB for different channel geometries with SOC range from 0.15 to 0.95. The voltage efficiency of VRFB with trapezoidal channel geometry is approximately 93% at 0.6 SOC due to this geometry having the lowest overpotential.

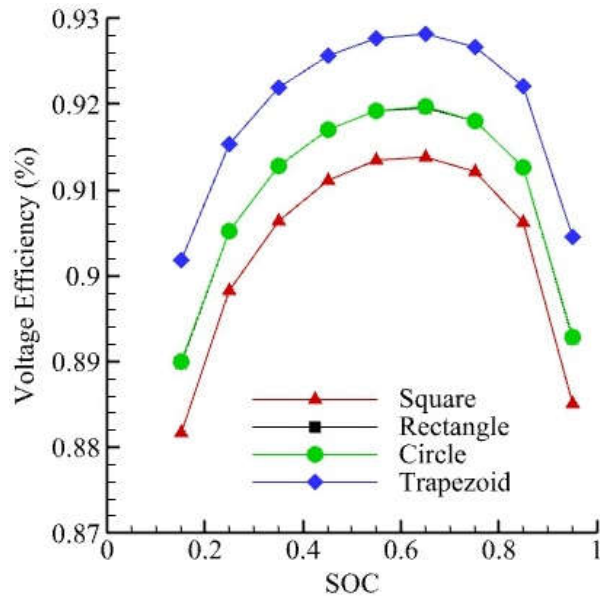


Figure 6. The voltage efficiency of VRFB for different channel geometries

The energy efficiency of VRFB for different channel geometries is illustrated in Figure 7. Energy efficiency has the same trend as voltage efficiency. There is a 10% difference between trapezoidal channel geometry and square channel geometry for 0.5 SOC.

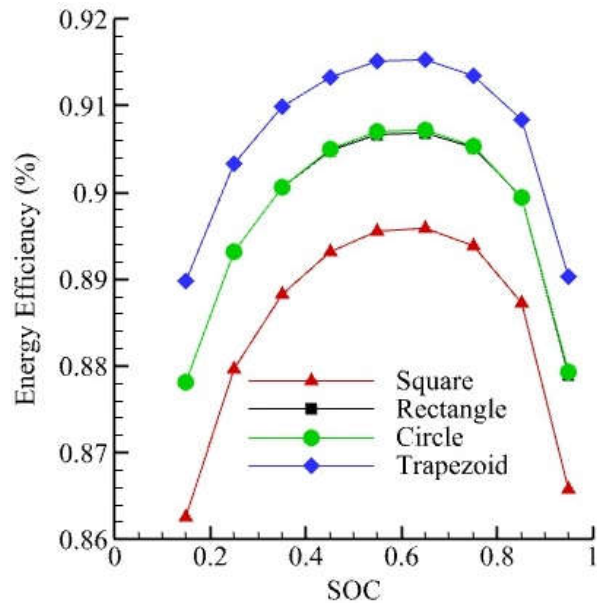


Figure 7. The energy efficiency of VRFB for different channel geometries

4. CONCLUSIONS

This study investigates the overpotentials and battery performance in a VRFB with different channel geometries. Channel geometries such as square, circular, rectangle, and trapezoid are studied in the numerical model with a serpentine flow field. According to the numerical calculations, the trapezoid channel design yields the lowest overpotential in the battery. Therefore, the highest voltage performance, voltage, and energy efficiencies were obtained in the battery with the trapezoid channel.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Scientific Research Projects Unit of Erciyes University for funding under contract no: FYL-2020-10397.

REFERENCES

- Lourenssen, K., Williams, J., Ahmadpour, F., Clemmer, R., & Tasnim, S. 2019, Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 25, 100844.
- Jyothi Latha, T., & Jayanti, S. (2014). Hydrodynamic analysis of flow fields for redox flow battery applications. *Journal of Applied Electrochemistry*, 44, 995-1006.
- Lu, M. Y., Deng, Y. M., Yang, W. W., Ye, M., Jiao, Y. H., & Xu, Q. (2020). A novel rotary serpentine flow field with improved electrolyte penetration and species distribution for vanadium redox flow battery. *Electrochimica Acta*, 361, 137089.
- Sharma, H., & Kumar, M. (2021). Enhancing power density of a vanadium redox flow battery using modified serpentine channels. *Journal of Power Sources*, 494, 229753.
- Wang, Y., Li, M., & Hao, L. (2022). Three-dimensional modeling study of all-vanadium redox flow batteries with the serpentine and interdigitated flow fields. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 918, 116460.
- Kumar, S., & Jayanti, S. (2016). Effect of flow field on the performance of an all-vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 307, 782-787.
- Gundlapalli, R., & Jayanti, S. (2019). Effect of channel dimensions of serpentine flow fields on the performance of a vanadium redox flow battery. *Journal of Energy Storage*, 23, 148-158.
- Huang, Z., Mu, A., Wu, L., & Wang, H. (2022). Vanadium redox flow batteries: Flow field design and flow rate optimization. *Journal of Energy Storage*, 45, 103526.
- Kayalı, İ., & Elden, G. (2021). A study on different flow channel shapes in a vanadium redox flow battery with serpentine flow field. *International Journal of Sustainable Aviation*, 7(4), 334-353.
- Kayalı, İ. *Vanadyum Redoks Akış Bataryasında akış kanallarının ve kanal geometrilerinin batarya içerisinde gerçekleşen ısı transferi üzerine etkileri* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Al-Yasiri, M., & Park, J. (2017). Study on channel geometry of all-vanadium redox flow batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(9), A1970.

**IMPACT OF RENEWABLE ENERGY INTEGRATION ON COMPETITION AND PRICE DYNAMICS IN THE TURKISH ELECTRICITY MARKET****Edanur KILIÇ¹**¹Erciyes University, Graduate School of Social Sciences, Department of Economics, Kayseri, Türkiye¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0873-0011>**Erhan MUĞALOĞLU²**²Erciyes University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Economics, Kayseri, Türkiye²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5362-6259>**Saltuk Buğra SELÇUKLU³**³Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Türkiye³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9295-3866>**Hazar KESKİN⁴**⁴Independent Researcher in Economics, Hatay, Türkiye⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3526-0892>**Abstract**

Sustainable economic growth currently requires a progressively higher rate of power generation. To meet this increasing demand, renewable energy sources, such as wind and solar, replace fossil fuel combustion. This substitution implies competition among energy production technologies. This study examines how the competitiveness of energy production technologies affects electricity prices in the Turkish day-ahead power market from January 2018 to June 2024. It first determines the competitiveness indices based on the market share of the HHI. This index shows strong seasonality and a downward trend due to the increasing share of renewable technologies in Türkiye. Then, it estimates the net dynamic impact of these competitive indices on electricity prices by following a smooth transition structural vector auto-regressive (ST-VAR) model. ST-VAR procedure assumes state shifts within the dynamic relationship involving long-run co-movements and short-run dynamics. It also incorporates natural gas prices into the structural model as the driver of exogenous cost shocks to electricity prices. ST-VAR provides the estimated responses of day-ahead prices to the natural gas and technology competitiveness-related structural shocks over 24 months. It then predicts how these structural shocks contribute to the percentage variation in the short and long-term electricity prices. Finally, it presents the historical decomposition that estimates the partial impact of each structural shock on electricity prices from January 2018 to June 2024. Preliminary results find a significant co-integration between technology competitiveness, electricity, and natural gas prices. The impulse responses suggest that electricity prices respond negatively to increasing competitiveness and positively to rising natural gas prices. Nevertheless, structural shocks show mixed long-run impacts. ST-VAR infers that the growing Russian-Ukrainian tension is a structural shift point during the observation period.

Keywords: Competitiveness, Electricity prices, Smooth-Transition, VAR**Introduction**

The electricity market in Türkiye has undergone significant transformations in recent years, driven by shifts in energy policies, the integration of renewable energy sources, and fluctuating natural gas prices. These dynamics have highlighted the critical role of the energy mix in determining electricity prices and the need to examine how technological diversity and dominance influence market outcomes.

Technological diversity in electricity generation refers to a wide range of technologies, including renewable energy (solar, wind, hydro), fossil fuels, and nuclear power, competing to meet electricity demand. The competition between incumbent and emerging technologies, as described by Papachristos (2017), plays a pivotal role in shaping market efficiency and resilience. Haelg (2020) emphasizes that promoting technological

diversity is an essential outcome of auctions and policy interventions to foster a balanced and competitive electricity market. In contrast, technological dominance, where one or a few technologies dominate electricity generation, may lead to price volatility and reduced market stability. Understanding the extent to which technological dominance explains deviations in electricity prices is crucial for designing policies that mitigate market inefficiencies and ensure affordability.

Natural gas prices, a key determinant of electricity costs in gas-dependent economies, add another layer of complexity to electricity pricing. The transmission mechanisms through which shocks in natural gas prices propagate through the Turkish electricity market require careful assessment. These shocks impact short-term electricity prices and have long-term implications for investment decisions and market structure.

This study builds on prior literature, including Stringer, Joanis, and Abdoli (2024), which highlights the influence of the power generation mix on electricity prices to assess the specific case of Türkiye. It aims to reveal the historical trajectory of natural gas price shocks on electricity markets, examining how these shocks interact with technological diversity and dominance to shape market outcomes. By addressing these interconnected themes, this research contributes to a deeper understanding of the Turkish power market and provides insights that may inform energy policy, investment decisions, and market design in other developing economies.

Data and Methodology

This study employs a comprehensive dataset spanning from January 2018 to June 2024, encompassing monthly observations from Türkiye's electricity market. The data is derived primarily from the Turkish Energy Exchange (EPIAŞ). Technological dominance (**techdom**) in the power generation sector is proxied using the Herfindahl-Hirschman Index (HHI), a measure of market concentration. The HHI is calculated as:

$$HHI = \sum_{i=1}^n S_i^2$$

S_i is the market share of the i th unit and n is the number energy production technology in the Day-ahead electricity market (Rhoades,1993). The HHI captures the extent of technological concentration, with higher values indicating greater dominance and lower technological diversity and vice versa. Natural gas spot prices (**pngas**) have a substantial role in explaining electricity prices. Henry Hub Natural Gas prices proxy natural gas prices. The total power generation (**capacity**) is measured in megawatt-hours (MWh) and represents the aggregate electricity produced in Türkiye each month. The load-weighted average electricity price (**pelec**) reflects the average electricity price in the day ahead electricity market, weighted by the demand load at each price level through authors' calculations.

This study aims to investigate the role of technological diversity, natural gas price shocks, and the power generation mix in shaping electricity prices in Türkiye by analyzing both short-term price dynamics and long-term market trends. Following Lütkepohl and Netšunajev (2017), this study employs a VAR framework to examine the relationship between natural gas prices, technological diversity, electricity demand, and electricity prices in Türkiye's power market. VAR methodology captures the propagation of shocks and their instantaneous and dynamic impacts across the included variables. These are the structural shocks defined as:

- i. ϵ_{pngas} : energy cost shock;
- ii. $\epsilon_{techdom}$: technology diversity shock;
- iii. $\epsilon_{capacity}$: electricity demand shock,
- iv. ϵ_{pelec} : electricity market shock or all the other likely related shocks.

The contemporaneous relationships among the structural shocks are modeled using the following impact matrix

$$\begin{bmatrix} u_{pngas} \\ u_{techdom} \\ u_{capacity} \\ u_{pelec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{energy\ cost\ shock} \\ \varepsilon_{technology\ diversity\ shock} \\ \varepsilon_{electricity\ demand\ shock} \\ \varepsilon_{electricity\ market\ shock} \end{bmatrix}$$

Natural gas prices and technological dominance are assumed to satisfy exogeneity. They are not contemporaneously affected by shocks in the electricity market. Electricity market shocks ε_{pelec} do not influence natural gas prices, technological dominance, or electricity demand within the same month. However, electricity prices (pelec) are assumed to react instantaneously to all structural shocks. Natural gas prices (pngas) and technological dominance (techdom) adjust to shocks in demand or electricity market dynamics with a lag.

Findings and Discussion

Table 1 presents co-integration test results employed from the Johansen procedure. According to test results, there is at most 1 cointegrating relation between electricity price, technical diversity, natural gas prices, and electricity demand. This long-run relationship captures the price trends related to energy costs, technical progress, energy mix, and demand.

Table 1. Co-Integration Test (Johansen Procedure)

Hypothesis	Test	Critical Values		
		10%	5%	1%
$r \leq 3$	3.98	7.52	9.24	12.97
$r \leq 2$	14.67	13.75	15.67	20.20
$r \leq 1$	20.40	19.77	22.00	26.81
$r = 0$	39.28	25.56	28.14	33.24

Figure 1 visualizes the responses of the model variables to one standard deviation structural shocks over 24 months period. The results reveal significant lagged and contemporaneous interactions between the variables. According to impulse response plots, natural gas prices and technological diversity are exogenous within the same period, remaining unaffected by demand or electricity market shocks. Conversely, electricity prices respond immediately to all shocks, reflecting their role as the market's primary adjustment variable.

Significant lagged interactions arise, especially regarding natural gas prices, which adjust slowly to demand and price shocks. Feedback loops can either amplify or dampen initial impacts, as electricity market shocks indirectly influence demand and technology. The market shows inertia, with shocks propagating throughout the system until long-run equilibrium is reached. Temporary overshooting occurs as feedback mechanisms enhance deviations, especially aftershocks from natural gas prices and technological diversity. Impulse responses show that the system is stable. The shocks aren't permanent but persistent. Structural shocks are relatively less persistent.

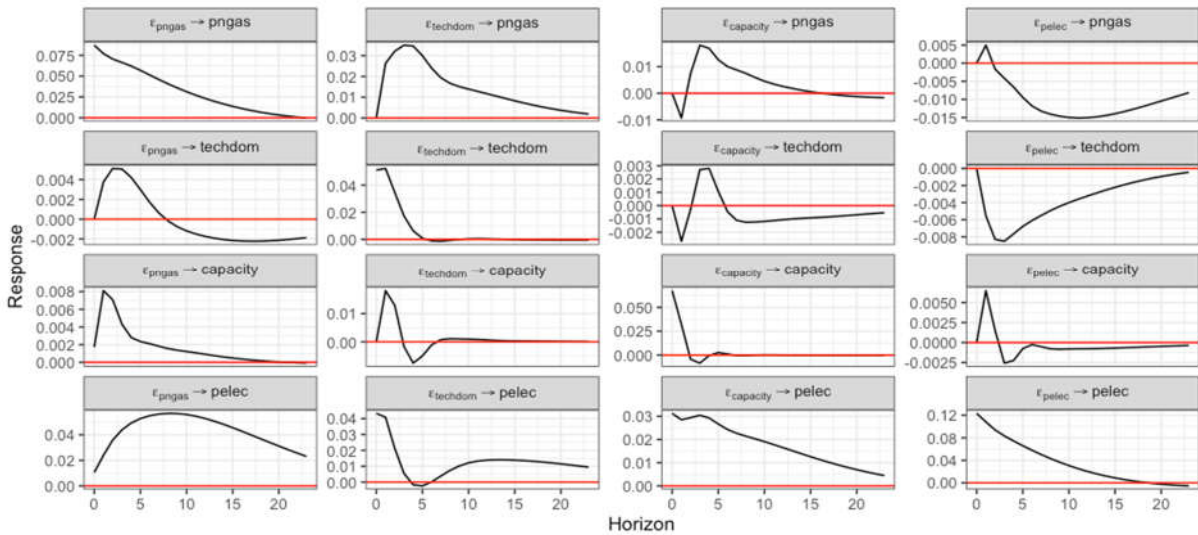


Figure 1. Impulse response functions

Figure 2 shows the historical decomposition of electricity prices from 2018 to 2024. Historical decomposition estimates the partial impact of each structural shock on the electricity prices. Natural gas prices mainly explain the electricity prices, especially the increasing trend after the Ukrainian-Russian escalations in 2022. Technological diversity primarily reduces electricity prices in Turkish power markets.

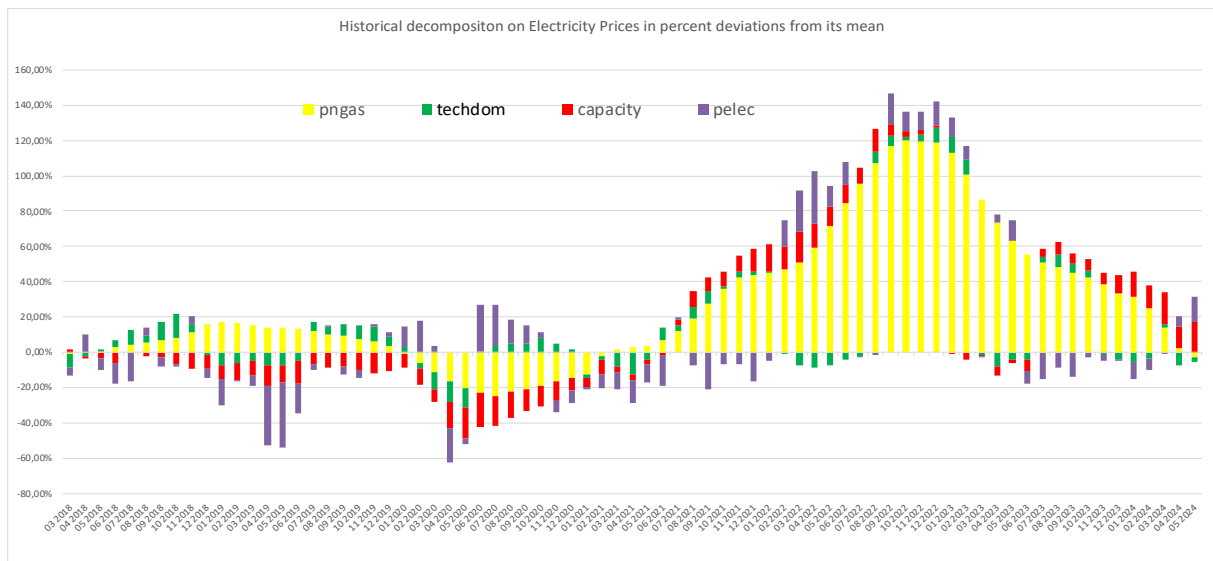


Figure 2. Historical Decomposition of Electricity Prices

Conclusion and Recommendations

This study investigates the factors driving electricity price deviations in the Turkish power market between 2018 and 2024, focusing on energy cost shocks, technological diversity, and market dynamics. The results demonstrate that energy cost shocks are the primary drivers of electricity price fluctuations during the study period, particularly in the long run. However, the initial impact of these shocks is limited. Technological diversity in the power generation sector also plays a significant role in shaping electricity prices. In the short run, an increase in technological diversity reduces electricity prices, suggesting that a more diverse energy mix enhances competition and market efficiency. Nevertheless, this effect diminishes by the third year. One of the most notable findings is the shift in market volatility that coincides with the beginning of the COVID-19

pandemic in March 2020. The volatility shift highlights the market's sensitivity to external shocks and emphasizes the importance of considering economic and global events in the electricity market.

The findings suggest energy policies that address electricity price volatility and energy technology transitions in the Turkish power market. The role of energy security, particularly concerning natural gas prices and supporting a diverse technological mix, should be central to policy discussions to ensure long-term price stability and market resilience.

Acknowledgment

This work has received funding from the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK) ARDEB 3501 program under grant agreement 222M440, project title: “Agent-Based Simulation Model with Artificial Intelligence-Assisted Learning, Forecasting, and Optimization Algorithms for Electricity Markets and Market Analysis”.

References

- Stringer, T., Joanis, M., & Abdoli, S. (2024). Power generation mix and electricity price. *Renewable Energy*, 221, 119761.
- Haelg, L. (2020). Promoting technological diversity: How renewable energy auction designs influence policy outcomes. *Energy Research & Social Science*, 69, 101636.
- Papachristos, G. (2017). Diversity in technology competition: The link between platforms and sociotechnical transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 291-306.
- Lütkepohl, H., & Netšunajev, A. (2017). Structural vector autoregressions with smooth transition in variances. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 84, 43-57.
- Rhoades, S. A. (1993). The herfindahl-hirschman index. *Fed. Res. Bull.*, 79, 188.

**ESG (ÇEVRESEL, SOSYAL VE YÖNETİŞİMSEL) PARAMETRELERİNE GÖRE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTERMİ İLE TEDARİK ZİNCİRİ DEĞERLENDİRME****Mert ÖZAY¹**¹Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği, Kayseri, Türkiye¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-8714-9339>**Ercan ŞENYİĞİT²**²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Kayseri, Türkiye²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9388-2633>**Özet**

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, günümüzün en büyük ve en tehlikeli tehditleri arasında yer almaktadır. Artan sera gazı emisyonları ile, doğal kaynakların tükenmesi ve biyolojik çeşitliliğin azalması, dünyayı büyük bir riskle karşı karşıya bırakmıştır. Bu sorun, yalnızca hükümetler veya özel kuruluşlar için değil, toplumun her kesimi için küresel bir mesele olarak kabul edilmektedir.

Bu bağlamda, şirketlerin tedarikçilerini değerlendirirken sürdürülebilirlik parametrelerini dikkate almaları kritik önem taşımaktadır. Sürdürülebilirlik parametreleri, tedarik zincirindeki paydaşların çevresel sorumluluklarını yerine getirmeleri, toplumsal faydayı gözetmeleri ve etik iş ilkelerine uymaları için bir çerçeve sunar. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde ise AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) metodu kullanılmıştır. AHP, kriterlerin önem derecelerini hiyerarşik yapıda belirleyerek, daha tutarlı bir değerlendirme sağlar. Bu çalışmada, sürdürülebilirlik parametrelerine dayalı tedarikçi değerlendirme süreci, çok kriterli karar verme yöntemi VIKOR kullanılarak analiz edilmiştir. VIKOR yöntemi, alternatiflerin performanslarını en iyi ve en kötü çözümlere göre sıralayarak en uygun çözüme ulaşmayı amaçlar.

Çalışmada kullanılan sürdürülebilirlik parametreleri üç boyutta incelenmiştir: Çevresel boyutta karbon ayak izi, enerji ve su tüketimi gibi unsurlar; sosyal boyutta iş kazası oranı, kadın çalışan sayısı ve eğitim programları; yönetişimsel boyutta ise yolsuzluk politikaları ve müşteri-çalışan memnuniyeti gibi faktörler değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, şirketlerin sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde stratejik kararlar almasına ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Çalışma, net sıfır emisyon hedeflerine ulaşma yolunda önemli hiyerarşik karar vermeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: ESG (Çevresel, Sosyal ve Yönetişimsel), Sürdürülebilir Tedarik Zinciri, AHP, VIKOR, Çok Kriterli Karar Verme

SUPPLY CHAIN EVALUATION WITH MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING BASED ON ESG (ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE) PARAMETERS**Abstract**

Global warming and climate change are among the biggest and most dangerous threats of our time. Increasing greenhouse gas emissions, depletion of natural resources and decrease in biodiversity have put the world at great risk. This problem is considered a global issue not only for governments or private institutions, but for all segments of society. In this context, it is critical for companies to consider sustainability parameters when evaluating their suppliers. Sustainability parameters provide a framework for stakeholders in the supply chain to fulfill their environmental responsibilities, observe social benefits and comply with ethical business principles. The AHP (Analytical Hierarchy Process) method was used to determine the criteria weights. AHP provides a more consistent evaluation by determining the importance levels of the criteria in a hierarchical structure. In this study, the supplier evaluation process based on sustainability parameters was analyzed using the multi-criteria decision-making method VIKOR. The VIKOR method aims to reach the most appropriate solution by ranking the performances of the alternatives according to the best and worst solutions.

The sustainability parameters used in the study were examined in three dimensions: In the environmental dimension, elements such as carbon footprint, energy and water consumption; in the social dimension, factors such as work accident rate, number of female employees and training programs; and in the governance dimension, factors such as corruption policies and customer-employee satisfaction were evaluated. This approach aims to help companies make strategic decisions in sustainable supply chain management and contribute to the Sustainable Development Goals.

The study aims to make important hierarchical decisions on the way to achieving net zero emission targets.

Keywords: ESG (Environmental, Social and Governance), Sustainable Supply Chain, AHP, VIKOR, Multi-Criteria Decision Making

Giriş

İçerisinde bulunduğumuz zaman içerisinde, (Şekil 1). ESG parametreleri, şirketlerin sürdürülebilirlik sorumluluklarını önem verme ve aksiyon almaları noktasında büyük önem taşımaktadır (Ni ve diğerleri, 2024). ESG şirketlerin sadece ekonomik performanslarını değil, aynı zamanda çevreye karşı yaratmış oldukları etkileri, sosyal sorumlulukları ve şeffaf yönetim uygulamalarını da değerlendirilmesi gerekliliğini meydana çıkarmıştır. Bununla beraber, tedarik zincirinin sürdürülebilirlik ve sorumluluk çerçevesinde şekillendirilmesi gerektiğine kanaat getirilmiştir. Öncelikle küresel ölçekte tedarik zincirlerinin çevresel ve sosyal etkileri incelendiğinde, ESG parametrelerine bağlı bir değerlendirme hiyerarşisi, hem şirketlerin uzun vadeli etkilerini minimize etme, hem de küresel olarak daha sürdürülebilir bir dünya için çalışmasını sağlayacaktır. Bu alanda yapılacak çalışmalar stratejik olarak gereklilik haline gelmiştir. Çalışma, ESG parametrelerine dayalı çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemi ile tedarik zincirlerini değerlendirerek, sürdürülebilirlik ve etik sorumluluk ilkelerine dayalı bir analiz gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın temel soruları arasında, "ESG kriterleri tedarik zincirlerinde nasıl optimize edilebilir?" ve "ÇKKV yöntemi, tedarik zincirlerinin ESG performansını daha objektif bir şekilde değerlendirmeye nasıl katkı sağlar?" gibi araştırma soruları bulunmaktadır. Bu sorular, mevcutta şirketlerin maruz kaldığı sürdürülebilirlik ve sosyal sorumluluk sorumluluklarına karşı daha stratejik ve proaktif kararlar alma noktalarında yardımcı olabilecek bir değerlendirme modeli oluşturmayı amaçlamaktadır. ÇKKV yöntemi, ESG kriterlerinin fazlalığı ve çok boyutlu yapısını incelemek ve analiz etmek için uygun bir çözüm yöntemidir. ESG değerlendirmesinde, çevresel, sosyal ve yönetsimsel sorumluluk gibi farklı değerlendirme kriterlerinin bir şekilde incelenmesi gerekir. ÇKKV yöntemi, bu kriterleri objektif bir halde birleştirerek tedarik zincirlerinin ESG performansını değerlendirmeyi amaçlar ve şirketlerin bu alandaki stratejik yönelimlerini şekillendirmeye katkı sağlar.



Şekil 1. ESG Nedir? [Kaynak]

Bu çalışma, ESG ve tedarik zinciri konularında sistematik literatür incelemelerinin önemini vurgulamaktadır. Yazarlar, tek lensli refleks kameraların tekrarlanabilirlik, şeffaflık ve azaltılmış distorsiyon gibi avantajlarını

tartışıyor ve bunları geleneksel yöntemlerle karşılaştırıyor. Uygun anahtar kelimelerin seçimi, Scopus veri tabanının kullanımı ve hariç tutma kriterleri gibi metodolojik ayrıntıları sunarak 46 kayıttan oluşan nihai bir örnek oluşturdu. ESG ve tedarik zincirlerine ilişkin mevcut literatürdeki boşlukları tespit etmekte ve yeni araştırmalar için yapılandırılmış bir gündem önermektedir. Bu alandaki bilimsel üretimi geliştirmek için gelecekte daha fazla SLR araştırmasına ihtiyaç duyulduğunu vurguluyor (Truant ve diğerleri, 2023).

Bu çalışma, tekstil endüstrisinde ESG maliyet paylaşımına dayalı bir tedarik zinciri sistemini tanıtmaktadır. Sistem hem perakendeciler hem de üreticiler için karı en üst düzeye çıkarmak amacıyla ECS, K, A, B ve C gibi parametrelerin modellenmesini ve optimizasyonunu sağlar. Yazarlar, özellikle deterministik talep altında, k parametresinin bir tekstil tedarik zincirinin karı üzerindeki etkisini analiz ederek sistemin karlılığı hakkında fikir vermektedir. Muhtemelen matematiksel modelleme ve optimizasyon tekniklerini kullanarak ÇSY maliyet paylaşımının etkisini araştırdı. Sonuçlar, tekstil endüstrisindeki ESG maliyet paylaşım sistemlerinin kârlılık potansiyelini ve optimizasyon fırsatlarını gösteriyor ve sektör profesyonelleri için değerli bilgiler sağlıyor. Makalede gelecekte yapılacak araştırmalara veya önerilere yer verilmemiştir. Tekstil endüstrisinde ESG maliyet paylaşımına dayalı bir tedarik zinciri sistemini tanıtmaktadır. Sistem hem perakendeciler hem de üreticiler için karı en üst düzeye çıkarmak amacıyla ECS, K, A, B ve C gibi parametrelerin modellenmesini ve optimizasyonunu sağlar. Özellikle deterministik talep altında, k parametresinin bir tekstil tedarik zincirinin karı üzerindeki etkisini analiz ederek sistemin karlılığı hakkında fikir vermektedir. Bu çalışma, muhtemelen matematiksel modelleme ve optimizasyon tekniklerini kullanarak ÇSY maliyet paylaşımının etkisini araştırdı. Sonuçlar, tekstil endüstrisindeki ESG maliyet paylaşım sistemlerinin kârlılık potansiyelini ve optimizasyon fırsatlarını gösteriyor ve sektör profesyonelleri için değerli bilgiler sağlıyor (Li ve diğerleri, 2024).

Bu çalışma, imalat şirketlerinin dijitalleşme sürecinde hizmet odaklı bir iş stratejisine yöneldiğini ve sektördeki akıllı girişimlerin ve otomasyonun önemini vurgulamaktadır. Hizmetleştirme, şirketlerin ürünlerine değer katmak amacıyla hizmetleri iş süreçlerine entegre etmeleri anlamına gelirken, yeşil hizmetleştirme sürdürülebilir bir üretim ve performans stratejisi olarak öne çıkıyor. Bu çalışma, Endüstri 4.0, yeşil uygulamalar ve yeşil hizmetleşme arasındaki ilişkiyi araştırarak ESG uyumluluğunun düzenleyici rolünü değerlendirmektedir. Yapısal eşitlik modellemesi kullanılarak geliştirilen bir model, yeşil tedarik zinciri performansının iyileştirilmesinde yeşil hizmetin önemini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, yöneticilerin yeşil hizmeti benimsemesi gerektiğini ve bu stratejinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Gelecekteki araştırmaların yeşil hizmetlerin ekonomik performans üzerindeki etkisi gibi konulara odaklanılması önerilmektedir (Kumar ve diğerleri, 2024).

Bu çalışma, yeşil tedarik zinciri konusunu dikkate alarak tedarik zinciri yönetimi eğitimlerinin faydalarını incelemekte ve Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi için oluşturulmuş bir değerlendirme modeli incelemektedir. Yeşil tedarik zinciri yönetimi, çevresel performansı artırmayı amaçlarken, eğitim etkinliğinin belirsizliği nedeniyle bir değerlendirme modeline ihtiyaç duymaktadır. Geliştirilen model, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile Tedarik Zinciri Operasyonları Referans Modeli (SCOR) öğelerini birleştirerek Yeşil tedarik zinciri yönetimi eğitim programlarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Analizler, Yeşil tedarik zinciri yönetimi eğitim programlarının hem bireysel (%77) hem de organizasyonel (%87) faydalar sağladığını ortaya çıkarmıştır, uygulanan eğitimlerin bilgi ve süreç anlayışını geliştirdiğine karar verilmiştir. Bundan sonra yapılması planlanan çalışmalarda ise, BOCR (Faydalar, Fırsatlar, Maliyetler ve Riskler) çerçevesine dayalı yeni yaklaşımlar ve Yeşil tedarik zinciri yönetimi uygulamaları üzerine araştırmalar önerilmiştir (Tramarico ve diğerleri, 2017).

Bu çalışma, yeşil tedarik zinciri yönetimi uygulamalarının yeterliliğini değerlendirmek için entegre bir bulanık çok kriterli karar verme yöntemi önermektedir. Yeşil tedarik zinciri yönetimi, çevresel parametreleri tedarik zinciri operasyonlarına entegre ederek yeşil performansı ölçmeyi amaçlamaktadır. Şirket ve kurumların yeşil tedarik zinciri yönetimi performansını değerlendirmek için Bulanık DEMATEL, Bulanık ANP ve Bulanık TOPSIS teknikleri bir arada kullanılmıştır. Bulanık DEMATEL, yeşil tedarik zinciri yönetimi boyutları arasındaki nedenselliği analiz ederken, Bulanık ANP, bu ilişkilerle kriter ağırlıklarının belirlenmesini hesaplar. Çalışmada kullanılan model, şirketlerin performanslarını yeşil dizayn, yeşil satın alma politikası, yeşil dönüşüm, yeşil lojistik ve tersine lojistik hizmetleri gibi değişik açılardan değerlendirmelerine imkan sağlar. VIKOR ve matematiksel programlama gibi diğer çok kriterli karar verme tekniklerinin entegre edilmesi açısından gelecekte yapılması planlanan çalışmalara ışık tutmaktadır (Uygun ve Dede, 2016).

Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan biri kriter ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan AHP (Haliloğlu ve Odabaş, 2018) metodudur. Kriter ağırlıklarını belirleme aşamasından sonra ise çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan VIKOR (Uyguntürk, 2014) yöntemi ile tedarikçiler sürdürülebilirlik kriterlerine göre sıralanması gerçekleştirilmiştir.

AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci)

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), 1968 yılında Myers ve Alpet tarafınca önerilmiş, sonrasında ise 1977 yılında Saaty tarafından karar verme sorunlarının çözümü için kullanılmak üzere geliştirilmiştir. AHP, karar verme süreçlerinde hem niceliksel hem de niteliksel kriterlerin bir arada kullanılmasına olanak tanıyan etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşım, grup veya bireysel tercihler, deneyimler, sezgiler ve bilgi değerlendirme yetenekleri gibi unsurları göz önünde bulundurarak karmaşık problemleri katmanlar halinde çözmeyi amaçlar. Karar vericiler, bu süreçte kendi yargı ve düşüncelerini dahil edebilir, böylece nesnel ve öznel fikirlerin bir araya gelmesine olanak tanır. AHP yapısında hiyerarşi, en az üç düzeyde oluşturulmaktadır. En üst düzey, belirlenen amaca karşılık gelirken, ikinci düzeyde ana kriterler yer almakta ve bunların altında alt kriterler bulunabilir. Tutarlı ikili karşılaştırmalar yapabilmek için kriterlerin sayısının doğru bir şekilde belirlenmesi ve her bir kriterin net bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca, standartların ortak özellikleri göz önünde bulundurularak sınıflandırılması önemlidir. AHP, toplu karar alma süreçleri için son derece etkili bir yöntemdir. Duyarlılık analizi, sonuçların esnekliğini değerlendirmeye imkân tanır. Hiyerarşi yapı ve ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulması özeldir; bu nedenle, tecrübeli ve alanında uzman bir ekibin desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. AHP Metodunun aşamaları aşağıdaki gibidir.

Problem Tanımlama Aşaması

Karar alma için gerekli parametreler belirlenmelidir. Sonrasında önceliklerin standartları araştırılmalıdır.

Hiyerarşik Yapının Oluşturulması Aşaması

Karar verme sürecinde ulaşılması gereken asıl amaç en öncelikli hedeftir. Bu hedefin altında temel kriterler, bu kriterlerin altında ise alt kriterler bulunmaktadır. Hiyerarşinin en altında alternatifler var. Karar probleminin karmaşıklığına ve detayına bağlı olarak hiyerarşideki düzey sayısı artabilir. Bir yapıya karar verirken mümkün olduğunca ayrıntılı olmak önemlidir. Hiyerarşi oluşturulurken aynı seviyedeki seçeneklerin birbirinden tamamen bağımsız olduğu varsayılır. Bu, her seçeneğin diğer seçeneklerle karşılaştırılarak kendi düzeyinde değerlendirilmesi anlamına gelir.

AHP Yöntemi Adımları

Karar verme sürecinin ilk adımında temel kriterler tanımlanır ve gerekiyorsa bu kriterlerin altında alt kriterler sıralanır. Daha sonra belirlenen tüm kriterler dikkate alınarak bir karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu matrisler 1'den 9'a kadar bir şiddet ölçeği kullanılarak oluşturulur. Bu aşamanın amacı kriterlerin karar alma mekanizması üzerindeki etkisini belirlemektir. Karşılaştırma matrisi, köşegeninde 1'lerin bulunduğu bir kare matristir. Bu, her bir kriterin kendisine göre önceliğini gösterir, ancak aynı zamanda diğer kriterlerle karşılaştırmayı da içerir. Matris, karar verme sürecinde önceliklerinizi ve tercihlerinizi net bir şekilde anlamanızı sağlar. Denklem 1'de görüldüğü üzere ikili karşılaştırmalar yapılarak, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde AHP karar matrisinin oluşturulmasını sağlamaktadır.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A_{ij} , i. ölçütün j. ölçüt ile olan ikili karşılaştırmasının sonucudur ve A_{ij} değeri, $1/A_{ij}$ şeklinde elde edilir.

Matrisin üst veya alt kısmını doldurmak için yapılan karşılaştırmalar, diğer bölümlerin de değer almasını

sağlar; bu özellik "karşılıklı olma" olarak adlandırılmaktadır. A_{ij} Değeri, Ölçüt i, ölçüt j'ye göre ne kadar

önemlidir, sorusuna yanıt vermektedir. Karar alternatifleri, her bir ölçüte göre ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Karar matrisleri ise, Saaty'nin oluşturduğu 1-9 karşılaştırma ölçeğine dayanmaktadır. Tablo 1'de 1-9 skalasının değerlerinin karşılık geldiği ifadeler gösterilmiştir.

Tablo 1. Değerlendirme Skalası

Önemi	Tanım	Açıklama
1	Eşit önem sahip	Her iki seçenekte eşit değerde öneme sahiptir.
2	Zayıf ya da hafif	Bir ölçüt diğerine göre biraz daha önemli sayılmıştır.
3	Biraz önemli	Bir ölçüt diğerine göre biraz önemli sayılmıştır.
4	Makul artı	Bir ölçüt diğerine göre çok daha önemli sayılmıştır.
5	Fazla önemli	Bir ölçüt diğerine göre çok önemli sayılmıştır.
6	Güçlü artı	Ölçüt diğer ölçüte göre kesinlikle çok daha önemli sayılmıştır.
7	Çok fazla önemli	Ölçüt diğer ölçüte göre kesinlikle çok önemli sayılmıştır.
8	Çok çok güçlü	Bir ölçütün diğerine göre son derece daha önemli olduğu çeşitli bilgilere dayandırılmıştır.
9	Son derece önemli	Bir ölçütün diğerine göre son derece önemli olduğu çeşitli bilgilere dayandırılmıştır.

Karşılaştırma Matrislerinin Normalizasyon Aşamasında (Özdağoğlu, 2013). Matristeki bütün elemanlar, kendi sütun toplamına bölünerek normalize edilmektedir. Normalize edilmiş matrisin her bir sütun toplamının 1 olması gerekmektedir. Öncelik Vektörü Oluşturma Aşaması normalize edilmiş matrisin her satırının toplamı hesaplanır ve bu toplamın matris boyutuna bölünmesiyle ortalama hesaplanır. Elde edilen değerler her bir kriter için hesaplanan önem düzeyi ağırlıklarını ifade etmektedir. Daha sonrasında ise kriter ağırlıklarının belirlenmesi sonrasında karşılaştırma matrislerinin tutarlı olup, olmadığı incelenmesi gerekmektedir, Bunun için tutarlılık analizi yapılır (Paksoy, 2017). Tutarlılık analizi çözümün doğruluğu için önemlidir. Tutarlılık oranı, karar verme aşamasında yapılan ikili karşılaştırmaların tutarlı seviyesini gösteren bir ölçme aracıdır. AHP metodu, karar vericinin kriterlerin önem seviyesini belirlemek için yapmış olduğu ikili karşılaştırmaları içermektedir. Lakin karar vericinin karşılaştırmaları yapmış olduğu mantıksal bir tutarsızlık meydana gelebilir. Tutarlılık indeksini hesaplamak için ilk aşama olarak, denklem 2' de özdeğer Fonksiyonu kriterlerin karşılaştırılmış olduğu matristen özdeğer (λ_{max}) değerini hesaplamak gerekmektedir. Bu işlemin sonunda

bulunan değer, denklem 3'de Tutarlılık indeksi karar vericinin yapmış olduğu bütün ikili karşılaştırmalardan bulunan kriter ağırlıkları ile matrisin çarpma işlemi yapılması ve sonrasında her sütunun toplamının bulunması ile hesaplanır. Bu işlemin sonucunda, tutarlılık oranını hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \left(\frac{W/1}{W_1} + \frac{W/2}{W_2} + \dots + \frac{W/n}{W_n} \right) \quad n = \# \text{ kriter} \quad w = \text{özvektör} \quad w' = \text{özdeğer} \quad (2)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Bu formülde n, karşılaştırma matrisinin boyutunu temsil etmektedir (kriter sayısı). Bir sonraki aşamada ise denklem 4'de Tutarlılık oranı, rastgele tutarlılık indeksi (RI) ile karşılaştırmak için RI değeri kullanılmaktadır. Rastgele tutarlılık indeksi, belirli boyutlara sahip) matrisler için daha öncesinde hesaplanmış değerlerdir. Bu

değerler, karşılaştırma sayısının çoğalmasıyla birlikte tutarsızlık riskinin kontrolü sağlamak için kullanılmaktadır. Tutarlılık oranı (CR), tutarlılık indeksinin rastgele tutarlılık indeksine bölünmesi ile elde edilir:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

CR değerinin 0.1'den küçük veya ona eşit olması durumunda, yapılan karşılaştırmaların kabul edilebilir bir seviyede tutarlı olduğu belirlenir. Bu durumda karar vericinin yapmış olduğu karşılaştırmaların mantıksal ve sonuçların güvenilir olduğu düşünülmektedir. Fakat CR değerinin 0.1'den büyük olduğu durumlarda, karar vericinin ikili karşılaştırmalarında tutarsızlık olabileceğini göstermektedir. Bu sonuçla karar vericinin, karşılaştırmalarını tekrar değerlendirmesi önerilir. Özetlemek gerekirse, tutarlılık oranı (CR), AHP metodunda karar vericinin değerlendirmelerinin ne seviyede uyumlu ve güvenilir olduğunu ifade etmektedir. CR değeri düşük değerlere sahip olduğunda, karar sürecinin daha tutarlı ve mantıklı olduğuna kanaat getirilir. Bununla beraber sonucun güven seviyesi artmaktadır.

VIKOR Yöntemi

VIKOR yöntemi (Ömürbek ve diğerleri, 2014), 1979 yılında Serbija Opricovic tarafından uygulamaya alınan çok kriterli karar verme yöntemlerindedir. Bu yöntem, karar vericilerin birden çok, özellikle çelişen kriterler arasında en iyi çözümü bulmasını ve "kompromis çözüm" elde edilmesini ifade eder. VIKOR, alternatiflerin ideal (en iyimser) ve anti-ideal (en kötümser) sonuca olan uzaklıklarını hesaplamaktadır. Yöntem, her kriter için belirlenen ağırlıklar için alternatifleri sıralamayı amaçlamaktadır. Alternatiflerin uzaklıkları, S ve R değerleri ile hesaplanmaktadır. S değeri, bir alternatifin ideal çözüme olan toplam uzaklığını ifade etmektedir, R değeri en kötü kriterdeki uzaklığı ifade eder. Bu değerleri kullanılarak hesaplanan Q değeri ise, alternatiflerin kesin sıralamasını belirlemesi sağlar. VIKOR yönteminin üstünlükleri arasında, çok kriterli problemlerde esnek bir çözüm ve karar verici tarafından onaylanan bir kompromis çözüm sağlaması bulunmaktadır. Ancak, ağırlıkların sübjektif olması durumu ve en iyi çözümün kabul edilebilirliği için koşulların gerekliliği gibi bazı dezavantajları da vardır. VIKOR yöntemi, özellikle sürdürülebilirlik alanında, tedarik zinciri yönetimi ve enerji projeleri gibi bölümlerde sık kullanılan birçok kriterli karar verme yöntemidir.

VIKOR Yöntemi Aşamaları

VIKOR yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerini çözmek için geliştirilen ve kullanılan bir metottur. Bu yöntem, alternatifleri farklı kriterler ışığında değerlendirerek "uzlaşmalı bir çözüm" bulunmasını amaçlamaktadır. İlk aşama olarak karar matrisinin oluşturulması gerekmektedir. Değerlendirilmesi gereken alternatifler ve kriterler belirlenir. Alternatiflerin her bir kriter için aldığı değerlere göre bir karar matrisi oluşturulur. Bu matris, her alternatifin her bir kriterdeki performansını sayısal olarak gösterir. Çözüm için kullanılacak olan verilerin bu matrise işlenmesi gerekmektedir. Denklem 5'de her kriter için en iyimser (ideal), denklem 6'da en kötümser (anti-ideal) değerler belirlenir. Maksimize edilmesi gereken kriterlerde en yüksek değer "en iyi" olarak, en düşük değer ise "en kötü" olarak kabul edilir. Minimize edilmesi gereken kriterlerde ise durum tam tersidir.

$$f_i^* = \text{En iyi değer} \quad (5)$$

$$f_i^- = \text{En kötü değer} \quad (6)$$

Denklem 7 ve denklem 8'de her alternatif için S_i ve R_j değerleri hesaplanır. Bu değerler memnuniyetsizlik skorudur.

S_i = Alternatiflerin her kriterden sapmasını gösteren toplam memnuniyetsizlik skoru.

R_j = En yüksek memnuniyetsizlik skoru.

$$S_i = \sum_j^n w_j * (f_i^* - x_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (7)$$

$$R_j = \max_j (w_j * (f_j^* - x_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)) \quad (8)$$

Denklem 9'da her bir alternatif için Q_i değerleri hesaplanır. Bu, S ve R değerlerinin göreceli olarak ağırlıklandırılmasıyla bulunur.

S^* ve S^- sırasıyla minimum ve maksimum S değeridir.

R^* ve R^- sırasıyla minimum ve maksimum R değerleridir.

q değeri ise 0 ile 1 arasında değişken göstermektedir. Çözüm için kademeli olarak değişkenlik göstererek çözümün sağlanması gereken koşulları test edilmesini sağlar.

Alternatifler içerisinde, S, R ve Q değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanır. VIKOR yönteminde en düşük Q değeri en iyi alternatifi gösterir.

$$Q_i = (S_i - S^*) / (S^- - S^*) + (1-q) * (R_i - R^*) / (R^- - R^*) \quad (9)$$

Denklem 10 ve Denklem 11'de belirtilen koşulların sağlanması gerekmektedir. VIKOR yöntemi koşullarıdır. En iyi Q değerine sahip olan alternatifin, diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında belirli bir fark yaratması beklenmektedir. Bunun için iki koşul test edilmektedir.

$$\text{Koşul 1: } Q(A_2) - Q(A_1) \geq D_Q \quad (10)$$

Koşul 2: En iyi Q değerine sahip alternatif, S ve R değerlerinden en az bir tanesinde en iyi sonucu gerçekleştirmiş olmalıdır. (11)

Bulgular ve Tartışma

Yapılan Çalışma ESG Parametrelerine göre çok kriterli karar verme metotları uygulanarak tedarikçilerin sürdürülebilirlik performanslarının izlenmesi hakkındadır. Sürdürülebilirlik kavramını sadece çevresel olarak değil, sosyal ve yönetsimsel açıdan da değerlendirmek gerekmektedir. Tedarikçiler de bazı veriler istenerek bu konuda bir karar verme yapısı oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan veriler ise Sektörde kamuoyuna açık şekilde yayımlanan sürdürülebilirlik raporlarından elde edilmiştir. Şirketlerin her sene düzenli olarak yayımladığı sürdürülebilirlik raporlarından, Çevresel olarak; Karbon ayak izi, Fosil enerji kullanımları, Atık miktarları, Elektrik tüketimleri ve toplam su tüketim verilerine erişilmiştir. Sosyal açıdan ise; Yaşanan iş kazası sayısı, Kadın çalışan oranı, Doğum izni kullanan çalışan sayısı, Düzenlenen eğitim süreleri verilerine erişilmiştir. Yönetimsel olarak; Yönetim kurulundaki kadın oranı, Müşteri memnuniyet oranı ve Yıllık etik ile ilgili düzenlenen eğitim süresi verileri belirlenmiştir. Bu verilerin kıyaslanabilmeleri için ise veriler, yüzde oran olanlar (kadın çalışan oranı, yönetim kurulundaki kadın çalışan oranı ve müşteri memnuniyet oranı) hariç, diğer kriterler şirkette çalışan personel sayısına bölünerek, kişi başına düşen miktarlar belirlenmiştir. Çalışmada kullanılacak kriter numaraları bu şekildedir.

Kriter 1: Karbon ayak izi (ton CO_{2e} /çalışan sayısı)

Kriter 2: Fosil enerji kullanımı (MWh/çalışan sayısı)

Kriter 3: Atık miktarı (ton/çalışan sayısı)

Kriter 4: Elektrik tüketimleri (MWh/çalışan sayısı)

Kriter 5: Toplam su tüketimi (M^3 / çalışın sayısı)

Kriter 6: Yaşanan iş kazası sayısı (kaza sayısı/çalışan sayısı)

Kriter 7: Kadın çalışan oranı (%)

Kriter 8: Doğum izni kullanan çalışan sayısı (izin kullanan/çalışan sayısı)

Kriter 9: Düzenlenen Eğitimler (eğitim saati/çalışan sayısı)

Kriter 10: Yönetim kurulundaki kadın oranı (%)

Kriter 11: Müşteri Memnuniyet Oranı (%)

Kriter 12: Yıllık etik ile ilgili verilen eğitim süresi (eğitim saati/çalışan sayısı)

Alternatifler için ise;

Alternatif A: A

Alternatif B: B

Alternatif C: C

Alternatif D: E

Alternatif E: E

Alternatif F: F şeklindedir.

(Şekil 2). Çalışmada kullanılan karar matrisi ifade etmektedir. Sütunlarda Alternatifler, Satırlarda ise Kriterler bulunmaktadır. 6 Alternatif 'in kriterlere göre aldığı değerler karar matrisinin oluşmasını sağlamıştır.

1.Karar Matrisi													
Alternatif/Kriter	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12	
A	1843.01	0.67	0.98	1.55	8.79	0.00	0.11	0.07	41.41	25.00	82.00	0.34	
B	551.40	2549.22	12499.59	831.21	5.45	0.00	0.16	0.04	11.68	0.22	86.00	1.00	
C	126.77	0.07	175.34	66.79	219.37	0.01	0.10	0.01	2.56	37.50	59.00	0.06	
D	20.58	0.56	0.10	1.93	26.48	0.01	0.18	0.05	42.20	0.25	57.00	3.85	
E	727.83	4.10	0.50	10.43	961.24	0.04	0.18	0.01	33.61	0.13	91.00	1.62	
F	35.84	0.16	0.37	11.86	4.46	0.02	0.15	0.06	13.19	0.00	70.00	0.00	

Şekil 2. Çözüm Karar Matrisi

Tablo 1 Uzmanların anketlerde kullandığı cevap skalasını ifade etmektedir. Skalada 1-9 arasında değerler yer almaktadır. Her bir değere karşılık gelen ifade aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

Çalışmada kriterlerin sonuca etkisini araştırmak için, alanında uzman 3 kişi tarafından gerekli karşılaştırmaların yapıldığı, soru anketi hazırlanmıştır. Cevaplar AHP (İncekara, 2018) metodu kullanılarak her bir kriterin karar vermeye etkisi araştırılmıştır. AHP metodunda 1-9 skalası kullanılmıştır. Değerlendiriciler buna göre puanlama yapmıştır. (Şekil 3). kriter ağırlıklarının belirlenmesi için oluşturulan AHP karar matrisi göstermektedir.

AHP	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12	
Karbon ayak izi (TonCo2e)	1.00	2.62	2.29	1.26	3.91	2.88	2.88	4.64	3.30	2.62	4.93	3.91	
Fosil Enerji Kullanımları (doğalgaz-MWh)	0.38	1.00	1.26	2.62	2.62	2.00	4.31	4.82	2.62	4.22	4.64	4.58	
Atık Miktarı (Ton)	0.44	0.79	1.00	1.00	2.29	2.62	1.59	4.64	2.00	2.88	3.17	3.63	
Elektrik Tüketimi MWh	0.79	0.38	1.00	1.00	3.00	1.59	3.30	4.58	2.29	4.22	2.52	4.22	
Toplam Su Tüketimi (M3)	0.26	0.38	0.44	0.33	1.00	1.00	1.44	3.63	2.29	1.59	3.00	2.29	
Yaşanan İş Kazası	0.35	0.50	0.38	0.63	1.00	1.00	1.00	4.64	2.62	1.00	4.64	2.62	
Kadın Çalışan Oran	0.35	0.23	0.63	0.30	0.69	1.00	1.00	3.00	2.62	1.59	4.93	2.71	
Doğum izni kullanılan çalışanlar	0.22	0.21	0.22	0.22	0.28	0.22	0.33	1.00	1.00	1.44	2.00	1.26	
Düzenlenen Eğitimler (saat)	0.30	0.38	0.50	0.44	0.44	0.38	0.38	1.00	1.00	1.00	2.62	2.00	
Yönetim Kurulunda Kadın Oranı	0.38	0.24	0.35	0.24	0.63	1.00	0.63	0.69	1.00	1.00	2.62	2.62	
Çalışan veya müşteri Memnuniyeti Anketi Oranı (%)	0.20	0.22	0.31	0.40	0.33	0.22	0.20	0.50	0.38	0.38	1.00	1.00	
Yıllık Etik İle İlgili Eğitim Süresi Saat (Bir kişiye verilen Eğitim)	0.26	0.22	0.28	0.24	0.44	0.38	0.37	0.79	0.50	0.38	1.00	1.00	
Toplam	4.919	7.170	8.650	8.673	16.630	14.287	17.441	33.945	21.625	22.320	37.084	31.850	

Şekil 3. AHP Karar Matrisi

(Şekil 4). Normalize karar matrisini ifade etmektedir. Normalize işlemi doğrusal normalizasyon ile yapılmıştır. Doğrusal normalizasyon aşamasında sütun toplamları ilgili satırlara bölünerek oluşmaktadır. Sütun toplamlarının 1 değeri olması gerekmektedir. Satır toplamlarının toplam kriter sayına bölünmesi ile kriter ağırlıkları bulunmuştur.

Kriterler	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12	Toplam	Kriter Ağırlığı
Karbon ayak izi (TonCo2e)	0.20	0.37	0.26	0.15	0.24	0.20	0.17	0.14	0.15	0.12	0.13	0.12	2.24	0.187
Fosil Enerji Kullanımları (doğalgaz-MWh)	0.08	0.14	0.15	0.30	0.16	0.14	0.25	0.14	0.12	0.19	0.13	0.14	1.93	0.161
Atık Miktarı (Ton)	0.09	0.11	0.12	0.12	0.14	0.18	0.09	0.14	0.09	0.13	0.09	0.11	1.40	0.117
Elektrik Tüketimi MWh	0.16	0.05	0.12	0.12	0.18	0.11	0.19	0.13	0.11	0.19	0.07	0.13	1.56	0.130
Toplam Su Tüketimi (M3)	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.08	0.11	0.11	0.07	0.08	0.07	0.84	0.070
Yaşanan İş Kazası	0.07	0.07	0.04	0.07	0.06	0.07	0.06	0.14	0.12	0.04	0.13	0.08	0.95	0.0796
Kadın Çalışan Oran	0.07	0.03	0.07	0.03	0.04	0.07	0.06	0.09	0.12	0.07	0.13	0.09	0.88	0.0732
Doğum izni kullanılan çalışanlar	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.41	0.0339	
Düzenlenen Eğitimler (saat)	0.06	0.05	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.07	0.06	0.55	0.0460
Yönetim Kurulunda Kadın Oranı	0.08	0.03	0.04	0.03	0.04	0.07	0.04	0.02	0.05	0.04	0.07	0.08	0.59	0.049
Çalışan veya müşteri Memnuniyeti Anketi Oranı (%)	0.04	0.03	0.04	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.31	0.026
Yıllık Etik İle İlgili Eğitim Süresi Saat (Bir kişiye verilen Eğitim)	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.34	0.028
Toplam	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	12.00	1.000

Şekil 4. Doğrusal Normalizasyon ve Kriter Ağırlıklarının Bulunması

(Şekil 5). ESG Parametrelerinin Çevresel, Sosyal ve Yönetişimsel açıdan karar mekanizmasına etkisini ifade etmektedir. Her bir kriterin karar üzerine etkisi aşağıdaki şekilde görülmektedir.

ESG Parametre	Kriter	Kriter Ağırlığı	Yüzde
Çevresel	Karbon ayak izi (TonCo2e)	19%	66.46%
	Fosil Enerji Kullanımları (doğalgaz-MWh)	16%	
	Atık Miktarı (Ton)	12%	
	Elektrik Tüketimi MWh	13%	
	Toplam Su Tüketimi (M3)	7%	
Sosyal	Yaşanan İş Kazası	8%	23.27%
	Kadın Çalışan Oran	7%	
	Doğum izni kullanılan çalışanlar	3%	
	Düzenlenen Eğitimler (saat)	5%	
Yönetişimsel	Yönetim Kurulunda Kadın Oranı	5%	10.27%
	Çalışan veya müşteri Memnuniyeti Anketi Oranı (%)	3%	
	Yıllık Etik İle İlgili Eğitim Süresi Saat (Bir kişiye veriler)	3%	
Toplam		100%	100%

Şekil 5. Kriterlerin Ağırlıklarının Belirlenmesi

(Şekil 6). Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra VIKOR yöntemi (Çelikkbilek ve Özdemir, 2018) karar matrisine kriter ağırlıkları ve kriter yönü belirleme işlemi yapılmıştır. Kriter yönü: bir kriterin karar mekanizmasında karar etkisini ifade etmektedir. Maliyet yönlü kriterler minimum ve fayda yönlü kriterler ise maksimum olması istenmektedir. Örneğin; Kriter 1 Karbon emisyonları maliyet yönlü olup, bu değer minimum olması en iyi çözümün elde edilmesine için önemli bir durumdur.

1. Kriter Ağırlıkları ve Kriter Yönü												
Kriter Ağırlıkları	0.19	0.16	0.12	0.13	0.07	0.08	0.07	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03
Kriter Yönü	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
Alternatif/Kriter	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12
A	1843.01	0.67	0.98	1.55	8.79	0.00	0.11	0.07	41.41	25.00	82.00	0.34
B	551.40	2549.22	12499.59	831.21	5.45	0.00	0.16	0.04	11.68	0.22	86.00	1.00
C	126.77	0.07	175.34	66.79	219.37	0.01	0.10	0.01	2.56	37.50	59.00	0.06
D	20.58	0.56	0.10	1.93	26.48	0.01	0.18	0.05	42.20	0.25	57.00	3.85
E	727.83	4.10	0.50	10.43	961.24	0.04	0.18	0.01	33.61	0.13	91.00	1.62
F	35.84	0.16	0.37	11.86	4.46	0.02	0.15	0.06	13.19	0.00	70.00	0.00

Şekil 6. VIKOR Kriter Ağırlıkları ve Kriter Yönünün Belirlenmesi

(Şekil 7). Her bir kriter için en iyi ve kötü değerler belirlenmiştir. En iyi değer F_i^* , en kötü değer ise F_i^- olarak ifade edilmiştir.

2. En İyi ve En Kötü Değerlerin Belirlenmesi												
f_i^* =En İyi Değer												
f_i^- = En Kötü Değer												
Kriter Ağırlıkları	0.19	0.16	0.12	0.13	0.07	0.08	0.07	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03
Kriter Yönü	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
Alternatif/Kriter	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12
A	1843.01	0.67	0.98	1.55	8.79	0.00	0.11	0.07	41.41	25.00	82.00	0.34
B	551.40	2549.22	12499.59	831.21	5.45	0.00	0.16	0.04	11.68	0.22	86.00	1.00
C	126.77	0.07	175.34	66.79	219.37	0.01	0.10	0.01	2.56	37.50	59.00	0.06
D	20.58	0.56	0.10	1.93	26.48	0.01	0.18	0.05	42.20	0.25	57.00	3.85
E	727.83	4.10	0.50	10.43	961.24	0.04	0.18	0.01	33.61	0.13	91.00	1.62
F	35.84	0.16	0.37	11.86	4.46	0.02	0.15	0.06	13.19	0.00	70.00	0.00
f_i^* =En İyi Değer	20.58	0.07	0.10	1.55	4.46	0.00	0.18	0.07	42.20	37.50	91.00	3.85
f_i^- = En Kötü Değer	1843.01	2549.22	12499.59	831.21	961.24	0.04	0.10	0.01	2.56	0.00	57.00	0.00

Şekil 7. VIKOR En İyi ve En Kötü Değerlerin Belirlenmesi

(Şekil 8). Doğrusal normalizasyon kullanılarak normalize matris elde edilmiştir. İşlemlerden sonra her bir kriter için en yüksek değere sahip olan alternatif 1 değerini almıştır. Veriler 0-1 arasına sıkıştırılmıştır.

3. Normalizasyon ve Normalize Matris (R)												
Doğrusal Normalizasyon Kullanılmıştır.												
Kriter Ağırlıkları	0.19	0.16	0.12	0.13	0.07	0.08	0.07	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03
Kriter Yönü	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
Alternatif/Kriter	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12
A	1.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.030	0.862	0.000	0.020	0.333	0.265	0.911
B	0.291	1.000	1.000	1.000	0.001	0.000	0.206	0.458	0.770	0.994	0.147	0.740
C	0.058	0.000	0.014	0.079	0.225	0.115	1.000	1.000	1.000	0.000	0.941	0.985
D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	0.138	0.000	0.293	0.000	0.993	1.000	0.000
E	0.388	0.002	0.000	0.011	1.000	1.000	0.074	0.950	0.217	0.997	0.000	0.579
F	0.008	0.000	0.000	0.012	0.000	0.493	0.428	0.160	0.732	1.000	0.618	1.000

Şekil 8. VIKOR Normalizasyon ve Normalize Matris

(Şekil 9). Normalize matrisin kriter ağırlıkları ile ağırlıklandırıldığı matrisi ifade etmektedir. AHP Metodu ile bulunan kriter ağırlıkları ile Normalize karar matrisindeki değerler çarpılarak değerler bulunmuştur.

4. Normalize Karar Matrisinin Ağırlıklandırılması													
Kriter Ağırlıkları	0.19	0.16	0.12	0.13	0.07	0.08	0.07	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03
Kriter Yönü	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
Alternatif/Kriter	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12	
A	0.187	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.063	0.000	0.001	0.016	0.007	0.026	0.303
B	0.054	0.161	0.117	0.130	0.000	0.000	0.015	0.016	0.035	0.049	0.004	0.021	0.601
C	0.011	0.000	0.002	0.010	0.016	0.009	0.073	0.034	0.046	0.000	0.024	0.028	0.253
D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.011	0.000	0.010	0.000	0.049	0.026	0.000	0.097
E	0.073	0.000	0.000	0.001	0.070	0.080	0.005	0.032	0.010	0.049	0.000	0.016	0.337
F	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.039	0.031	0.005	0.034	0.049	0.016	0.028	0.206

Şekil 9. Ağırlıklandırılmış Karar Matrisi

(Şekil 10). Ağırlıklandırılmış karar matrisini üzerinde S_i ve R_i değerleri bulunmuştur. S_i ve R_i değerleri VIKOR yöntemi kısmındaki, Denklem 7'deki formül yardımı ile hesaplanmıştır.

5. S_i ve R_i Değerlerinin Bulunması														
Alternatif/Kriter	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5	Kriter 6	Kriter 7	Kriter 8	Kriter 9	Kriter 10	Kriter 11	Kriter 12	S_i	R_i
A	0.187	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.063	0.000	0.001	0.016	0.007	0.026	0.303	0.187
B	0.054	0.161	0.117	0.130	0.000	0.000	0.015	0.016	0.035	0.049	0.004	0.021	0.601	0.161
C	0.011	0.000	0.002	0.010	0.016	0.009	0.073	0.034	0.046	0.000	0.024	0.028	0.253	0.073
D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.011	0.000	0.010	0.000	0.049	0.026	0.000	0.097	0.049
E	0.073	0.000	0.000	0.001	0.070	0.080	0.005	0.032	0.010	0.049	0.000	0.016	0.337	0.080
F	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.039	0.031	0.005	0.034	0.049	0.016	0.028	0.206	0.049

Şekil 10. S_i ve R_i Değerlerinin Bulunması

(Şekil 11). S^* ve S^- ve R^* ve R^- değerlerinin hesaplandığı bölümdür. Bu değerler bulunurken Denklem 8'de yer alan formül kullanılmıştır. S^* Değeri minimum S_i değerini, S^- değeri maksimum S_i değerini, R^* değeri minimum R_i değerini, R^- değeri maksimum R_i değerini ifade etmektedir.

Alternatif/ S_i, R_i	S_i	R_i
A	0.303	0.187
B	0.601	0.161
C	0.253	0.073
D	0.097	0.049
E	0.337	0.080
F	0.206	0.049
S^* ve R^*	0.097	0.049
S^- ve R^-	0.601	0.187
S^*	0.097	
S^-	0.601	
R^*	0.049	
R^-	0.187	

Şekil 11. S^* , S^- ve R^* , R^- Değerleri

(Şekil 12). Q_i değerlerinin hesaplandığı bölümdür. Q_i değerleri $q=0,00, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00$ değerleri için hesaplanmıştır.

6. Q_i Değerinin Hesaplanması							
Alternatif/ S_i, R_i	S_i	R_i	$Q_i (q=0,00)$	$Q_i (q=0,25)$	$Q_i (q=0,50)$	$Q_i (q=0,75)$	$Q_i (q=1,00)$
A	0.303	0.187	1.000	0.852	0.704	0.556	0.408
B	0.601	0.161	0.811	0.858	0.906	0.953	1.000
C	0.253	0.073	0.178	0.211	0.244	0.276	0.309
D	0.097	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E	0.337	0.080	0.224	0.287	0.350	0.413	0.476
F	0.206	0.049	0.002	0.056	0.109	0.162	0.216

Şekil 12. Değişik Q_i Değerlerine Göre Çözüm

(Şekil 13). Q_i değerlerine göre alternatiflerin sıralanma işlemi yapılmıştır. Alternatifler değişen q değerlerine göre sıralanmıştır.

7. Alternatiflerin Bulunması ve Koşulların Denetlenmesi												
Alternatif/Si,Ri	Si	Ri	Sıralama	Qİ (q=0,00)	Sıralama	Qİ (q=0,25)	Sıralama	Qİ (q=0,50)	Sıralama	Qİ (q=0,75)	Sıralama	Qİ (q=1)
A	0.303	0.187	6	1.000	6	0.852	5	0.704	5	0.556	4	0.408
B	0.601	0.161	5	0.811	5	0.858	6	0.906	6	0.953	6	1.000
C	0.253	0.073	3	0.178	3	0.211	3	0.244	3	0.276	3	0.309
D	0.097	0.049	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000
E	0.337	0.080	4	0.224	4	0.287	4	0.350	4	0.413	5	0.476
F	0.206	0.049	2	0.002	2	0.056	2	0.109	2	0.162	2	0.216

Şekil 13. Q_i Değerlerine Göre Sıralama

Tablo 2 her bir q değeri için 2 koşul sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar, denklem 9 ve denklem 10 'da belirtilmiştir. Bu koşulların incelenmesinin yapıldığı şekil aşağıdaki gibidir.

Tablo 2. VIKOR Yöntemi Koşulların Test Edilmesi

	Qİ (q=0,00)	Qİ (q=0,25)	Qİ (q=0,50)	Qİ (q=0,75)	Qİ (q=1)
Q(A2)	0.002	0.056	0.109	0.162	0.216
Q(A1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q(A2)-Q(A1)	0.002	0.056	0.109	0.162	0.216
DQ=1/(6-1)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
*Koşul 1	Sağlamadı	Sağlamadı	Sağlamadı	Sağlamadı	Sağladı
**Koşul 2	Sağladı	Sağladı	Sağladı	Sağladı	Sağladı

Tablo 3 koşulların sağlandığı değer Q_i (q=1) değeridir. Bunun doğrultusunda Tedarikçiler arasında en iyi sürdürülebilirlik skorunu alan şirket D Şirketidir. Genel sıralamanın olduğu sonuç tablosu aşağıdaki gibidir. Sonuç: q değeri 1 için Her iki koşulda sağlayan D şirkettir. D şirketinin en iyi performansla sahip olması en yüksek kriter ağırlığına sahip olan iki kriter içinde en düşük değere sahip olmasıyla örtüşmektedir. Bu kriterler karbon ayak izi miktarı ve Fosil yakıt kullanım oranı kriterleridir. Q değeri, en düşük olan şirket performansı en yüksek olandır. Q değeri 1'e yaklaştıkça performans kötüleşmektedir.

Tablo 3. VIKOR Yöntemine Göre Sonuçların Sıralanması

Genel Sıralama	Şirket	Qİ (q=1)
1	D	0.00
2	F	0.22
3	C	0.31
4	A	0.41
5	E	0.48
6	B	1.00

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, tedarikçilerin sürdürülebilirlik performansları, ESG parametreleri dikkate alınarak kriter ağırlıkları bulunurken AHP, Sıralama yapılırken ise VIKOR gibi çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın en temel amacı ise, tedarikçilerin sadece çevresel etkileriyle değil, sosyal ve yönetimsel etkileriyle de sürdürülebilirlik performanslarının kapsamlı bir şekilde incelenmesidir. Bu sebeple karbon ayak izi, fosil enerji kullanımı, atık yönetimi gibi çevresel verilerin yanında, kadın çalışan oranı, iş kazası sayısı ve etik eğitim süreleri gibi sosyal ve yönetimsel kriterler de kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. AHP yöntemi kullanılarak kriter ağırlıklarının belirlenmesi sağlanmıştır, VIKOR yöntemi ile tedarikçilerin sürdürülebilirlik performanslarına göre sıralanması sağlanmıştır. Sonuçlar, tedarikçi D'nin en yüksek sürdürülebilirlik performansı gösterdiğini, tedarikçi E ve B'nin ise performans açısından iyileştirme

gerektiren alanlarının bulunduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlar, tedarikçiler arasında sürdürülebilirlik yönünden kayda değer farklar olduğunu göstermekte ve bu farkların, sektördeki sürdürülebilirlik stratejilerinin daha fazla önem vermesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Çalışma, şirketlerin ESG performanslarını geliştirerek artırmaları ve daha sürdürülebilir bir yapıda tedarik zinciri yapısı oluşturmaları için karar vericilere rehberlik sağlayabilir. Yapılan çalışma sadece mevcut durumu ortaya koymaktadır. Aslında şirketler için sürdürülebilirlik alanında geliştirilmesi gereken noktalarını belirlenmesini sağlamaktadır.

Kaynakça

- Ni, K., Zhang, R., Tan, L., & Lai, X. (2024). How ESG Enhances Corporate Competitiveness: Mechanisms and Evidence. *Finance Research Letters*, 106249.
- Truant, E., Borlatto, E., Crocco, E., & Sahore, N. (2023). Environmental, social and governance issues in supply chains. A systematic review for business strategy. *Journal of Cleaner Production*, 140024.
- Li, L., Liu, X., & Hu, M. (2024). Textile and apparel supply chain coordination under ESG related cost-sharing contract based on stochastic demand. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140491.
- Kumar, M., Raut, R. D., Mangla, S. K., Chowdhury, S., & Choubey, V. K. (2024). Moderating ESG compliance between industry 4.0 and green practices with green servitization: Examining its impact on green supply chain performance. *Technovation*, 129, 102898.
- Tramarico, C. L., Salomon, V. A. P., & Marins, F. A. S. (2017). Multi-criteria assessment of the benefits of a supply chain management training considering green issues. *Journal of Cleaner Production*, 142, 249-256.
- Uygun, Ö., & Dede, A. (2016). Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 102, 502-511.
- Haliloğlu, M., & Odabaş, M. S. (2018). Çok ölçütlü karar vermede AHP yöntemi. *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 13-18.
- Uygurtürk, H., & Uygurtürk, H. (2014). Bütünleşik AHS-VIKOR yöntemi ile otel seçimi. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 103-117.
- Özdoğan, A. (2013). Farklı Normalizasyon Yöntemlerinin TOPSIS'te Karar Verme Sürecine Etkisi/The Effects of Different Normalization Methods to Decision Making Process in TOPSIS. *Ege Akademik Bakis*, 13(2), 245.
- Paksoy, S. (2017). Çok Kriterli Karar Vermede Güncel Yaklaşımlar, Karahan Kitabevi, 1. Baskı, Adana.
- Ömürbek, N., Karaatlı, M., & Yetim, T. (2014). Analitik hiyerarşi sürecine dayalı TOPSIS ve VIKOR yöntemleri ile ADİM üniversitelerinin değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (31.1), 189-207.
- İNCEKARA, Ç. Ö. (2018). Ülkemizdeki enerji santral yatırımlarının AHP yöntemi ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 185-196.
- Çelikkilek, Y., & Özdemir, M. (2018). Çok kriterli karar verme yöntemleri. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

**YENİLENEBİLİR ENERJİ VE KARBON VERGİLERİ: BİBLİYOMETRİK BİR ANALİZ****Büşra YILMAZ-ÜSTÜNER¹**

¹Aksaray Üniversitesi, İİBF, Maliye Bölümü, Aksaray, Türkiye
¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8837-6587>

Süleyman BOLAT²

²Aksaray Üniversitesi, İİBF, Maliye Bölümü, Aksaray, Türkiye
²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5635-7322>

Murat BELKE³

³Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü, Burdur, Türkiye
³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3299-7162>

Özet

Bu çalışma, karbon vergileri ve yenilenebilir enerji alanındaki literatürü bibliyometrik analiz yöntemiyle ele almaktadır. Çalışma, 1993-2024 döneminde yapılan bilimsel araştırmaları kapsamaktadır. Web of Science veri tabanından seçilen 790 makale üzerinde gerçekleştirilen bu analiz, karbon vergileri ve yenilenebilir enerji konularını birlikte değerlendirerek detaylandırmıştır. Bibliyometrik yöntemlerle anahtar kelime analizi, akademik iş birliği ağları, yazar ağları, ülke ağları, akademik dergiler, kurumlar ve tematik haritalar incelenmiştir. Bulgular, bu iki temanın hem disiplinler arası bir perspektiften ele alındığını hem de geniş bir uluslararası iş birliğiyle desteklendiğini ortaya koymaktadır. Araştırma kapsamında ortaya çıkan ağ bağlantıları ve yazar iş birliği, sürecin disiplinler arası bir perspektiften ele alındığını ve ortak çalışma gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Vergileri, Yenilenebilir Enerji, Bibliyometrik Analiz

RENEWABLE ENERGY AND CARBON TAXES: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS**Abstract**

This study examines the literature on carbon taxes and renewable energy through bibliometric analysis. The study covers scientific research conducted in the period 1993-2024. This analysis of 790 articles, sourced from the Web of Science database, examines the interconnected themes of carbon taxes and renewable energy. We used bibliometric methods, including keyword, collaboration, author, country, journal, and institutional analysis, as well as thematic mapping. The findings reveal both themes benefit from an interdisciplinary perspective and extensive international collaboration. The network connections and author collaboration that emerged within the scope of the research show that the process is handled from an interdisciplinary perspective and meets the requirements for collaborative work.

Keywords: Carbon Taxes, Renewable Energy, Bibliometric Analysis

Giriş

Karbon vergileri, iklim değişikliğini hafifletmede, karbon salınımlarını azaltmada, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerjiye geçişi hızlandırmada kilit bir araç olarak kabul edilmektedir. Bu vergiler, fosil yakıtların fiyatlarını artırarak karbon emisyonlarının maliyetini içselleştirmekte, yenilenebilir enerji yatırımlarına dönüşümü hızlandırmakta (Suzuki ve Ishiwata, 2022) ve yenilikçi yatırımları teşvik etmektedir (Clancy ve Moschini, 2018). Ayrıca çevresel maliyetleri ekonomik sistemlere entegre ederek enerji verimliliğini artırmayı ve temiz enerji teknolojilerini teşvik etmeyi amaçlamaktadır (IMF, 2019). İlave olarak vergilere ilişkin politika tercihleri, enerji tüketimini ve yoğunluğunu azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlayabilmekte ve yenilenebilir enerji kullanımını artırabilmektedir (Bashir et al., 2021; 2022). Özellikle

gelişmiş ekonomilerde, karbon vergileri teknolojik yenilikleri ve temiz enerji yatırımlarını desteklemek için güçlü bir teşvik mekanizması sunmaktadır (Yin et al., 2024). Karbon vergilerinde artış, karbon salınımını azaltmasının yanında yarattığı gelir etkisi ile yenilenebilir enerji yatırımları için finansman yaratabilmektedir (Ma vd., 2022).

Karbon vergilerinin uygulanması dünya çapında farklılık göstermektedir. Son veriler, karbon vergilerinin veya emisyon ticareti sistemlerinin çok sayıda ülkede aktif veya değerlendirme aşamasında olduğunu göstermektedir. OECD'ye göre, 2021-2023 yılları arasında 79 ülkede açık karbon fiyatlandırma araçları mevcuttur ve küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %82'sini kapsamaktadır. Ancak, bu önlemlerin etkinliği vergi oranına ve vergi tabanının ne kadar kapsamlı olduğuna bağlıdır. Etkilerini en üst düzeye çıkarmak için bazı bölgeler karbon vergilerini yenilenebilir enerji sübvansiyonlarıyla birleştirerek emisyonları azaltmak ve temiz enerjiyi teşvik etmek için dengeli bir yaklaşım oluşturmaktadır (OECD, 2024).

Karbon vergileri ile yenilenebilir enerji arasındaki ilişki konusunda şimdiye kadar bibliyometrik analiz yöntemi kullanan kapsamlı bir literatür incelemesi yayınlanmamıştır. Bu doğrultuda çalışmanın temel amacı, karbon vergileri ve yenilenebilir enerji üzerine yapılan 1993-2024 dönemindeki 790 yayımlanmış bilimsel çalışmanın bibliyometrik bir analizini ortaya koymaktır. Bibliyometrik analiz yöntemi, araştırma konusundaki nitel ve nicel değişiklikleri tanımlamak için kullanılan bir yöntem olmasının ötesinde, ilgili literatüre geniş bir bakış açısı sağlayarak yazarlar, dergiler, atıf kalıpları ve epistemolojik yönelimlerdeki anlamlı yapıları ve kalıpları tespit etmeyi sağlamaktadır (De Bakker vd., 2005). Bibliyometrik analiz yöntemi, mevcut literatürdeki araştırma eğilimlerini değerlendirmek ve araştırma boşluklarının gelecekteki çalışmaların gelişimini nasıl yönlendirebileceğini ortaya koymak için güçlü bir araçtır. Çalışmada veritabanı olarak Web of Science (WoS) kullanılmıştır. WoS, bibliyometrik çalışmalar için büyük ve kullanışlı veri sağlamaktadır. Ayrıca kör-hakem sürecine sahip kapsamlı bir dergi listesi sunan güvenilir bir veritabanıdır (Meho ve Yang, 2007; Tong ve Amalia Rivai, 2024). Çalışma, karbon vergileri ve yenilenebilir enerji alanlarındaki ilk bibliyometrik çalışma olmasının yanısıra bu alandaki gelişimi değerlendirerek, literature yön veren en etkili ve üretken yazarları, dergileri, araştırma ağlarını ve kurumları tespit ederek ve literatürdeki ilgili konuları ve özel araştırma temalarını belirlemeye çalışarak literatüre farklı bir bakış açısı sağlayabilmekte ve gelecekteki çalışmalara yön verebilmektedir.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünü takip eden ikinci bölümde, çalışmada kullanılan bibliyometrik analiz yöntemi ve uygulamada kullanılan veri seçimi tanıtılmaktadır. Üçüncü bölümde bibliyometrik analiz bulguları yer almaktadır. Çalışmanın sonuç bölümünde ise bulgular değerlendirilmekte, politika çıkarımları ve çalışmanın kısıtları yer almaktadır.

Yöntem

Çalışmada Web of Science (WoS) veri tabanından alınan, "carbon tax" and "renewable energy" konularını birlikte içeren uluslararası makalelerin özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Her iki konuyla ilgilenen bilimsel makaleler, çalışmanın evrenini oluşturmaktadır. Örneklemeye dahil edilen makaleler 07.11.2024 tarihinde iki aşamalı olarak belirlenmiştir. İlk aşamada "carbon tax*" OR "carbon emission tax*" OR "CO2 tax*" OR "CO2 emission tax*" OR "carbon dioxide emission tax*" AND "renewable energ*" OR "clean energ*" OR "sustainable Energ*" OR "alternative Energ*" anahtar kelimeleri kullanılarak Topic (Searches title, abstract, keyword plus, and author keywords) kapsamında tarama yapılmıştır. Yıldız işaretlerinin (*) kullanımı, bu temel temalar altına giren çeşitli terminolojilerin ve ifadelerin dahil edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu aşamada 961 dokümana ulaşılmıştır. İkinci aşamada ise doküman türü olarak makale ve yayın dili olarak İngilizce seçilerek filtreleme yapılmıştır. Yıl olarak yapılan filtrelemede yalnızca 2025 yılı hariç tutularak 1993-2024 olarak filtrelenmiştir. Nihai aşamada WoS veri tabanından 790 doküman analize tabi tutulmuştur. Bibliyometrik analiz için BibExcel, CiteSpace, VOSviewer ve R Studio gibi farklı programlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, çeşitli görselleştirme seçeneklerine sahip olması ve farklı ağ analizlerini kolayca sunabilmeleri nedeniyle R paketinin Biblioshiny ara yüzü ve VOSviewer tercih edilmiştir. Biblioshiny, R Studio yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen, Aria ve Cuccurullo (2017) tarafından geliştirilen Bibliometrix paketidir.

Bulgular

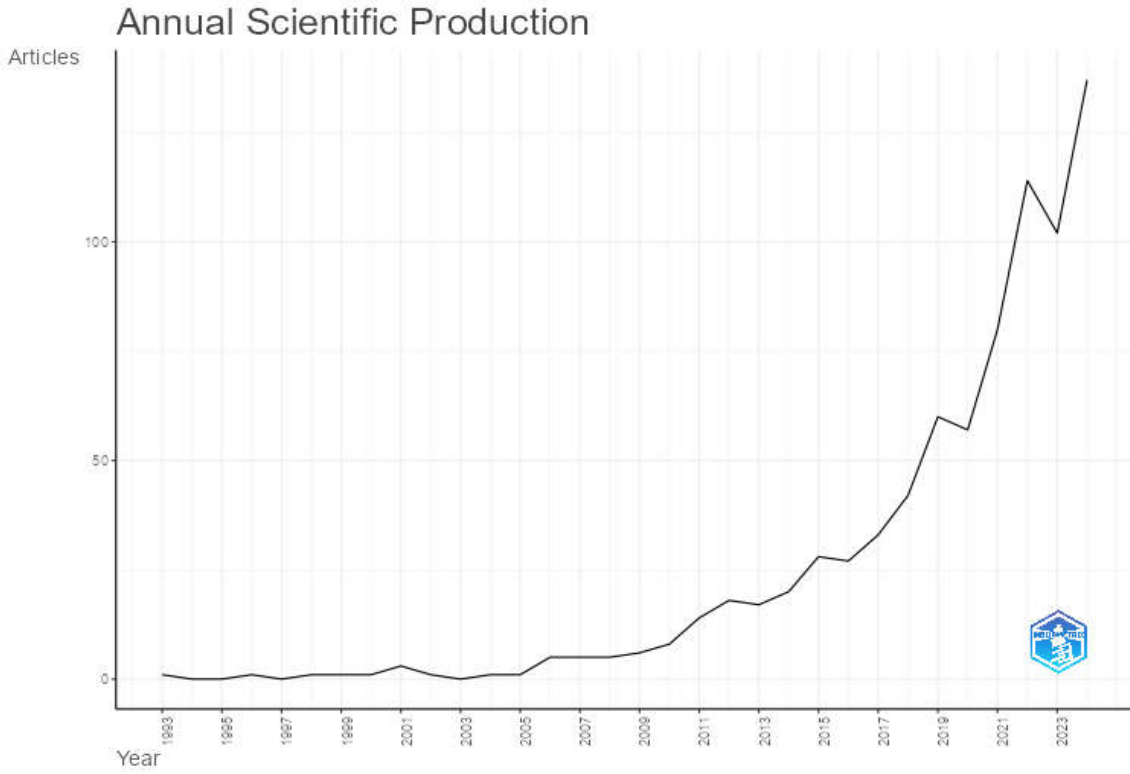
Karbon vergileri ve yenilenebilir enerji konularında WoS veri tabanında yer alan makaleler dikkate alındığında Tablo 1’de yer alan temel bilgiler elde edilmiştir. Tabloya göre ilgili veri tabanında yer alan yayınlar toplam 30 yılı aşkın bir dönemi kapsamaktadır. Bununla birlikte toplam 258 farklı kaynaktan 790 makale bulunmaktadır. Yayın sayısının yıllık artış oranı yaklaşık %17’dir. İlgili yayınlarda yayın başına düşen atıf sayısı ise yaklaşık %26’dır. Tüm bu verilerden hareketle karbon vergileri ve yenilenebilir enerji konularındaki çalışma konularının gelişmeye devam ettiğini söylemek mümkündür.

Tablo 1’de aynı zamanda yazar sayısının toplam 2432, yazarlar tarafından kullanılmış anahtar kelime sayısının ise 2394 olduğu görülmektedir. Bununla birlikte çok yazarlı yayınlarda yayın başına düşen yazar sayısı ortalama 3’tür. Yazar ve anahtar kelime sayısının fazla olması, araştırma alanındaki çeşitlilik ve iş birliği düzeyinin yansıması olarak değerlendirilmektedir. Yayın başına ortak yazar ve uluslararası ortak yazarlık yüzdesi verileri de benzer şekilde araştırmacılar arasındaki iş birliği modellerini yansıtmaktadır. Daha yüksek bir sayı daha fazla işbirlikçi çalışmaya işaret ederken, daha düşük bir sayı araştırmacıların bireysel olarak veya daha küçük gruplar halinde çalışma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu veriler, bilimsel araştırmaların giderek daha çok disiplini içeren ve uluslararası düzeyde yoğun iş birliklerine dayanan bir karaktere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Veri seti ile ilgili temel bulgular

Tanım	Sonuçlar
Zaman aralığı	1993:2024
Kaynaklar (Dergiler, Kitaplar, vd.)	258
Belgeler	790
Yıllık büyüme hızı (%)	17.2
Belge ortalama yaşı	4.51
Belge başına ortalama atıf sayısı	25.92
Kaynaklar	36167
Anahtar kelime artı (ID)	1396
Yazarların anahtar kelimesi (DE)	2394
Yazarlar	2432
Tek yazarlı belgelerin yazarları	59
Tek yazarlı belgeler	65
Belge başına ortak yazarlar	3.55
Uluslararası yazar iş birlikleri (%)	34.05

Karbon vergileri ve yenilenebilir enerji konularını kapsayan 790 makalenin yıllara göre dağılımı Şekil 1’de sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere 1993 yılında başlayan yayınlarda özellikle son on yılda dikkat çekici şekilde artış olmuştur. Bu artış iklim krizinin giderek daha görünür hale gelmesi, küresel sıcaklık artışına yönelik endişelerin büyümesi, iklim politikaları konularında yapılan Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası taahhütler, karbon fiyatlandırma mekanizmalarının yaygınlaşması, AB Yeşil Mutabakatı gibi büyük ölçekli politika değişiklikleri, temiz enerji sektöründe artan iş fırsatları ve iklim değişikliği araştırmalarına ayrılan kaynakların artması gibi konuların tüm dünya için çok daha fazla önemli hale gelmesinden kaynaklanmaktadır.

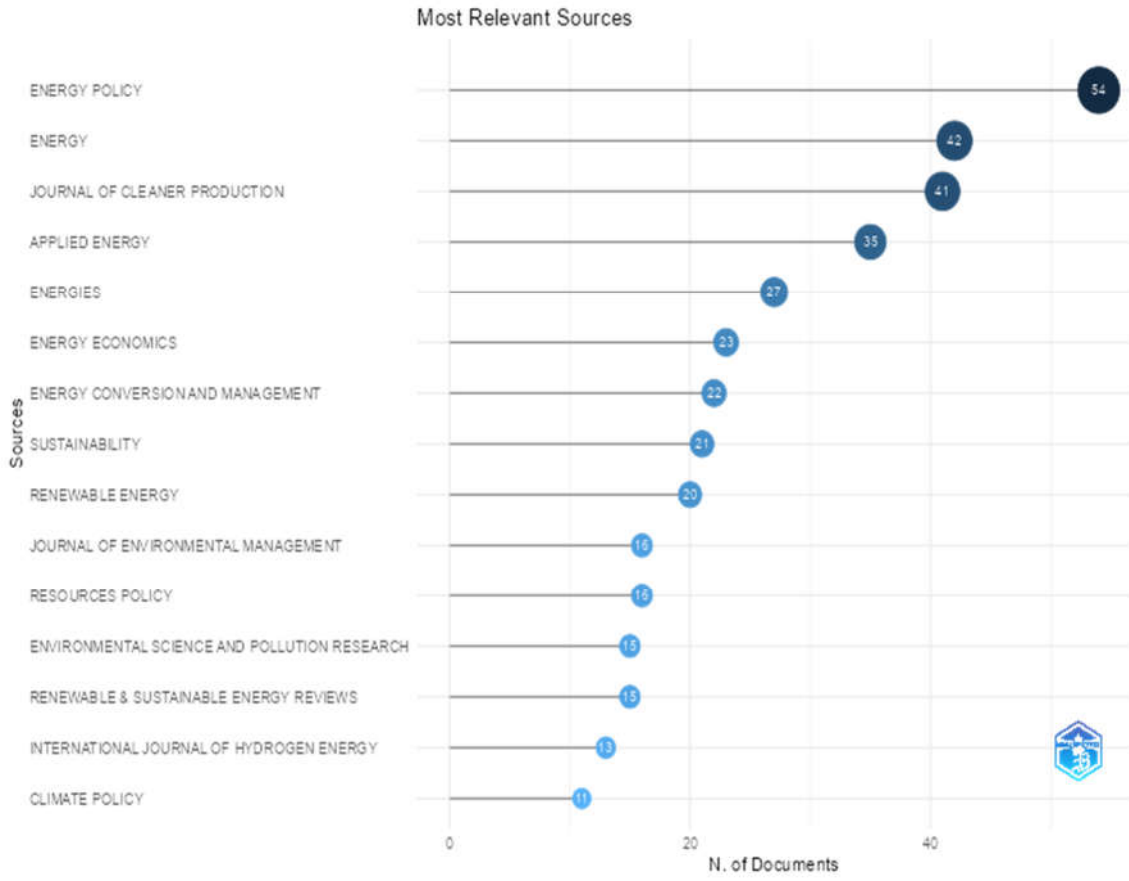


Şekil 1. Yıllık Bilimsel Makale Üretiminin Evrimi

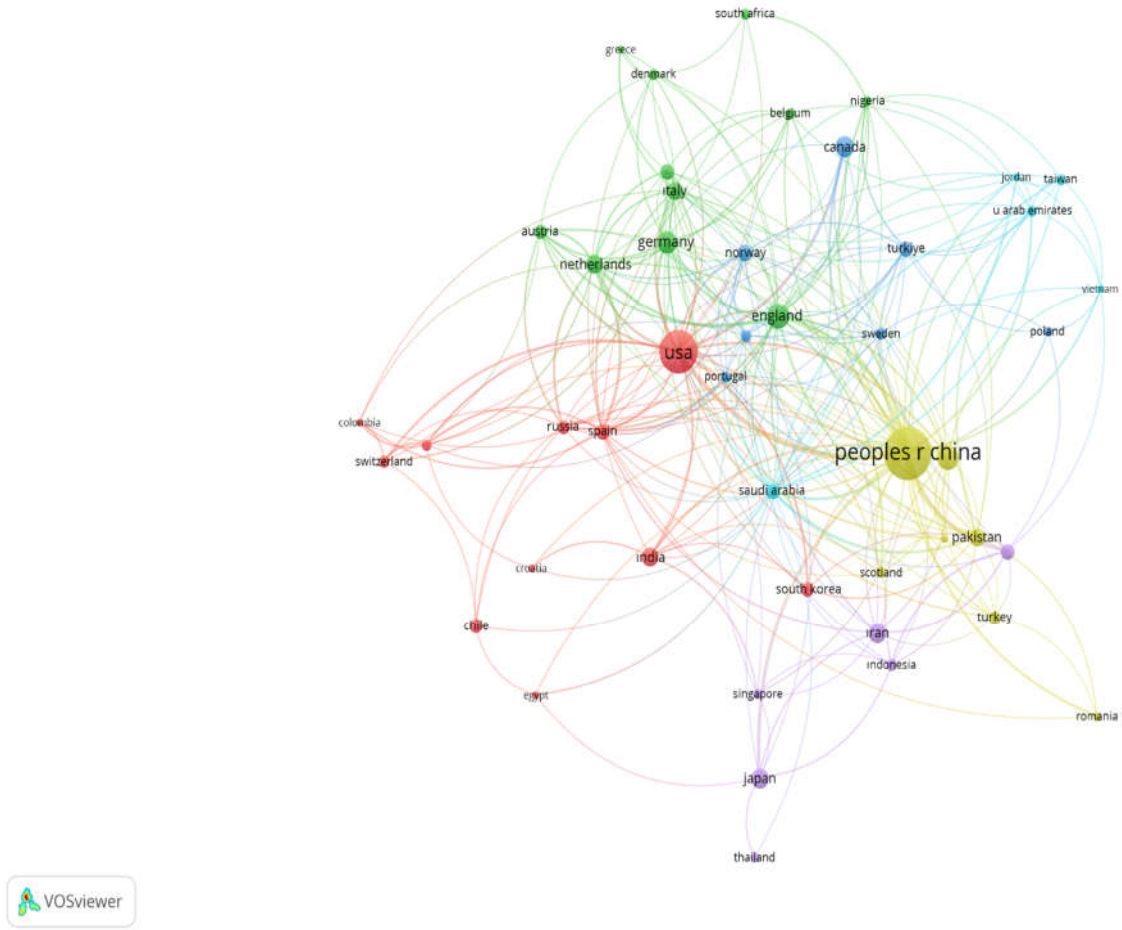
Karbon vergileri ve yenilenebilir enerji çalışma alanlarındaki en aktif dergiler ile ilgili olarak, Şekil 2'de 258 *Sources (Journals, Books, etc)*'dan ilk 15 dergi gösterilmektedir. Burada görüldüğü gibi bu konudaki ana dergiler, Energy Policy, Energy, Journal of Cleaner Production, Applied Energy ve Energies'dir.

Küresel ülke yazar iş birliği ağı, VOSviewer yazılım kullanılarak üretilmiştir. İncelenen şekilde bir düğüm bir ülkeyi sembolize ederken, düğümün boyutu ülkenin faaliyetini temsil etmektedir. İki ülke arasındaki eğri çizgi, ülkeler arasındaki yayın iş birliği ilişkisini göstermektedir. Eğrinin kalınlığı, ilgili ülkeler arasındaki iş birliğinin kapsamını göstermektedir. Bu analiz için belirli kriterler oluşturulmuştur. Çalışmaya yalnızca en az 5 atıf almış ve en az 5 yayını olan ülkeler dahil edilmiştir. Büyük düğümler, verimli ülkeleri göstermektedir. Şekilden açıkça görülmektedir ki Amerika Birleşik Devletleri ve Çin karşılıklı iş birliklerinin yoğun olduğu ülkelerdir. Çin'in diğer ülkelerle toplam bağlantı gücü (total link strength) 145 iken, ABD'nin diğer ülkelerle toplam bağlantı gücü 91'dir. Toplam bağlantı gücü, ortak görülme sıklığını temsil etmektedir (Şekil 3).

Bibliyografik çalışmalarda anahtar kelime incelemesi, bilimsel alanlardaki eğilimlerin ve değişimlerin tespitinde vazgeçilmez bir yöntemdir. Bununla birlikte, söz konusu analizin sağlıklı sonuçlar vermesi için veri setinin titiz bir elemeye geçirilmesi zorunludur. Zira benzer içeriğe sahip farklı terimler, araştırmacılar tarafından ayrı kavramlar olarak yorumlanabilmekte ve bu durum analiz sonuçlarının güvenilirliğini etkileyebilmektedir. Örneğin "CO2 emissions, CO2 emission, carbon dioxide emissions, carbon emissions" gibi kelimeler veya "carbon taxes, carbon tax, carbon taxation" kelimeleri aynı kelimeyi ifade etmesine rağmen ayrı ayrı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle anahtar kelime analizine geçmeden önce veri düzenleme ve benzer kelimeleri tek kelimeye birleştirme yapılmıştır. İlgili anahtar kelimeler baskın olduğunda diğer anahtar kelimeler görsel olarak geri planda ve daha küçük kalacaktır. Table 2'de ise en yaygın kullanılan 30 anahtar kelimenin kelime bulutu analizi sonucu bulunmaktadır. Bu analizde yer alan kelimelerin boyutları kullanılma sıklığını göstermektedir. Buna göre carbon taxes, renewable energy, CO2 emissions, energy policy, climate change ve sustainable development goals en çok kullanılan anahtar kelimeler olarak ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2. Karbon vergisi ve yenilenebilir enerji konusundaki en önemli 15 dergi



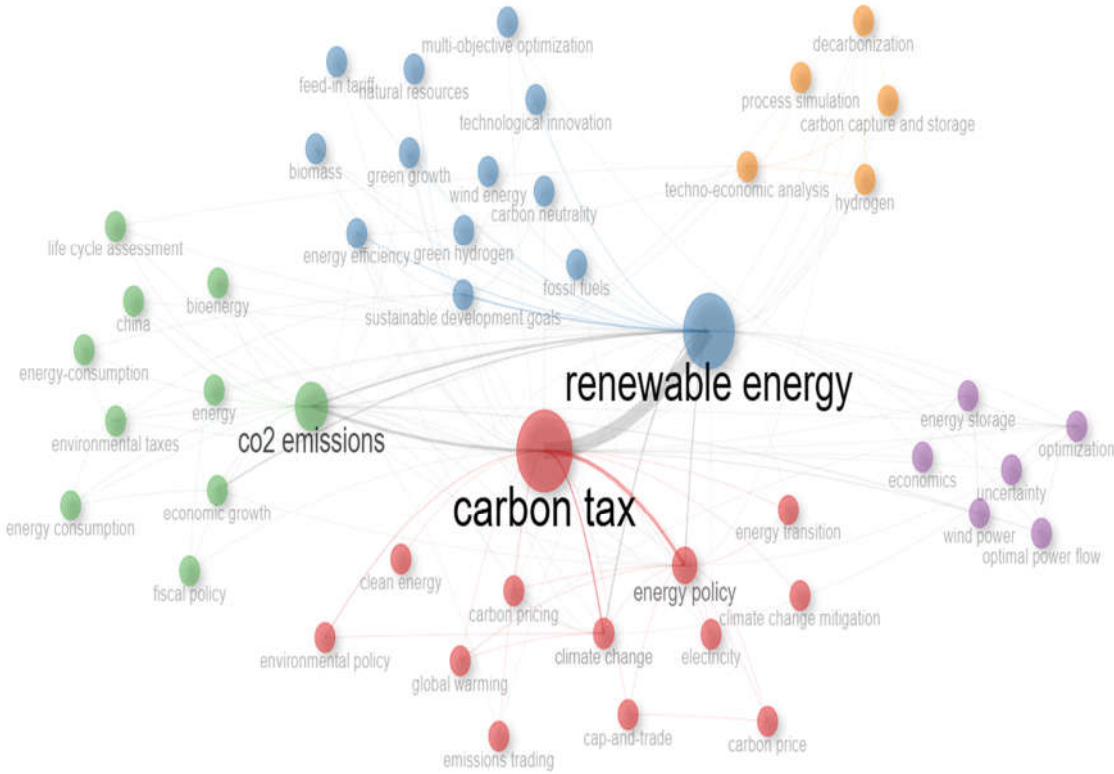
Şekil 3. Ortak yazarlık ağı analizi



Tablo 2. En fazla kullanılan anahtar kelimelerin bulut analizi

Anahtar Kelimeler	Sıklık
carbon taxes	183
renewable energy	167
CO2 emissions	101
energy policy	62
climate change	45
sustainable development goals	41
carbon pricing	25
energy efficiency	22
china	21
energy transition	21

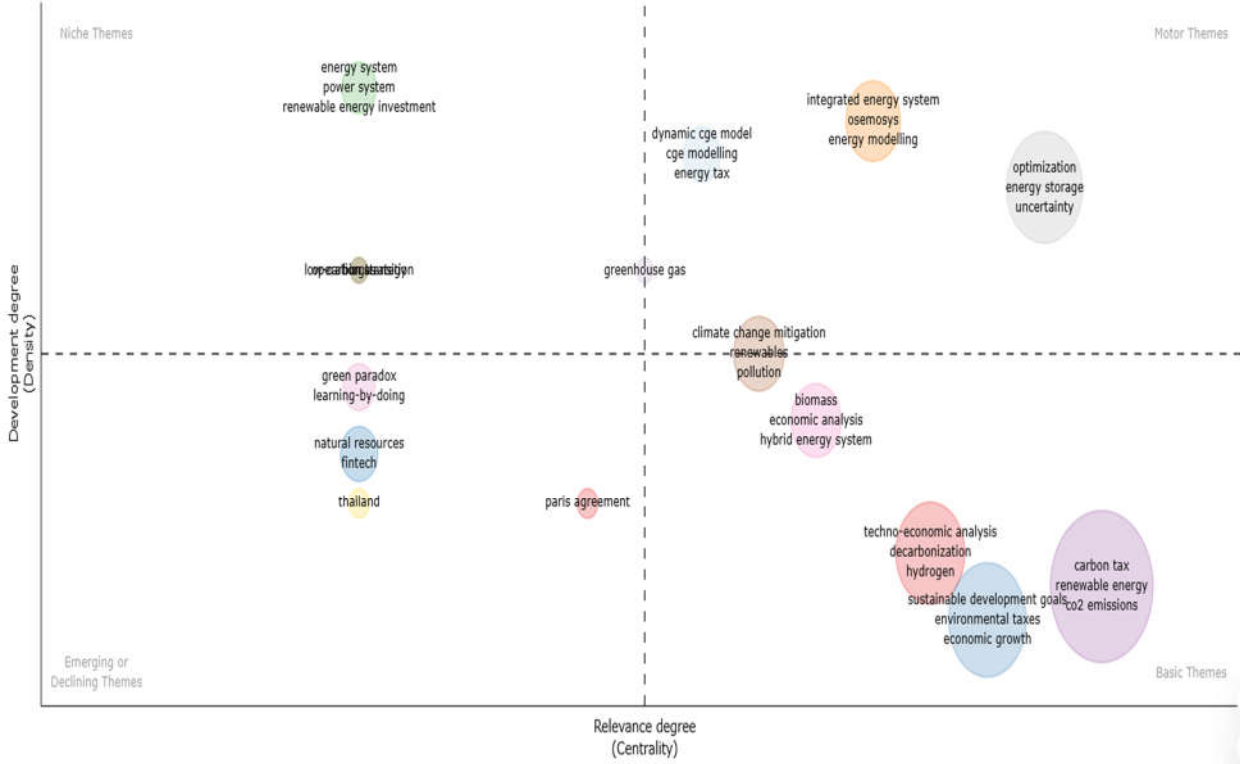
Şekil 4’de, yazarların kullandığı anahtar kelimelerin en yaygın kullanılanları ve bu kelimeler arasında ilişki ağı yer almaktadır. Şekilde yer alan renkler kümeleri, daire büyüklükleri frekansı ve aralarındaki çizgilerin kalınlığı ise iş birliği düzeyini göstermektedir. Buna göre ortaya çıkan küme büyüklüğü sırasıyla carbon tax, renewable energy and CO2 emissions olmuştur. Bu temel kümelerde kendi alt kümelerine ayrılmıştır.

**Şekil 4.** Anahtar sözcüklerin birlikte ortaya çıkma ağı

Şekil 5’te gösterilen iki boyutlu tematik harita yazarların anahtar kelimeleri ile belirlenen alanlardaki önemli temaları göstermektedir. Bibliyometrik analizin en önemli katkılarından biri olan temalar hakkında bilgi sahibi olunması bu konulara yönelik gelecekteki çalışmalar için fırsatlar sunmaktadır.

Basic themes (Low density and high centrality); Bir araştırma alanının köklü ve merkezi konularını temsil etmektedir. Ana kavramları vermekte ve literatürün en belirgin temalarını sunmaktadır. Carbon tax, renewable energy, CO2 emissions, sustainable development goals, economic growth bunlardan bazılarıdır. *Motor themes (High density and centrality);* Araştırma alanının dinamik ve ilerleyen unsurlarını içermektedir. Son yıllarda

yapılan çalışmalardaki trend olanlar, öne çıkan kavramlardır. Literatürde bir disiplinin gelişimine önemli ölçüde katkıda bulunan ana temalar olarak kabul edilmektedir. *Emerging or declining themes*: Daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyan az gelişmiş veya yeni ortaya çıkan temalardır. Genellikle ağlar arasında önemden yoksundurlar ve bir ağ içinde yavaş yavaş gelişirler. Bu alanlardaki temalar ilerde ya yok olacak ya da yükselişe geçecekleri temsil etmektedir. Green paradox, fintech, naturel resources bu tema içinde yer almaktadır. *Niche themes (High density and low centrality)*: potansiyeli olan, çalışılabilir temaları vermektedir. Az sayıda araştırmacının çalıştığı, detaylı ve uzmanlaşmış alanları temsil etmektedir.



Şekil 5. Tematik Harita

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma karbon vergileri ile yenilenebilir enerji arasındaki bilimsel çalışmaları ele alan, değerlendiren ve analiz eden ilk çalışmalardan birisidir. Çalışmada 1993-2024 yılları arasında Web of Science (WoS) veri tabanında yer alan 790 makalenin bibliyometrik analizi, bu iki alanın hem disiplinler arası bir perspektiften ele alındığını hem de geniş bir uluslararası iş birliğiyle desteklendiğini ortaya koymaktadır. Araştırma kapsamında ortaya çıkan ağ bağlantıları ve yazar iş birliği, sürecin disiplinler arası bir perspektiften ele alındığını ve ortak çalışma gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir.

Analiz sonuçlarına göre, karbon vergileri ve yenilenebilir enerji alanlarında yayın sayılarının yıllık büyüme oranının %17 seviyesinde artması, bu konuların giderek daha fazla önemsendiğini ve literatürde hızlı bir şekilde yayıldığını göstermektedir. Yayın başına düşen ortalama atıf oranlarının %26 seviyesine ulaşması, bu çalışmaların bilimsel etkisini ve alandaki önemini net bir şekilde yansıtmaktadır. Araştırma kapsamında en sık kullanılan anahtar kelimelerin arasında ise "carbon taxes", "renewable energy", "CO2 emissions" ve "sustainable development goals" gibi ifadeler yer almakta olup, bunların aynı zamanda tematik haritalamada literatürün en belirgin temalarını temsil ettiği görülmektedir. Yıllar içinde yapılan anahtar kelime analizleri, araştırma konularının genel temalardan daha spesifik ve derinlemesine alt konulara doğru gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Başlangıçtaki yaygın temaların yerini, "green paradox" ve "fintech" gibi yeni ve dinamik konular almaya başlamış görünmektedir. Bu eğilim, araştırma derinliğinin artmasına ve tematik çeşitliliğin önemli ölçüde zenginleşmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca ülke iş birliği analizlerinde karbon vergileri ve

yenilenebilir enerji alanındaki en üretken ülkeler Çin ve ABD'dir. Bu ülkelerin öne çıkması, akademik üretkenliklerinin yanı sıra uluslararası iş birliğinde oynadıkları merkezi rollerle de ilişkilidir.

Bulgular, karbon vergisi ve yenilenebilir enerji çalışmalarının bilimsel literatürdeki dinamik rolünü açığa çıkarmaktadır. Özellikle bu alanlardaki bilimsel üretimin güçlü bir uluslararası entegrasyona sahip olduğu, iş birliğine dayalı ağların gelecekte çok daha fazla disiplinleri kapsayacak şekilde genişleyeceği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar hem bilimsel katkının yoğunluğunu hem de yenilenebilir enerji politikaları ve karbon vergilerine yönelik mekanizmaların önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, özellikle bibliyometrik analiz araçları aracılığıyla sunulan tematik harita ve ağ analizleri, sadece mevcut eğilimleri ve gelişmeleri anlamakla kalmamış, aynı zamanda gelecekteki çalışmalar için yol gösterici olma potansiyeline sahip detaylı bir analiz sunmuştur. Bunun yanı sıra, bibliyometrik analizlerin tematik araştırma boşlukları ve yükselen tema alanlarını net bir şekilde ortaya koyması, araştırmacıların gelecek için stratejik konulara yönelmesini sağlayacak bir rehber niteliğindedir. Son olarak, analiz kapsamının yalnızca WoS veri tabanı ile sınırlı olması, çalışmanın kısıtlılıklarından biridir. Gelecekteki çalışmalarda Scopus, Google Scholar ve benzeri veri tabanlarının analize dahil edilmesi, daha kapsamlı bir perspektif sunabilir. Ayrıca araştırmanın yalnızca İngilizce dilinde yayımlanan çalışmalar ile sınırlandırılması farklı dillerde yayımlanan çalışmaların ihmal edilmesine neden olmaktadır. Gelecekteki çalışmaların diğer dilleri de dahil etmesi daha kapsayıcı bir analiz imkanı tanıyabilecektir. Bu durum, ulusal, bölgesel ve yerel bağlamdaki tematik farklılıkları ve detayları daha ayrıntılı şekilde ortaya çıkarılabilecektir. Gelecekteki çalışmaların daha disiplinler arası bir bakış açısı benimseyerek, ekonomi, çevre bilimi ve enerji politikaları gibi farklı alanlarla entegrasyonunun artırılması, sürdürülebilir bilimsel ilerlemeye katkı sağlayabilecektir.

Kaynakça

- Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bashir, M. F., Benjiang, M. A., Shahbaz, M., Shahzad, U. & Vo, X. V. (2021). Unveiling the heterogeneous impacts of environmental taxes on energy consumption and energy intensity: Empirical evidence from OECD countries. *Energy*, 226, 120366. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120366>
- Bashir, M. F., Ma, B., Bashir, M. A., Radulescu, M. & Shahzad, U. (2022). Investigating the role of environmental taxes and regulations for renewable energy consumption. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 1262–1284. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1962383>.
- Clancy, M. S. & Moschini, G. (2018). Mandates and the incentive for environmental innovation. *American Journal of Agricultural Economics*, 100(1), 198-219. <https://doi.org/10.1093/ajae/aax051>
- De Bakker, F. G. A., Groenewegen, P. & Den Hond, F. (2005). A bibliometric analysis of 30 years of research and theory on corporate social responsibility and corporate social performance. *Business and Society*, 44(3), 283–317. <https://doi.org/10.1177/0007650305278086>
- International Monetary Fund (IMF). (2019). Back to Basics: What is Carbon Taxation?. *Finance & Development*, 56(2), 6–9.
- Ma, N., Yin, G., Li, H., Sun, W., Wang, Z., Liu, G. & Xie, D. (2022). The optimal industrial carbon tax for China under carbon intensity constraints: a dynamic input–output optimization model. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 53191-53211. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19162-6>
- Meho, L. I. & Yang, K. (2007). Impact of data sources on citation counts and rankings of LIS faculty: web of science versus scopus and google scholar. *Journal of the American Society for Information Science Technology*, 58(13): 2105–2125. <https://doi.org/10.1002/asi.20677>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2024). Pricing greenhouse gas emissions 2024: gearing up to bring emissions down. *OECD Environmental Policy Papers*, No. 25. https://www.oecd.org/en/publications/pricing-greenhouse-gas-emissions-2024_b44c74e6-en.html.
- Suzuki, K. & Ishiwata, R. (2022). Impact of a carbon tax on energy transition in a deregulated market: A game-based experimental approach. *Sustainability*, 14(19), 12785. <https://doi.org/10.3390/su141912785>

Tong, L., & Amalia Rivai, F. (2024). The applications of the internet of things in smart cities governance: a bibliometric study. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/13511610.2024.2387594>

Yin, H.-T., Wen, J., Ma, J. & Chang, C.-P. (2024). Carbon tax: Catalyst or hindrance for renewable energy use in climate change mitigation? *Energy Strategy Reviews*, 51, 101273. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101273>.

**GÜNEŞ ENERJİSİ KULLANILARAK HİDROJEN ÜRETİMİ****Gamze GENÇ¹**¹ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye¹ ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-2161>**Özet**

Son yıllarda hava kirliliği ve sera gazı emisyonları vb. gibi olumsuz etkileri azaltmak üzere fosil bazlı olanların yerine alternatif ve temiz kaynaklara yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda, hidrojen daha çekici ve paha biçilmez, umut verici bir ikincil enerji kaynağı olmuştur. Hidrojen dünyada doğal olarak bulunmadığından, birincil enerji kaynakları kullanılarak çeşitli yöntemlerle üretilebilir. Hidrojen, kullanılan kaynağa bağlı olarak mavi, gri veya yeşil hidrojen gibi renklere ayrılmaktadır. Elektroliz veya elektrokimyasal işlemde gereken elektrik, yenilenebilir enerji (güneş PV veya rüzgar türbini gibi) gibi temiz bir enerji kaynağından sağlanıyorsa, yeşil hidrojen elde edilir. Öte yandan, kömür gazlaştırması veya metanın buhar reformu yoluyla fosil yakıtlardan hidrojen üretilmesi durumunda, karbon yakalama olması veya olmaması durumuna göre sırasıyla mavi veya gri olarak sınıflandırılabilir. Üretilen hidrojen miktarı, birincil enerji kaynağına ve üretim tekniklerine bağlı olarak değişir. Hem termal hem elektrik üretimi sağlayan güneş enerjisi gibi temiz enerji kullanan termokimyasal döngüler, yeşil ve büyük ölçekli hidrojen üretimi için en önemli adaydır. Bu çalışmada, enerji kaynaklarının ve üretim yöntemlerinin etkisini ortaya çıkarmak için güneş enerjisi sistemlerine dayalı hidrojen üretim performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmaların sonuçları, güneş esaslı hidrojen üretimi için entegre sistemlerin yüksek performansa sahip olduğunu ve hidrojen üretim yolunda verimli ve çevre dostu olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen enerjisi, Yeşil Hidrojen, Güneş Enerjisi, Hidrojen Üretimi.**SOLAR BASED HYDROGEN PRODUCTION****Abstract**

In recent years, the focus has been on alternative and clean sources instead of fossil-based ones to reduce negative impacts such as air pollution and greenhouse gas emissions, etc. In this context, hydrogen has been a more attractive and invaluable promising secondary energy source. Since hydrogen cannot be found on the earth naturally, it can be produced with different methods by using primary energy sources. Hydrogen can be classified as blue, gray, or green hydrogen depending on the used source. If the electricity required in the electrolysis or electrochemical process is supplied from a clean energy source such as renewable energy (such as solar PV or wind turbine), the hydrogen is called green hydrogen. On the other hand, in the case of producing hydrogen from fossil fuels via coal gasification or steam reforming of methane, it can be classified as blue or gray whether there is carbon capture or not, respectively. The amount of produced hydrogen varies depending on the primary energy source and production techniques. Thermochemical cycles that use clean energy such as solar energy, which provides both thermal and electrical generation, are the most important candidates for green and large-scale hydrogen production. In this study, a comparison of hydrogen production performances based on solar energy systems was considered to bring out the effect of energy sources and production methods. The results of the studies show that the integrated systems for solar-based hydrogen production have a high performance, and offer efficient and eco-friendly hydrogen production way.

Keywords: Hydrogen Energy, Green Hydrogen, Solar Energy, Hydrogen Production.**Giriş**

Her geçen gün nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte her geçen gün enerji tüketimi de hızlı bir şekilde artmaktadır. Enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımına bakıldığında en fazla kullanılan enerji

kaynağı fosil yakıtlardır. Ancak, fosil yakıtların kullanımı sonucunda da büyük oranda CO₂ emisyonları açığa çıkmaktadır ve bu gazların etkisiyle küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunlarda büyümektedir. İklim değişikliği, küresel sıcaklıkların yükselmesi, deniz seviyesinin yükselmesi, aşırı hava olaylarının sıklaşması ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Bu durum, tarım, su kaynakları ve ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle küresel olarak karbon salınımlarını azaltmak için güvenli, temiz ve güvenilir enerjiye olan talep artmaktadır. Bu nedenle son yıllarda birçok araştırmacı fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve yenilenebilir enerjilerin kullanımını geliştirmek için yeni, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları arama eğilimindedir. Yenilenebilir enerji kullanımı, sera gazı emisyonlarını azaltmanın yanı sıra tüm dünyadaki enerji talebini ve tüketimini karşılamak açısından da oldukça önemlidir. Bu nedenle, güneş, rüzgar, biyogaz ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji sistemleri giderek daha popüler ve verimli hale gelmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir enerji tedarikinde ve çevre dostu olması açısından gelecek vaat eden bir diğer enerji kaynağı ise hidrojenidir. Hidrojen, evrendeki en bol element olmasına rağmen Dünya'da genellikle serbest halde bulunmaz. Doğada serbest bulunmadığından dolayı birincil enerji kaynakları kullanılarak sudan üretilebilir ve bu nedenle ikincil enerji kaynağı olarak isimlendirilir. Hidrojen, yakıt hücrelerinde elektrik üretmek için kullanılabilir. Bu süreçte sadece su buharı ortaya çıkar, bu da hidrojeni çevre dostu bir yakıt yapar. Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz olmalarından dolayı arz ve talep arasında farklar meydana gelmektedir. Üretimin fazla talebin az olduğu saatlerde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen fazla elektrik özellikle hidrojen üretmek için kullanılarak, hidrojenle enerji talebinin yüksek olduğu üretimin az olduğu zamanlarda elektrik üretmek için kullanılabilir. Böylece, enerji sistemlerinin dengeli bir şekilde çalışması sağlanmış olur. Yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretimi, günümüzde enerji sektöründe büyük bir ilgi gören ve sürdürülebilir bir gelecek için umut vadeden bir konudur. Hidrojen nükleer santrallerden (Genc, 2010; Orhan vd, 2010; Asal & Acır, 2021), güneş (Touili, 2018; Boudries, 2013), rüzgar (Genc vd, 2012; Alavi vd. 2016), jeotermal (Balta vd. 2010; arayel vd. 2022), hibrit güneş/rüzgar (Qolipour, 2017; Ishaq vd. 2022) gibi farklı birincil kaynaklar üretilerek elde edilmektedir.

Sunulan bu çalışmada yukarıda da bahsedildiği gibi günümüzün en önemli enerji sorunlarından biri olan fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla önemli bir enerji kaynağı olan hidrojen ve hidrojenin güneş enerjisi destekli üretimi üzerine özet bir bilgi sunulmaktadır.

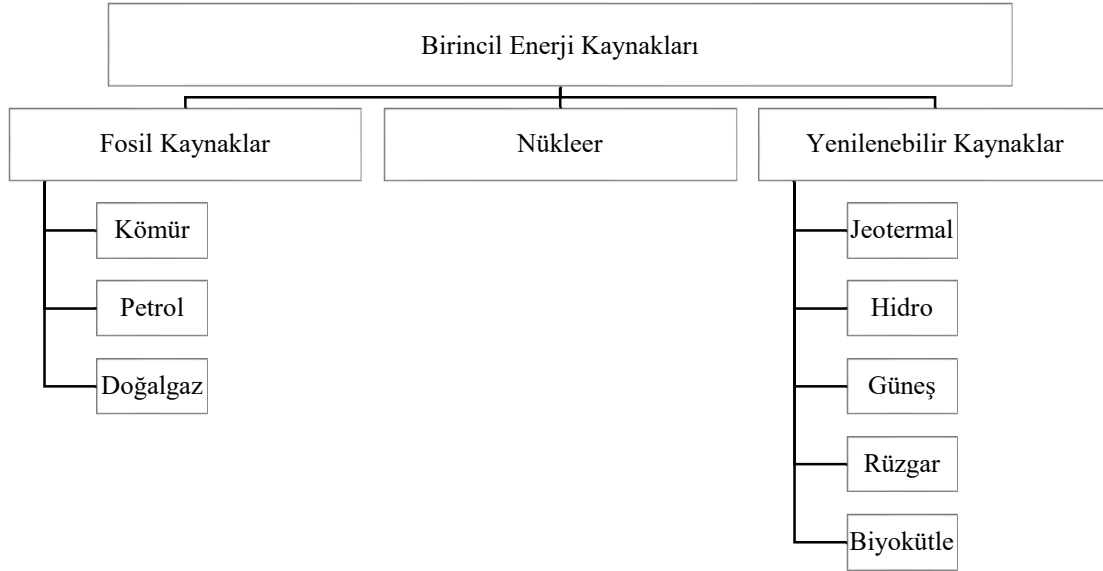
Hidrojen Enerjisi ve Üretim Yöntemleri

Doğada bileşik halinde bulunan hidrojen önemli bir enerji taşıyıcısıdır. Standart sıcaklık ve basınç altında renksiz, kokusuz, metalik olmayan, tatsız, oldukça yanıcı ve H₂ olarak bulunan bir diatomik gazdır. 1,00794 g/mol'lük atomik kütlesi ile tüm elementler arasında en hafif olanıdır. Hidrojen ilk olarak Henry Cavendish tarafından elde edilmiştir ve 1784 yılında Antoine Laurent de Lavoiser tarafından isimlendirilmiştir. Hidrojen kızdırılmış metal üzerinden su buharı ile elde edilmiştir. 1960 yılında ise hidrojen ile çalışan ilk araç Almanya'da üretilmiştir. 1 kilogramı 2.1 kg doğalgaz veya 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahip olan hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. Fakat birim enerji başına sahip olduğu hacmi yüksektir. Enerji sistemlerinde hidrojen yakıt olarak kullanıldığında çevreye atılan ürün su ve/veya su buharıdır. Hidrojenin yüksek enerji yoğunluğu ve temiz yanma özelliğinin yanı sıra yakıt olarak tercih edilmesindeki başlıca diğer nedenler ise şu şekilde ifade edilebilir:

- Hidrojen, ulaşım araçlarından ısınmaya, sanayiden mutfaklarımıza kadar taşımacılık, elektrik üretimi ve kimya endüstrisi gibi her alanda kullanılabilir.
- Depolanan hidrojen elektriğin dağıtılamadığı noktalara taşınabilir ve böylece yakıt hücreleri ile elektrik dünyanın her köşesinde üretilebilir.
- Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretildiğinde karbon ayak izinin çok düşük olmasından dolayı sürdürülebilirlik için önemli bir kaynaktır.

Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği ise sudur. Hidrojen doğada serbest halde bulunmadığı için kömür, doğal gaz, biyokütle veya sudan üretilebilir. Ancak kömür veya doğal gazdan üretim durumunda bu sera gazı emisyonlarına neden olduğundan çevresel faydaları ortadan kaldırır veya en aza indirir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları hidrojen üretimi için daha caziptir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak elektroliz veya termokimyasal olarak yönlendirilen su

ayrıştırma yoluyla hidrojen üretimi üzerine araştırmalara büyük ilgi vardır. Üretilen hidrojen miktarı hangi kaynak ve yöntemin kullanıldığına bağlıdır. Son yıllarda yapılan araştırmalarda temiz ve güvenli bir enerji üretim metodu olan entegre güneş hidrojen sistemlerinin hem çevre hem de maliyet açısından büyük üstünlüğe sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Hidrojenin birincil enerji kaynaklarından üretilme yöntemleri Şekil 1'de görülmektedir. Hidrojen üretim yöntemleri arasında en büyük paya sahip olan yöntem fosil kökenli yakıtlardan doğal gaz metan reformasyonudur. Ancak bu yöntemde fosil yakıtlara bağımlılığın devam etmesi ve karbon emisyonlarının olması dezavantaj yaratmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretiminde en yaygın kullanılan yöntem ise suyun elektrolizidir. Bu yöntemin de temiz olmasına rağmen enerji tüketimi yüksektir.



Şekil 1. Hidrojen üretim yöntemlerinin birincil enerji kaynaklarına göre sınıflandırılması

Kendisi renksiz olan hidrojen üretim sürecinin çevresel etkilerini değerlendirmek açısından üretim sürecinde kullanılan enerji kaynağı ve üretim yöntemine göre farklı renklerle ifade edilir.

Kahverengi Hidrojen: Kömür gibi fosil yakıtlardan üretilen hidrojendir. Üretim sürecinde yüksek miktarda karbon emisyonu oluşur.

Gri Hidrojen: Doğal gaz gibi fosil yakıtlardan üretilen hidrojendir. Kahverengi hidrojene göre daha az karbon emisyonu üretir ancak yine de önemli miktarda karbon salınımı söz konusudur.

Mavi Hidrojen: Doğal gazdan üretilen ancak karbon yakalama ve depolama teknolojileri kullanılarak üretilen hidrojendir. Bu sayede üretim sürecinde ortaya çıkan karbondioksit atmosferde tutulmaz.

Turkuaz Hidrojen: Doğal gazdan üretilen ancak karbon yakalama yerine metan pirolizi adı verilen bir yöntemle üretilen hidrojendir.

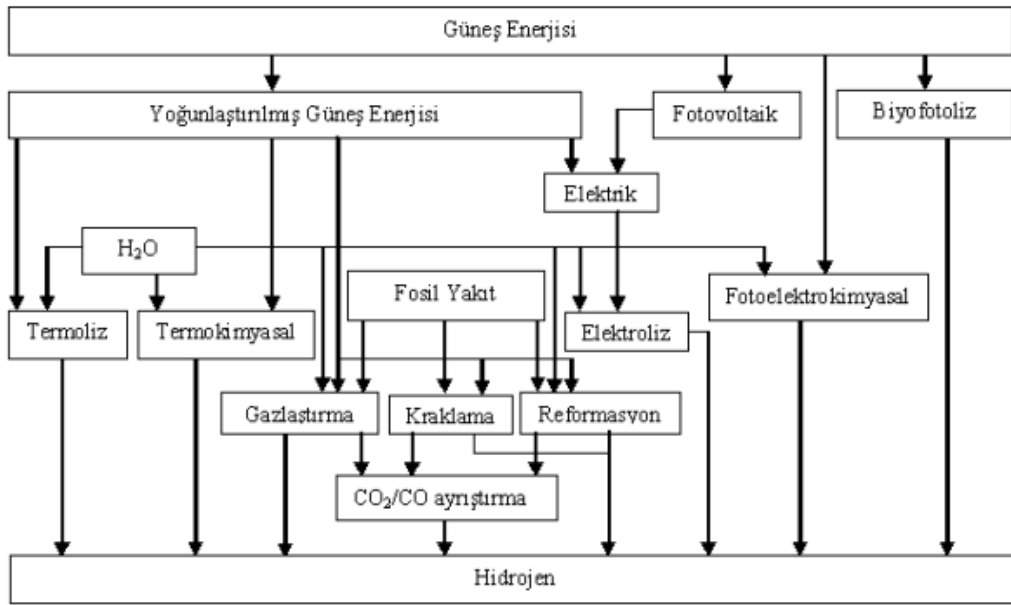
Pembe Hidrojen: Nükleer kaynak ile suyun elektrolizi yöntemi ile elde edilen hidrojendir ve bu süreçte karbon salınmaz.

Sarı Hidrojen: Şebeke elektriği ile suyun elektrolizi yöntemi ile elde edilen hidrojendir.

Yeşil Hidrojen: Tamamen yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, su) kullanılarak suyun elektrolizi ile üretilen hidrojendir. Üretim sürecinde herhangi bir karbon emisyonu oluşmaz. Bu nedenle en temiz hidrojen türüdür.

Güneş Enerjisi ile Hidrojen Üretimi

Yeşil hidrojen üretiminde rüzgar veya güneş enerji sistemleri ile elektroliz yoluyla hidrojen üretimi en sık karşılaşılan uygulamalardır. Güneş destekli hidrojen üretim sistemleri hem ekonomik hem de çevre açısından büyük bir avantaja sahiptir. Güneş enerjisinin temiz bir enerji kaynağı olması, enerji kaynağında bağımlılığın olmasının enerji güvenliğini artırması ve sürdürülebilir bir kaynak olmasından dolayı hidrojen üretiminde avantaj sağlamaktadır. Geçmişten günümüze kadar güneş enerjisinden hidrojen üretilmesi ile ilgili birçok yöntemler ortaya atılmıştır. Güneş destekli hidrojen üretim yöntemleri Şekil 2’de gösterilmektedir (Öztürk vd, 2011). Şekilden de görüldüğü gibi güneş enerjisinden hidrojen üretimi; fotovoltaik, fotoelektrokimyasal, fotobiyolojik ve güneş ısı enerjisi (yoğunlaştırılmış güneş enerjisi) olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır.



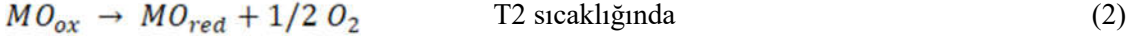
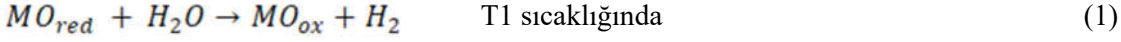
Şekil 2. Güneş destekli hidrojen üretim yöntemleri (Öztürk vd, 2011)

Düşük sıcaklıkta hidrojen üretim yöntemleri: Fotovoltaik, foto-elektrokimyasal ve foto-biyolojik hidrojen üretim sistemleri düşük sıcaklık uygulamalarıdır. Fotovoltaik hidrojen üretim yönteminde güneş panellerinden elde edilen elektrik suyun elektrolizi için kullanılır. Foto-elektrokimyasal hücre adı verilen ışık toplama sistemleri ile güneş ışığını toplayarak suyun elektrolizi için gerekli güç üretilmekte ve hidrojen elde edilmektedir. Bu sistemlerde ışık emici yarıiletkenin anot ve/veya katodu elektrokimyasal hücrenin içerisinde bulunabilir. Işığa bağlı ve ışıktan bağımsız olarak iki adımı olan foto-biyolojik hidrojen üretiminde bitki ve alg fotosentezi kullanılmaktadır. İlk adımda direkt veya indirekt biyofotolizi ve foto fermantasyon iken ikinci adım karanlık fermantasyondur.

Yüksek sıcaklıkta hidrojen üretim yöntemleri: Güneş enerjisinin yüksek sıcaklık uygulamaları; güneş termoliz, güneş termokimyasal çevrimler, güneş enerjili gazlaştırma, güneş reformasyon ve güneşli kraklama sistemleridir. Ayrıca yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile üretilen buharın gücü kullanılarak elektrik üretilir. Üretilen elektrik, elektroliz ile hidrojen üretiminde kullanılabilir. Güneş termoliz, güneş termokimyasal çevrimler, güneş enerjili gazlaştırma, güneş reformasyon ve güneşli kraklama yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin yüksek sıcaklık hidrojen üretim uygulamasıdır. Güneş termolizinde 2500 K'in üstündeki sıcaklıkta hidrojen doğrudan tek bir adımda sudan elde edilir. Güneş kraklama prosesi hidrokarbonların (doğalgaz, petrol vb.) ısı olarak ayrıştırmasıdır.

Termokimyasal çevrimler ile hidrojen üretilmesinde yüksek sıcaklıklarda (genellikle >400°C) su kimyasal bileşiklerle tepkimeye girdirilerek bir veya birkaç adımda reaksiyonlar gerçekleşir ve hidrojen üretilir. Termokimyasal çevrimlerde sadece ısı enerjisi kullanılan saf termokimyasal çevrimler olabildiği gibi hem ısı hem elektriğin gerekli olduğu hibrid termokimyasal çevrimler bulunmaktadır. Hibrit termokimyasal çevrimlerde saf olanlara göre daha düşük sıcaklıklarda hidrojen üretilir. Hidrojen üretiminde en yüksek verime sahip termokimyasal çevrimler iki adımlı metal oksit çevrimleridir. Bu çevrimlerde ilk adımda (bkz.

Eş.1) yüksek sıcaklıklarda (1000 to 2000 °C arasında) su ile metal tepkimeye girerek MO_{ox}'a oksidize olur. Bir sonraki adımda oksidize olan metal Eş.2'deki gibi 500–800°C aralığında bir sıcaklıkta hidroliz ile oksijen çıkararak tekrar ilk haline döner.

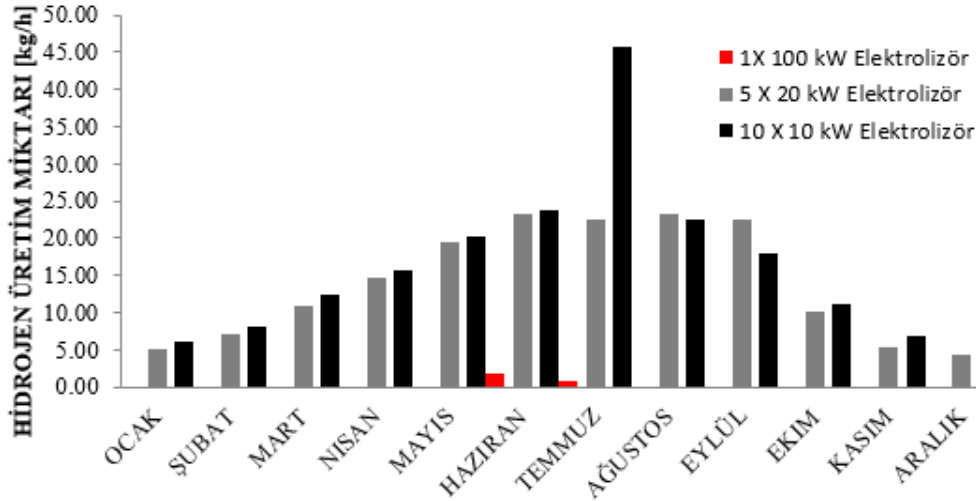


İki adımlı çevrimler ilk kez 1977 yılında Nakamura (Nakamura, 1977) tarafından Fe₃O₄/FeO redoks çifti kullanılarak önerilmiştir. Günümüze kadar, en yaygın kullanılan metal redoks reaksiyonlarına dayanan iki adımlı suyun ayrıştırılma çevrimleri ZnO/Zn, Fe₃O₄/Fe, SnO₂/SnO, CeO₂/Ce₂O₃, Mn₂O₃/MnO, Co₃O₄/CoO, CdO/Cd'dir.

Gelişen yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri ile metal redoks tepkimelerini kullanan iki adımlı termokimyasal çevrimler, daha verimli hale gelmişlerdir. Yoğunlaştırılmış güneş ışınımının ısı enerjisi orta ve yüksek sıcaklıklarda özel bir çalışma akışkanına ısı olarak aktarılarak buhar ve eş zamanlı olarak elektrik elde edilebilir. Bu faz değiştirici materyaller veya eriyik tuz karışımları gibi çalışma akışkanları ısı enerjisi yaklaşık 500°C'de depolayabilmektedirler. Elde edilen elektrikten elektroliz yoluyla hidrojen üretilebilir.

Güneşten Hidrojen Üretimi Üzerine Yapılan Çalışmalar

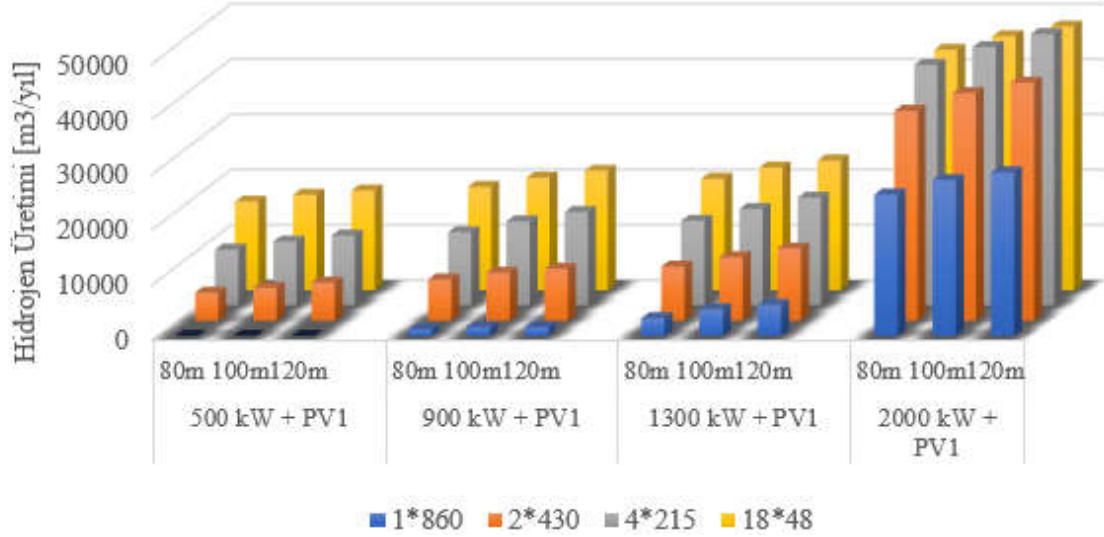
Kayseri ili güneşlenme potansiyeli dikkate alınarak 100 m² alana sahip %15 verimli mono kristal silisyum panellerden oluşan bir sistemden elektroliz yoluyla hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır (Gürel ve Genç, 2014). Ele alınan sistemde fotovoltaiik kayıp katsayısı 0.8 olarak kabul edilmiştir. Toplam elektrolizör gücü 100 kW olarak seçilmiştir. 100 kW elektrolizör gücü için üç farklı durum ayrı ayrı araştırılmıştır: i) 10 x10 kW, ii) 5x20 kW, iii) 1x100 kW. Kayseri ili için güneşlenme potansiyeline bağlı olarak aylık hidrojen üretim miktarı Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi güneşlenme potansiyeline bağlı olarak yaz aylarında hidrojen üretimi daha fazladır. Yıllık hidrojen üretim miktarı 10x10 kW elektrolizör durumunda 172.89 kg/h, 5x20kW durumunda 163.21 kg/h ve 1x100 kW durumunda ise 2.79 kg/h'dır.



Şekil 3. Kayseri ili için güneş destekli elektroliz yoluyla hidrojen üretim miktarının değişimi (Gürel ve Genç, 2014)

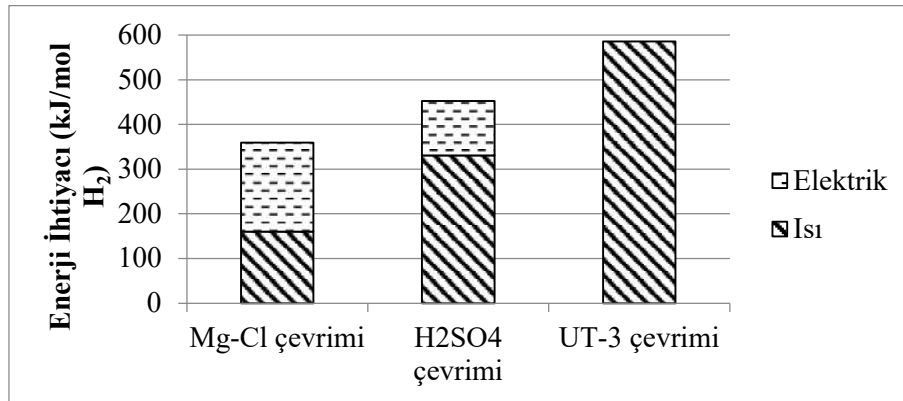
Hasan ve Genç (2022) yaptıkları çalışmada farklı PV'lerden oluşan sisteme farklı hub yüksekliklerinde farklı güçlerde rüzgar türbinleri ekleyerek elektroliz yoluyla hidrojen üretim potansiyelini ve maliyetini

değerlendirmişlerdir. Basra için farklı durumlardaki hidrojen üretim miktarları Şekil 4'te verilmiştir. Güneş enerjisi sistemine rüzgar enerjisi de entegre edildiği zaman hidrojen üretim potansiyelleri artmıştır. Basra'da yıllık hidrojen üretiminin maksimum değeri 49150 m³H₂/yıl ile 120 m hub yüksekliğinde 2000 kW rüzgar türbini ve PV1 ile 4×215 kW elektrolizörün kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Basra'da ele alınan farklı durumlara göre hidrojen üretim maliyetleri 0.723-6.392 \$/m³H₂ arasında değişmektedir.



Şekil 4. Basra (Irak) için rüzgar-güneş destekli elektroliz yoluyla hidrojen üretiminin değişimi (Hasan ve Genç, 2022)

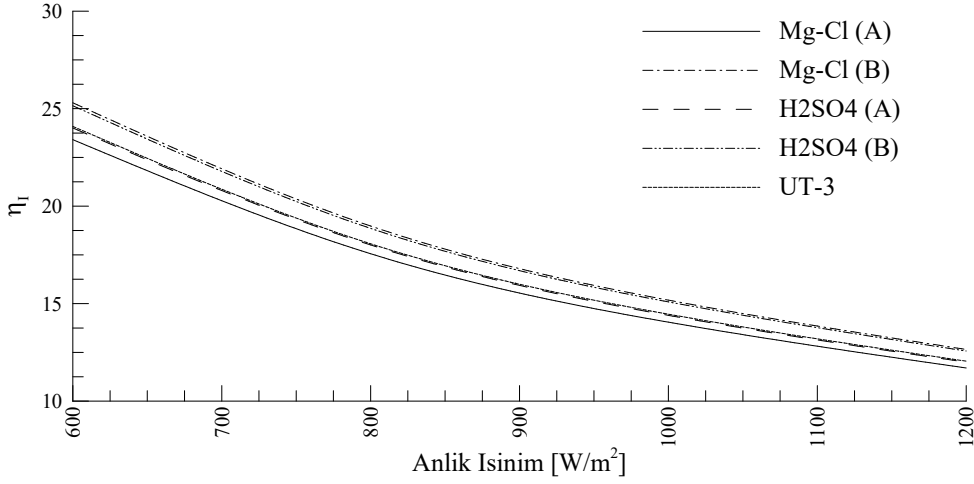
Özdemir ve Genç (2022) güneş enerjisine dayalı termokimyasal hidrojen üretim tesisi için enerji ve ekserji analizi yapılmaktadır. Termokimyasal çevrimlerin hidrojen üretimi üzerindeki etkisini araştırmak için düşük sıcaklıklı Mg-Cl, H₂SO₄ ve UT-3 çevrimleri karşılaştırılmıştır. Mg-Cl ve H₂SO₄ termokimyasal çevrimlerinde ihtiyaç duyulan elektriği sağlamak için ara ısıtmalı-rejeneratif Rankine çevrimi ve tekrar sıkıştırılmalı S-CO₂ Brayton çevrimi dikkate alınmıştır. Ayrıca, anlık güneş radyasyonunun ve konsantrasyon oranının sistem performansı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Şekil 5'de sistemde seçilen termokimyasal çevrimlerin enerji ihtiyaçlarının karşılaştırmaları verilmiştir. Hibrit çevrimlerden H₂SO₄ çevriminin ısı ihtiyacı Mg-Cl çevrimine göre daha fazladır, fakat elektrik ihtiyacı daha azdır.



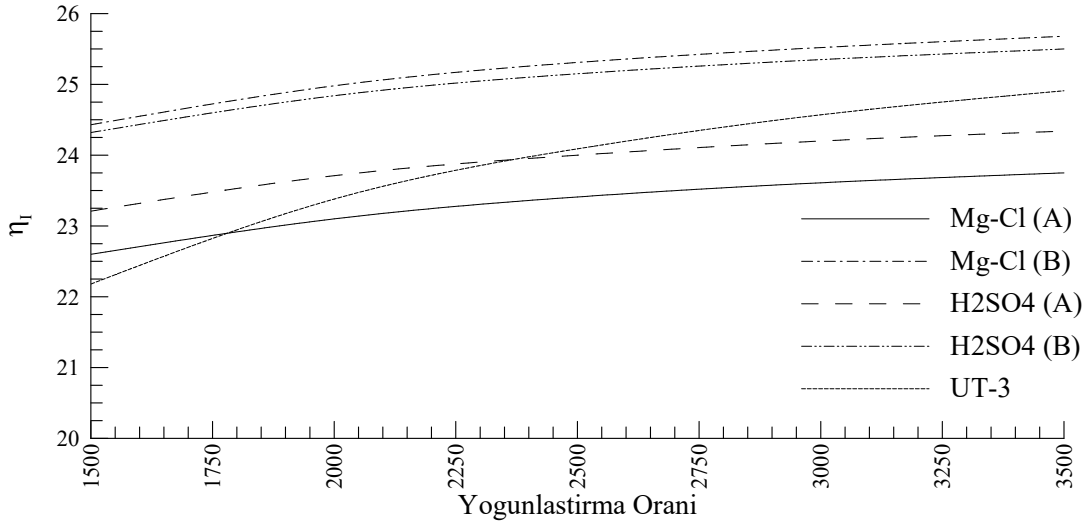
Şekil 5. Termokimyasal çevrimlerin enerji ihtiyaçlarının karşılaştırması (Özdemir ve Genç, 2022)

Farklı termokimyasal çevrimler için güneş destekli hidrojen üretim sisteminin anlık ışınım ve yoğunlaştırma oranına göre birinci yasa veriminin değişimi sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi anlık ışınım şiddetinin artması ile bütün tesislerde enerji verimi azalırken, yoğunlaştırma

oranının artmasıyla artış olmuştur. Tesisler 600 W/m^2 anlık ışınımında %20'nin üzerinde enerji verimine sahipken anlık ışınım 1200 W/m^2 değerine ulaştığında verim %10'lara düşmektedir. Yoğunlaştırma oranı 3500 değerinde Mg-Cl(B) ve H₂SO₄(B) tesislerinin enerji verimi sırasıyla %25.7 ve %25.5 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Anlık ışınım değişiminin tesislerin enerji verimi üzerine etkisi (Özdemir ve Genç, 2022)



Şekil 7. Tesislerin yoğunlaştırma oranının enerji verimine etkisi (Özdemir ve Genç, 2022)

Sonuçlar

Dünyanın karşılaştığı en büyük çevresel zorluklardan biri, fosil yakıtların neden olduğu iklim değişikliğidir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir enerji üretimini artırmak, bu küresel sorunun çözülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Yeşil hidrojen, bu bağlamda geleceğin temiz enerji çözümleri arasında önemli bir yere sahiptir. Güneş enerjisi ile yeşil hidrojen üretimi, çevre dostu, sürdürülebilir ve verimli bir enerji çözümü doğru önemli bir adımdır. Bu iki teknoloji arasındaki entegrasyon, fosil yakıtların yerine geçecek yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının üretimini hızlandırabilir. Gelişen teknolojilerle, güneş enerjisiyle hidrojen üretimi daha verimli, ekonomik ve yaygın hale gelebilir. Bu alandaki ilerlemeler, küresel enerji geçişini hızlandırarak, daha yeşil bir geleceğe doğru büyük bir adım atılmasını sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Alavi, O., Mostafaeipour, A., Qolipour, M., (2016). Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (34), 15158-15171.
- Asal, S., Acır, A. (2021). Utilization of the Cu–Cl thermochemical cycle for hydrogen production using a laser driver thorium molten salts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (61), 31133-31142.
- Balta, M.T., Dincer, I., Hepbasli, A. (2010). Potential methods for geothermal-based hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 4949-4961.
- Boudries, R., (2013). Analysis of solar hydrogen production in Algeria: Case of an electrolyzer-concentrating photovoltaic system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 11507-11518.
- Genc, G., (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (19), 10190-10201.
- Genç, G, Celik, M, Genç, MS., (2012). Cost analysis of wind-electrolyzer-fuel cell system for energy demand in Pinarbasi-Kayseri. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (17); 12158-12166.
- Gürel, S. Genc, G. (Danışman). (2014). Güneş enerjisinden hidrojen üretim potansiyelinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kayseri.
- Hasan M. M., Genc, G., (2022). Techno-economic analysis of solar/wind power based hydrogen production, *Fuel*, 324 -A, 124564.
- Ishaq, H., Siddiqui, O., Chehade, G., & Dincer, I. (2021). A solar and wind driven energy system for hydrogen and urea production with CO₂ capturing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(6), 4749-4760.
- Karayel, G.K., Javani, N., Dincer, I., (2022). Effective use of geothermal energy for hydrogen production: A comprehensive application, *Energy*, 249, 123597.
- Orhan, M.F., Dincer, I., Naterer, G.F., Rosen, M.A., (2010). Coupling of copper–chloride hybrid thermochemical water splitting cycle with a desalination plant for hydrogen production from nuclear energy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 1560-1574.
- Ozdemir, A., Genc, G., (2022). A comprehensive comparative energy and exergy analysis in solar based hydrogen production systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (24), 12189-12203.
- Öztürk, M., Elbir, A., Özek, N., Yakut, A. K., (2011). Güneş hidrojen üretim metotlarının incelenmesi, s. 231-237. 6. International Advanced Technologies Symposium, Mayıs.
- Qolipour, M., Mostafaeipour, A., Tousi, O.M. (2017). Techno-economic feasibility of a photovoltaic-wind power plant construction for electric and hydrogen production: A case study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 78, 113-123.
- Touili, S., Merrouni, A. A., Azouzoute, A., El Hassouani, Y., Amrani, A. I., (2018). A technical and economical assessment of hydrogen production potential from solar energy in Morocco. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(51), 22777-22796.

**FABRİKALARIN KARBON AYAK İZİNİN AZALTIKMASINDA ÇATI ÜSTÜ GES'LERİN ETKİSİ: ALÜMİNYUM VE MOBİLYA SEKTÖRÜ ÖRNEĞİ****Koray Alp ARSLAN¹**¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye¹ ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2141-2085>**Rafet Kerem ALBAYRAK²**² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kayseri, Türkiye² ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2420-4630>**Gamze GENÇ³**³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Departmanı, Kayseri, Türkiye³ ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-2161>**Özet**

Bu çalışmada örnek bir alüminyum ve mobilya fabrikası el alınarak endüstriyel faaliyetlerin karbon emisyonlarına etkileri analiz edilmiştir ve çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımları incelenmiştir. Alüminyum ve mobilya sektörlerindeki üretim süreçlerinde kullanılan enerji kaynakları, doğalgaz, benzin, mazot, elektrik tüketimi, atık yönetimi ve uçuşlardan kaynaklanan emisyonlar detaylı olarak hesaplanmıştır. Karbon ayak izi hesaplamaları için IPCC kılavuzları, ISO 14064 standart serisi ve PAS 2050 gibi uluslararası metodolojiler kullanılmıştır. Özellikle, çatı güneş enerjisi sistemlerinin (Çatı GES) enerji tüketimindeki karbon emisyonlarını nasıl sıfıra indirebileceği ile ilgili senaryolar ele alınmıştır. Çalışmanın sonuçları çevre dostu ve sürdürülebilir uygulamalar konusunda yol göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Emisyonu, Sürdürülebilirlik, Karbon Ayak İzi, Güneş enerjisi.

THE EFFECT OF ROOFTOP SOLAR POWER PLANTS IN REDUCING THE CARBON FOOTPRINT OF FACTORIES: THE CASE OF THE ALUMINUM AND FURNITURE SECTOR**Abstract**

In this study, the effects of industrial activities on carbon emissions were analyzed and environmental sustainability approaches were examined by considering the cases of aluminum and furniture factories. The carbon emissions were determined in detail resulting from the energy sources used in the production processes in the aluminum and furniture sectors, natural gas, gasoline, diesel, electricity consumption, waste management, and flights. International methodologies such as IPCC guidelines, ISO 14064 standard series, and PAS 2050 were used for carbon footprint calculations. In particular, scenarios were discussed regarding how rooftop solar energy systems (Rooftop GES) can reduce carbon emissions in energy consumption to zero. The results of the study guide environmentally friendly and sustainable practices.

Keywords: Carbon emissions, Sustainability, Carbon footprint, Solar energy.

Giriş

Sanayi devriminden bu yana hızla artan endüstriyel faaliyetler, enerji tüketimi, doğal kaynakların hızla tüketilmesine ve atmosferdeki sera gazı miktarının artışına neden olmaktadır. Özellikle karbon emisyonları, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi çevre problemlerinin ana nedenleri arasında bulunmaktadır. Atmosferde biriken sera gazlarının etkisi, sadece ekosistemler üzerinde değil aynı zamanda ekonomik ve sosyal dengelerde de ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Bu durum, küresel boyutta işletmelerin karbon ayak izlerini azaltmaya yönelik çabalarını çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından zorunlu hale getirmiştir.

Üretim süreçlerinde kullanılan enerji türü ve tüketim miktarı, karbon emisyonlarının en büyük kısmını oluşturan faktörlerden biridir. Aynı zamanda, taşıma faaliyetleri, lojistik ve atık yönetimi gibi süreçler de doğrudan karbon ayak izi üzerinde etkilidir. Bu nedenle, her işletme kendi süreçlerine uygun karbon azaltım stratejileri geliştirmek zorundadır. Sera gazı envanteri sonuçlarına göre kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4 ton CO₂ eşd. iken 2020 yılında 6.3 ton CO₂ eşd. ve 2021 yılında 6.7 ton CO₂ eşd.'dir (TUIK, 2024). Ayrıca, sektörlere göre CO₂ emisyonları değerlendirildiğinde 2021 yılında %32.7'si elektrik ve ısı üretiminden olmak üzere %85.2'si enerji sektöründen, %14.5'i endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektöründen, %0.3'ü ise tarım ve atık sektörlerinden kaynaklanmıştır. Sera gazı envanteri sonuçlarına göre kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4 ton CO₂ eşd. iken 2020 yılında 6.3 ton CO₂ eşd. ve 2021 yılında 6.7 ton CO₂ eşd.'dir (TUIK, 2024).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir çözüm sunduğu ve fosil yakıtlardan kaynaklanan çevresel sorunlara alternatif oluşturduğu ifade edilmektedir. Fosil yakıtların kullanımının çevreye ve insan sağlığına verdiği zararlar, toplumsal farkındalığı artırmış ve yenilenebilir enerjiye olan ilgiyi tetiklemiştir. Özellikle güneş enerjisi, çevre dostu ve temiz bir kaynak olarak öne çıkmakta ve enerji üretiminde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Çalışmalar, güneş enerjisinin kullanımıyla ülkelerin enerji ihtiyacını doğal kaynaklarla karşılayarak dışa bağımlılığı azaltabileceğini ve bu durumun ekonomiye doğrudan katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, güneş enerjisi sistemlerinin yaygınlaşması, yeni teknolojilerin gelişimine ve yenilikçi iş alanlarının oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisinin yalnızca ekonomik değil, çevresel sürdürülebilirliğe de önemli katkılar sağladığı vurgulanmaktadır. (Arabacı & Özkan, 2024). Türkiye'de yenilenebilir enerji sistemleri kullanan havalimanlarının mevcut durumu analiz edilerek, bu uygulamaların yaygınlaştırılması için öneriler sunulmuştur. Bu çalışmalar hem çevresel sürdürülebilirlik hem de operasyonel verimlilik açısından yenilenebilir enerji sistemlerinin havalimanlarında daha fazla benimsenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Yıldız vd., 2020). Yeşil çatı sistemlerinin hava kalitesini iyileştirdiği, karbondioksit miktarını azaltarak oksijen seviyesini artırdığı ve böylece küresel ısınmaya karşı önemli bir katkı sağladığı çalışmalarla ortaya konmuştur. Ayrıca, bu sistemlerin biyoçeşitliliği artırdığı, gürültü kirliliğini azalttığı ve yağmur suyunun yeniden kullanımını sağlayarak su kıtlığına çözüm sunduğu belirtilmektedir. Enerji tüketimini azaltması ve karbon ayak izini küçültmesi gibi faydalar da yeşil çatılara olan ilgiyi artırmaktadır. Yapılan bir araştırmada (Demirhan, E., 2021), yeşil çatı sistemlerinin yağmur suyu ve güneş enerjisinden en verimli şekilde yararlanma potansiyeli incelenmiştir. Çalışmada, yeşil çatıda toplanan yağmur suyunun bahçe sulamada kullanıldığı ve çatıya entegre güneş panelleri ile elektrik enerjisi üretildiği tespit edilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, 8 aylık bir dönemde 560 litre su tasarrufu sağlanmış ve güneş enerjisi sistemi ile 6801,2 watt elektrik üretilmiştir. Bu bulgular, yeşil çatıların çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğiyle mücadele açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Türkiye ve dünya genelindeki örneklerden yola çıkarak, belirli bir bölgede yeşil çatı uygulamasının sağlayabileceği ekonomik ve çevresel faydalar analiz edildiği çalışmada (Koca, A., 2017) yeşil çatıların yalnızca çevresel sorunları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir kentsel yaşamın desteklenmesine de önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar, yalnızca çevresel değil aynı zamanda toplumsal sorumluluğun bir parçası olarak da değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümler ve stratejiler hem çevresel hem de ekonomik olarak sürdürülebilirliğin sağlanmasında etkili bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, farklı iki sektördeki işletmelerin karbon emisyon kaynaklarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Karbon emisyonlarının doğru bir şekilde hesaplanması ve yönetilmesi için uluslararası standartlar ve metodolojiler kullanılmıştır.

Bu çalışmada, alüminyum ve mobilya olmak üzere iki farklı sektörden seçilen endüstriyel işletmelerin karbon emisyon kaynakları analiz edilmiştir. İncelenen işletmelerin enerji tüketimleri, doğalgaz ve fosil yakıt kullanımları, atık yönetimleri ve lojistik faaliyetlerinden kaynaklı emisyonları hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji çözümlerinin, özellikle çatı güneş enerjisi sistemlerinin (Çatı GES) enerji tüketiminden kaynaklı olan emisyon miktarlarındaki azaltma potansiyeli değerlendirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC, 1992), Kyoto Protokolü (1998b), GHG (Sera Gazı Protokolü Protokolü, 2017b), kurumların karbon ayak izi hesaplamasında kullanılan ISO 14064 (International Standard Organization – "Uluslararası Standart Örgütü, 2013b) standart serisi,

karbon nötrlüğünün nasıl gösterileceğini detaylandıran PAS 2060 (Publicly Available Specification – “Kamuya Açık Şartname”, Anonim, 2018a) standardı ve IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – “Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli”, 2006) kılavuzlarının yanı sıra bilimsel yayınlar ve akademik çalışmalar kullanılmıştır.

Çalışmada sektörleri farklı olan iki fabrika seçilmiştir. Bir fabrika mobilya sektörü iken diğer fabrika alüminyum sektörüdür. Fabrikalardan elde edilen verilere göre aşağıdaki hesaplamalar kullanılarak toplam CO₂ emisyonları belirlenmiştir. CO₂ emisyonlarının azaltılması için fabrikalara çatı üstü GES kurulduğu senaryosu ele alınarak yeniden CO₂ emisyonları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Karbon emisyon miktarlarının hesaplamaları

Fosil yakıtların yakılması, endüstriyel işlemler ve diğer insan faaliyetleri sonucunda karbon emisyonu oluşmaktadır. Özellikle sanayileşmenin gelişmesiyle atmosferdeki sera gazı yoğunluğu da artmaktadır. İnsanların ve fabrikaların doğaya verdiği zararın miktarı ise sera gazı miktarı ile ifade edilmektedir ve bu ölçü günümüzde karbon ayak izi olarak tanımlanmaktadır. Elektrik sektörü, endüstri sektörü ile birlikte şu anki CO₂ emisyonlarında yaklaşık %60 emisyon ile en önemli kaynağı oluşturmaktadır. CO₂ salınım miktarı tüketilen petrol kaynaklı enerji türü içerisindeki karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Farklı kaynaklara göre salınan CO₂ miktarının hesaplama bağıntıları aşağıdaki gibi değişmektedir. Elektrik tüketiminden kaynaklı CO₂ emisyon miktarı ($E_{tCO_2/yıl}$) sırasıyla Eş.1, ile hesaplanırken farklı yakıtların (doğalgaz, benzin ve mazot) kullanımından kaynaklı CO₂ emisyon miktarı ($E_{tCO_2/yıl}$) için Eş. 2 kullanılır (ISO, 2018; SGP, 2017).

$$\frac{E_{tCO_2}}{yıl} = \left(\left(\frac{FV_{kWh}}{yıl} \times EF_{kgCO_2/m^3} \times \dot{I\&DK}\% \right) + \left(\frac{FV_{kWh/yıl}}{kWh} \times EF_{kgCO_2/kWh} \right) \right) \times 10^{-3} \quad (\text{Eş. 1})$$

burada FV faaliyet verisi, EF emisyon faktörünü, İ&DK iletim ve dağıtım kayıplarını göstermektedir. Türkiye için elektrik tüketiminde EF faktörü 0.4603 kgCO₂/kWh ve İ&DK %13.3'dür (TEIAS, 2024).

$$\frac{E_{tCO_2}}{yıl} = \left(\left(\frac{YOY_{kg}}{m^3} \times \frac{YK_P}{yıl} \times 10^{-3} \right) + \left(\frac{EF_{kgCO_2}}{TJ} \times YF_{TJ} \times OF \right) \right) \quad (\text{Eş. 2})$$

burada YOY yakıtın (doğalgaz, benzin veya mazot) ortalama yoğunluğu, YK yıllık yakıt kullanım miktarı, YF_{TJ} yükseltgenme faktörünü ve OF oksidasyon faktörünü göstermektedir. Doğalgaz, benzin ve mazot için sırasıyla YOY değerleri 0.85, 740 ve 850'dir (YEGM, 2018). YF_{TJ} ve OF değerleri IPCC kılavuzlarında “1” olarak kabul edilmektedir. EF değeri yakıtlar için 3.664'e eşittir.

Toplu taşıma araçlarının kullanımından kaynaklı CO₂ emisyon miktarı hesaplanırken mazot kullanımı için Eş.2 kullanılır ve bu eşitlikteki YK için ek olarak Eş.3 bağıntısı kullanılır.

$$\frac{MK_{lt}}{yıl} = (YK_{yıl} \times 0.25_{lt}) / KS \quad (\text{Eş. 3})$$

burada $\frac{MK_{lt}}{yıl}$ kişi başı litre cinsinden yıllık mazot kullanımı, YK_{yıl} km cinsinden yıllık yapılan yol, 0.25 otobüsün litre cinsinden km'de yaktığı ortalama mazot miktarı ve KS kişi sayısını göstermektedir.

Kurumlarda görev alan personellerin iş amaçlı kullandığı uçuşlardan kaynaklı kişi başı toplam jet yakıtı CO₂ emisyon miktarı Eş.4 ve Eş.5 ile hesaplanır (ISO, 2018; SGP, 2017).

$$\frac{E_{tCO_2}}{yıl} = \left(\frac{YT_{kg}}{LTO} \times \frac{EF_{LTOkg}}{CO_2} \right) + \left(SYT_P \times \frac{SEF_{kg}}{CO_2} \times 10^{-6} \right) / KS \quad (\text{Eş. 4})$$

$$SYT_P = (YK_{yıl} \times BYT_P) / 100 \quad (\text{Eş. 5})$$

Burada $\frac{YT_{kg}}{LTO}$ ve $\frac{EF_{LTOkg}}{CO_2}$ sırasıyla uçaklarda 914 metreye kadar tırmanışta harcanan yakıt tüketimini (2220 lt) ve bu yakıt tüketimine ait emisyon faktörünü (3.15) göstermektedir. SYT litre cinsinden seyir halindeki yakıt tüketimini, SEF seyir emisyon faktörünü (0.03 kg/CO₂), KS kişi sayısını, YK yapılan kilometreyi ve BYT birim yakıt tüketimini (uçaklarda 100 km mesafedeki yakıt tüketimi 4 lt olarak dikkate alınmaktadır)

ifade etmektedir.

Fabrika içerisinde kullanılan klima, buzdolabı ve su sebilleri gibi soğutucularda kullanılan R410a gazı emisyonu karbondioksit eşdeğeri (E_{tCO_2e}) Eş. 6 ile hesaplanır (ISO, 2018; SGP, 2017).

$$E_{tCO_2e} = ((T_{R410a} \times 10^{-3}) \times T\% \times (KIP_{tCO_2} \times ((0.5 \times R32) + (0.5 \times R125)))) \quad (\text{Eş. 6})$$

T_{R410a} sistemde yüklü kg cinsinden toplam R410a gazını göstermektedir. T% sisteme emisyonundan dolayı yapılan toplam şarj miktarıdır ve sisteme yüklenen toplam gazın % değerinden oranı yıllık %1 civarı bir emisyon gerçekleşmektedir. KIP küresel ısınma potansiyelidir ve değeri 3220 olarak kabul edilir. R32 ve R125 sırasıyla CH_2F_2 ve CHF_2CF_3 gazını göstermektedir. Sera Gazı Protokolüne göre değerleri ise sırasıyla 675 ve 3170'dir (SGP, 2017).

Fabrika içerisinde kullanılan yangın koruma sistemlerindeki HFC-227ea gazından kaynaklı olarak CO_2 emisyon miktarı Eş.7 ile elde edilir.

$$\frac{E_{tCO_2}}{\text{yıl}} = (THFC_{HFC-227ea} \times 10^{-3}) \times T\% \times KIP_{\frac{tCO_2}{tHFC-227ea}} \quad (\text{Eş. 7})$$

Burada THFC kg cinsinden sistemde yüklü toplam HFC- 227ea gazını ve $KIP_{\frac{tCO_2}{tHFC-227ea}}$ ise küresel Isınma Potansiyelini göstermektedir. Değeri R410a gazında ki gibi 3220'ye eşit kabul edilir.

Atık yönetiminden kaynaklı emisyon hesaplamaları Eş.8'e göre yapılır (ISO, 2018; SGP, 2017).

$$\frac{E_{tCO_2}}{\text{yıl}} = W_{\text{yıl}} \times F_{kgCO_2} \times EKF_{kgCO_2} \times EF_{kgCO_2} \quad (\text{Eş. 8})$$

Burada $W_{\text{yıl}}$ yıllık atık miktarını, F atık işleme yönetim faktörü (=0.2), EKF enerji kullanım faktörü (=0.5) ve EF emisyon faktörüdür (=0.3).

Endüstriyel süreçlerde enerji verimliliğinden kaynaklı emisyon hesaplamalarında Eş.9 kullanılmaktadır (ISO, 2018; SGP, 2017).

$$\frac{E_{tCO_2}}{\text{yıl}} = \dot{M}_{\text{yıl}} \times EKF_{kWh/ton} \times EF_{kgCO_2/kWh} \quad (\text{Eş. 9})$$

Burada $\dot{M}_{\text{yıl}}$ yıllık üretim miktarını göstermektedir. EKF endüstriyel süreçler için 200kWh/ton ve EF 0.5 kgCO₂/kWh kabul edilmektedir.

Yenilenebilir enerji kullanım miktarına göre yıllık emisyon değeri Eş. 10 ile elde edilir.

$$\frac{E_{tCO_2}}{\text{yıl}} = EM_{MWh} \times EF_{kgCO_2} \times D \times 10^{-3} \quad (\text{Eş. 10})$$

Burada EM üretilen enerji miktarı, EF emisyon faktörü ve D dönüşüm faktörüdür. EF ve D'nin değeri sırasıyla 0.02 ve 0.84 alınmıştır.

Sayısal Sonuçlar

Ele alınan mobilya ve alüminyum fabrikaları halihazırdaki verilerine göre CO_2 emisyon miktarları Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Mobilya sektörü için farklı kaynaklardan çıkan CO₂ emisyonları

Faaliyet	Birim	Miktar	Karbon Emisyonu [ton CO ₂ /yıl]
Çalışan sayısı	Kişi	78	
Enerji Tüketimi	MWh/yıl	258360	134.74
Doğalgaz	m ³ /yıl	6000000	18686.40
Ulaşım	km/yıl	168000	1647.39
Kiralık Araçlar	Litre(benzin)	1500	4067.04
Kiralık Araçlar	Litre(mazot)	2000	6228.80
Atık Yönetimi	Ton/yıl	3650	109.50
Toplam Karbon Emisyonu			30873.87

Tablo 2. Alüminyum sektörü için farklı kaynaklardan çıkan CO₂ emisyonları

Faaliyet	Birim	Miktar	Karbon Emisyonu [ton CO ₂ /yıl]
Çalışan Sayısı	Kişi	3000	
Enerji Tüketimi	kWh/yıl	6400000	3337.73
Doğalgaz Tüketimi	m ³ /yıl	25000000	77860.00
Atık Yönetimi	Ton/yıl	100000	3000.00
Soğutma ve Isıtma (R410a gazı)	kg	5	309.52
Yurt İçi ve Yurt Dışı Seyahatler	km/yıl	15575	233.10
Yangın Söndürme Sistemleri	kg	800	25.76
Fabrikaya Ulaşımında Kullanılan Sistemler	km/yıl	600000	152.97
Kiralık Araçlar ve Kullanılan Yakıt	litre (benzin)	10000	27113.60
Endüstriyel Süreçlerde Enerji Verimliliği	Ton/yıl	50000	5000.00
Toplam Karbon Emisyonu			117032.68

Fabrikalara çatı üstü GES kurularak öz tüketimlerini güneş enerjisinden karşılamaları durumunda CO₂ emisyon miktarları Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir. Hesaplanan emisyon verilerine göre alüminyum sektöründe yılda 1000000 kWh enerjiyi çatı güneş enerjisi sistemlerinden elde edildiğinde enerji tüketiminden kaynaklı emisyon sonuçlarında %15'lik bir azalma görülüyor. Mobilya sektöründe ise enerji kullanımlarının tamamını çatı güneş enerji sistemlerinden kullandığında enerji tüketiminden kaynaklı emisyon sonuçlarında %96'lık bir azalma görülüyor.

Tablo 3. Mobilya sektöründe çatı üstü GES kurulması durumunda farklı kaynaklardan çıkan CO₂ emisyonları

Faaliyet	Birim	Miktar	Karbon Emisyonu [ton CO ₂ /yıl]
Çalışan sayısı	Kişi	78	
Doğalgaz	m ³ /yıl	6000000	18686.40
Ulaşım	km/yıl	168000	1647.39
Kiralık Araçlar	Litre(benzin)	1500	4067.04
Kiralık Araçlar	Litre(mazot)	2000	6228.80
Çatı Ges	kWh/yıl	258360	4.34
Atık Yönetimi	Ton/yıl	3650	109.50
Toplam Karbon Emisyonu			30743.47

Tablo 4. Alüminyum sektöründe çatı üstü GES kurulması durumunda farklı kaynaklardan çıkan CO₂ emisyonları

Faaliyet	Birim	Miktar	Karbon Emisyonu [ton CO ₂ /yıl]
Çalışan Sayısı	Kişi	3000	
Enerji Tüketimi	kWh/yıl	5400000	2816.21
Doğalgaz Tüketimi	m ³ /yıl	25000000	77860.00
Atık Yönetimi	Ton/yıl	100000	3000.00
Soğutma ve Isıtma (R410a gazı)	kg	5	309.52
Yurt İçi ve Yurt Dışı Seyahatler	km/yıl	15575	233.10
Yangın Söndürme Sistemleri	kg	800	25.76
Fabrikaya Ulaşımında Kullanılan Sistemler	km/yıl	600000	152.97
Kiralık Araçlar ve Kullanılan Yakıt	litre (benzin)	10000	27113.60
Çatı GES	kWh/yıl	1000000	16.80
Endüstriyel Süreçlerde Enerji Verimliliği	Ton/yıl	50000	5000.00
Toplam Karbon Emisyonu			116527.96

Çatı güneş enerji sistemlerine geçiş, sadece çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda işletmelere ekonomik ve sosyal açıdan önemli faydalar sunar. Alüminyum ve mobilya sektöründe faaliyet gösteren fabrikalar için bu dönüşüm, enerji maliyetlerini düşürerek finansal sürdürülebilirlik sağlarken, karbon emisyonlarının kayda değer ölçüde azaltılmasına da olanak tanımaktadır. Yenilenebilir enerji entegrasyonu, işletmelerin küresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını destekleyerek ve çevre dostu üretimin artmasına teşvik etmektedir.

GES uygulamaları, işletmelere ekonomik kazanç sağlamanın ötesinde, çevresel farkındalığın artırılmasında ve toplumsal bilinç oluşturulmasında kritik rol oynamaktadır. Bu tür projeler, enerji üretim süreçlerini yenilenebilir kaynaklarla destekleyerek, endüstrinin çevresel sorumluluk standartlarını yükseltmektedir.

Kaynaklar

Demirhan, E. (2021). Yeşil çatılarda yağmur suyu ve güneş enerjisi sistemlerinin Sakarya Üniversitesi'ndeki kazan dairesi binasında uygulanması (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Erişim 31.03.2018

International Organization for Standardization (ISO) 2018. ISO 14064, <https://www.iso.org/standard/66453.html>

Koca, A. (2017). Yeşil çatı sistemlerinin sürdürülebilir kent yaşamına etkilerinin değerlendirilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Kyoto Protokolü, 1998b. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Ek A. Birleşmiş Milletler. PAS 2060 Karbon Nötrallitesi. 2018a. <https://www.bsigroup.com/tr-TR/PAS-2060-KarbonNotralitesi>.

Sera Gazı Protokolü (SGP), 2017. What is GHG Protocol? <http://www.ghgprotocol.org/about-us>

Türkiye Elektrik İletim A.Ş., TEIAS, Erişim tarihi Ekim 2024, <https://www.teias.gov.tr>.

Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK), 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>

Yenilenebilir Enerji - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (YEGM), 2018. Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değerleri ve Petrol Eşdeğerine Çevrim Katsayıları. http://www.yegm.gov.tr/duyurular_haberler/document/SENVER_15_Usul_ve_Esaslar_Ek2.pdf Erişim 18.06.2018

Yıldız, Ö. F., Yılmaz, M., Çelik, A., & İmik, E. (2020). Havalimanlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması. *Journal of Aviation*, 4(1), 162-174.

UNFCCC, 1992. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Rio de Janeiro, Brezilya.

**ISIL PERFORMANSI GELİŞTİRİLMİŞ EV TİPİ MİDİ FIRIN TASARIMI VE SAYISAL İNCELENMESİ****Yusuf TEKİN¹**¹Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Müh. Bölümü Kayseri/TÜRKİYE.¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1081-6399>**Mehmet YALÇIN²**²Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Makina Müh. ABD Kayseri/TÜRKİYE.²ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-7872-2263>**Özet**

Fırın ısı performansının artırılmasına yönelik yapılan çalışmalarda genellikle dış duvarlar ve yalıtım malzemelerinin etkisi üzerine durulduğu gözlenmiştir. Bazı çalışmalarda ise infiltrasyon ve farklı kapak konstrüksiyonları, cam sayısı arttırmak, farklı yansıtıcı elemanlar, reflektör uygulamaları gibi ısı kaybının azaltılması ve ısı performans artışı sağlamak üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise fırındaki fan konumunun, fan ve alt ısıtıcı koruma saçlarının yapısının fırındaki ısı performansına etkisi incelenmekte olup, ısı performansını artırılmış yeni midi fırın tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle mevcut 40 lt mini fırının HAD analizleri yapılmıştır. Alt ve üst rezistansların yerleşimi ve tasarımından kaynaklı sıcaklığın homojen dağılmadığı bölgeler belirlenerek, yeni tasarımda daha homojen ısı dağılımını sağlayan, fan konumu, fan koruma sacı ve fırın alt ısıtıcı koruma saçlarında yeni tasarımlar yapılmıştır. Fan konumu fırın merkezine yaklaştırılarak daha etkili hız ve sıcaklık dağılımı olduğu belirlenmiştir. Yeni fan koruma sacı tasarımında mevcut emme ve üfleme deliklerinin sayıları giriş hızını etkilemeyecek şekilde artırılmıştır. Alt ısıtıcı üzerindeki alt ızgaranın deliklerinin yetersiz olduğu tespit edilmiş olup, yeni tasarımda daha yoğun deliklerin olduğu ızgara tasarlanmıştır. Bu iyileştirmelerin yapıldığı yeni midi fırının daha kısa sürelerde pişirme sıcaklığına ulaştığı görülmekte olup, ısı verimi iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ev tipi fırın, enerji verimliliği, HAD analiz**DESIGN AND NUMERICAL ANALYSIS OF A HOME-TYPE MİDİ OVEN WITH IMPROVED THERMAL PERFORMANCE****Summery**

In studies aimed at enhancing the thermal performance of ovens, the focus has generally been on the effects of outer walls and insulation materials. Some studies have also examined methods to reduce heat loss and improve thermal performance, including infiltration, different lid constructions, increasing the number of glass panes, and various reflective elements and reflector applications. This study investigates the impact of the fan position and the structure of the fan and lower heating element protection plates on the thermal performance of the oven, with the aim of designing a new midi oven with improved thermal performance. Initially, heat analysis (HAD) was conducted on an existing 40-liter mini oven. Areas with uneven temperature distribution due to the placement and design of the upper and lower resistances were identified, and new designs were created for the fan position, fan protection plate, and lower heating element protection plate to ensure more uniform heat distribution in the new design. The fan was positioned closer to the center of the oven, resulting in more effective speed and temperature distribution. In the new fan protection plate design, the number of intake and exhaust holes was increased without affecting the inlet speed. It was found that the existing holes in the lower grid on the lower heating element were insufficient, leading to the design of a grid with denser holes in the new design. These improvements in the new midi oven have resulted in reaching cooking temperatures in shorter times, thereby enhancing thermal efficiency.

Keywords: domestic oven, energy efficiency, CFD analysis.

1. GİRİŞ

Günümüz koşullarında ev tipi fırın üretiminde daha düşük enerji kullanan yüksek ısı verime sahip fırınların üretimi ön plandadır. Günümüzde uluslararası standartlar bütün elektrikli ev cihazlarında enerji tüketimini sınırlayıcı önlemler almaktadır, Dolayısıyla elektrikli ev tipi fırınlarda da enerji tüketimini en aza indirmek hedeflenmekte ve teşvik edilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda kabin tasarımı üzerine az çalışma olduğu görülmüştür. Fırın ön kapaklarında ısı transfer mekanizmaları (S. Aslı KAYIHAN, 2003) hareketli raflar üzerine polimer içerikli malzeme tasarımıdır. (R. Rıdvan Sekmen, 2014) pişirme kalitesi ve sürelerini kısaltma üzerine çalışmalara rastlanılmıştır. (Onur ÇAĞSAL, 2003)

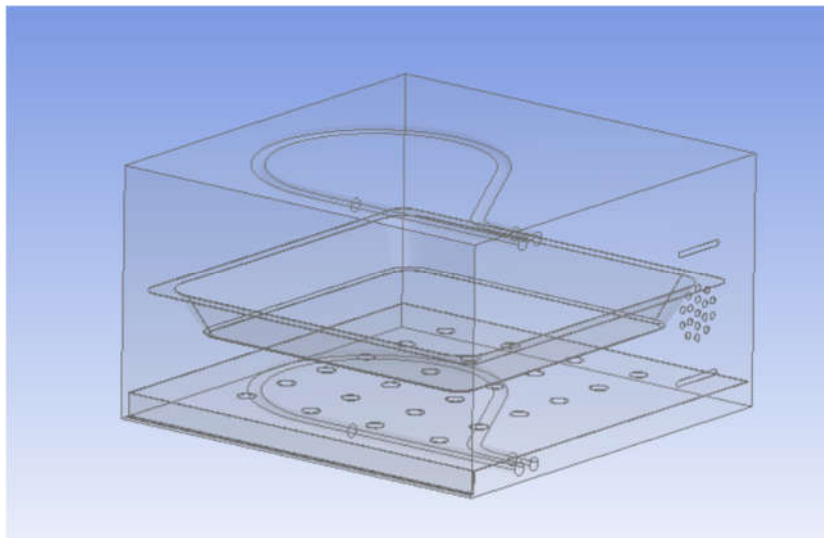
Bu çalışmada ise elektrikli ev tipi fırınlarda enerji tasarrufunu ön planda tutan ve ısı verimi daha yüksek pişirme kabini tasarımı yapmak amaçlanmıştır. Mevcut elektrikli ev tipi fırınlardan farklı olarak pişirme kalitesine bağlı enerji verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik ısı performansı geliştirilmiş inovatif yenilikçi ev tipi fırının tasarımı ile daha düşük enerji tüketen, pişirme kalitesi yüksek bir fırın tasarımı hedeflenmiştir.

2. YÖNTEM

Tasarımını geliştirmek için piyasada ticari olarak satışı olan ve aşağıda özellikleri belirtilen ev tipi mini fırın ele alınmıştır.



Şekil 1. 40 lt mini fırın görüntüsü



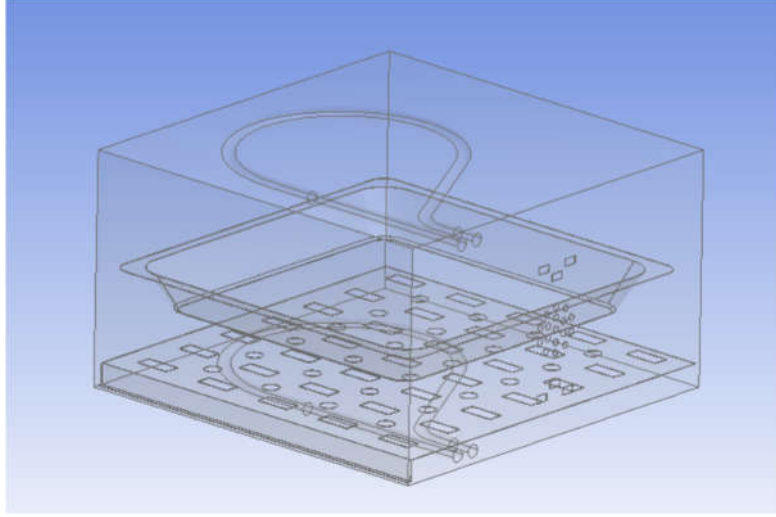
Şekil 2. Mevcut mini fırın katı görünümü

40 lt fanlı mini fırın alt üst elektrikli armut rezisdanslara sahip her bir rezisdans 720 °C yüzey sıcaklığına sahiptir. Alt rezisdans koruma ızgarası mevcuttur. Maks. merkez sıcaklığı 300 °C civarındadır. Fırın timerli ve termostatlı versiyonu ile üretilmektedir.

Had analizleri Ansys programı kullanılarak yapılmıştır, ilk analizde yukarıda özellikleri belirtilen fırının çalışma koşullarında analizi yapılmış ve veriler elde edilmiştir. Analiz sonucu ısıl tabakalaşmanın olduğu bölgeler belirlenmiştir.

Yapılan analiz değerlendirme doğrultusunda daha homojen bir ısı dağılımı sağlaması için fan konumu değiştirilmiş, fan ve alt ısıtıcı koruma sacı yeniden tasarlanmıştır.

Yeni belirlenen tasarımın şekli aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 3. Yeni tasarımda mini fırın katı görünümü

Şekil 3.'de görüldüğü üzere yeni tasarımda fan konumu yan yüzeyin ortasına konumlandırılmıştır. Ayrıca fan koruma sacındaki üfleme ve emme alanı sabit kalacak şekilde gözenek sayısı artırılmıştır. Ayrıca alt ısıtıcı koruma sacındaki gözenek sayısı ve alanı artırılmıştır.

3. ANALİZ

3.1. Mevcut fırının analizi ve sonuçları

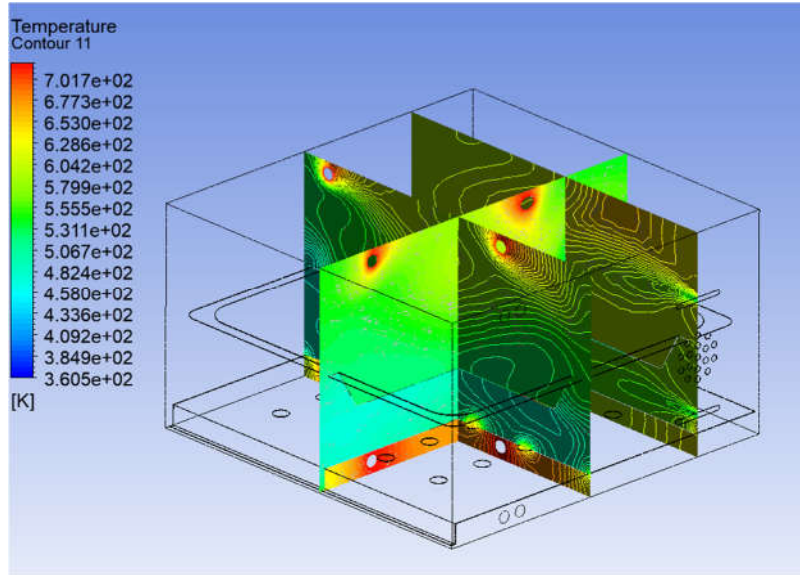
Mevcut fırının analizi kararlı (steady) şartlarda yapılmış ve aşağıdaki seçimler dikkate alınmıştır.

Akış viscous modeli k-epsilon realizable olarak seçilmiştir.

Fırın malzemeleri çelik ve cam, iç ortam hava olarak seçilmiştir.

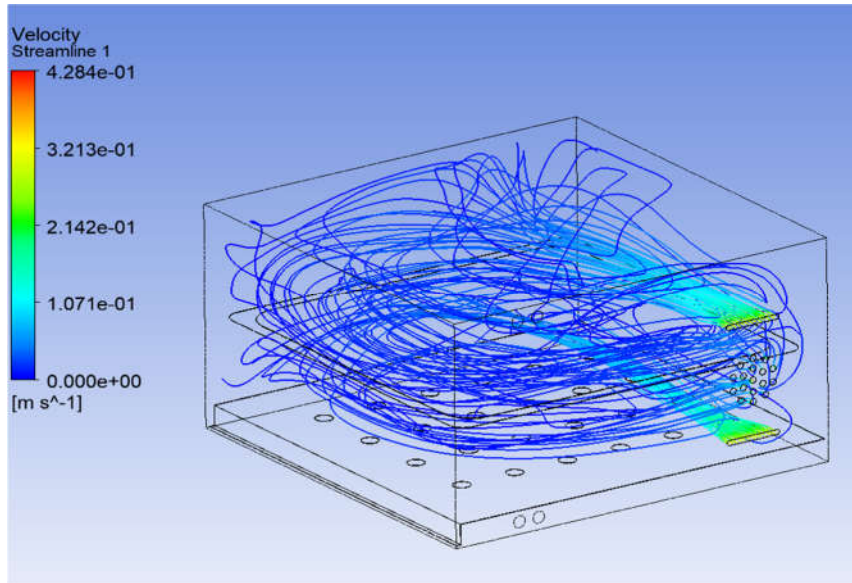
Sınır koşulları olarak alt üst rezisdans 720 K, fanda fırına giren hava hızı 0,3 m/s olarak girilmiştir. Fırın duvarları yalıtımlı olduğundan ısı kaybı olmadığı kabul edilmiştir.

Aşağıda mevcut fırın analizine ait bulgular yer almaktadır.



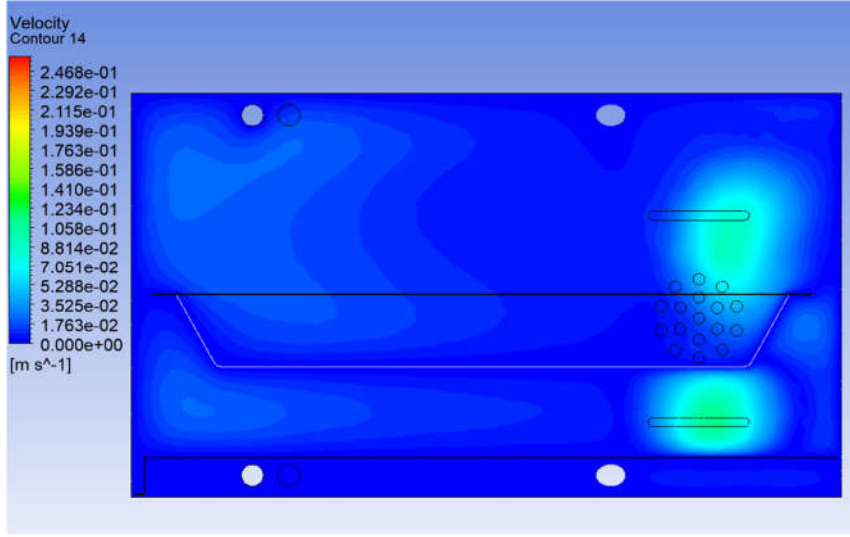
Şekil 4. Mevcut fırında hız ve sıcaklık kontürleri için alınan yüzeyler

Mevcut fırın için x-y ve y-z yönlerinde alınan hız ve sıcaklık kontürleri yukarıdaki kesitler için belirtilmiştir.



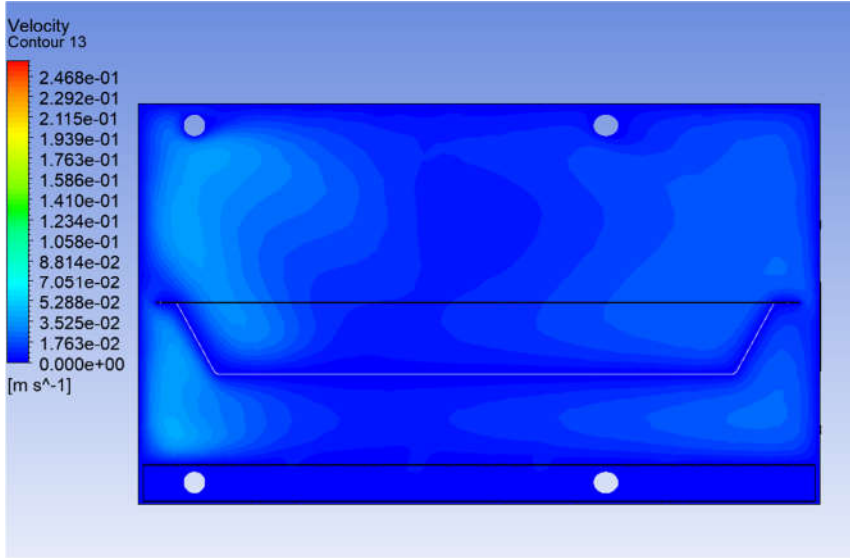
Şekil 5. Mevcut fırında fan giriş çıkış akım çizgileri

Şekil 5' te akım çizgilerinin yoğunluğu ve rengi, belirli bölgelerdeki akış hızlarının büyüklüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle hava giriş ve çıkış alanlarındaki hız değişimleri ve bazı kısımlarda dengesiz akışlar gözlenmiştir. Belli noktalarındaki homojen olmayan akış gözlenmektedir. Bu bölgelerin iyileştirmenin yapılması gerektiği tespit edilmiştir



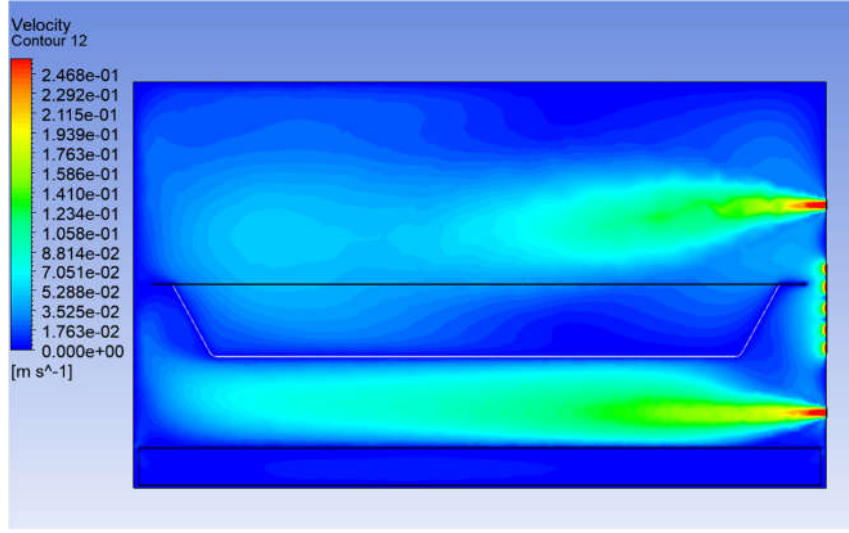
Şekil 6. Y-z eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyin hız dağılımı

Şekil 6’da hız dağılımının renk skalası, düşükten yükseğe doğru değişen akış hızlarını kolayca ayırt etmeyi sağlıyor. Görselde, hava giriş ve çıkış noktalarının çevresindeki hızın diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu açıkça görülüyor.



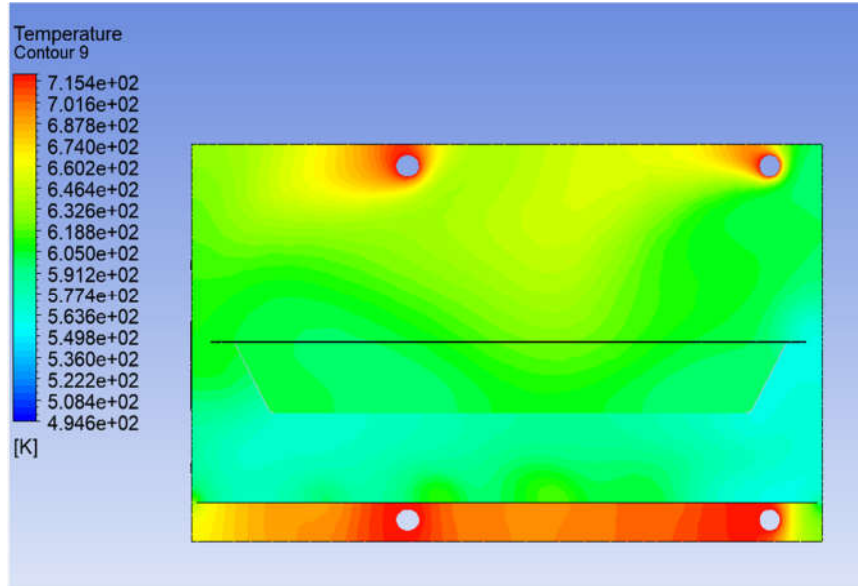
Şekil 7. x-y eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyi hız dağılımı

Şekil 7’de hız dağılımının renk skalasına bakıldığında homojen olmayan ve düşük seviyelerde hızların tespit edildiği gözlenmiştir. Bu noktalara yoğunlaşarak etkin bir hava akışının sağlanması hedeflenmiştir.



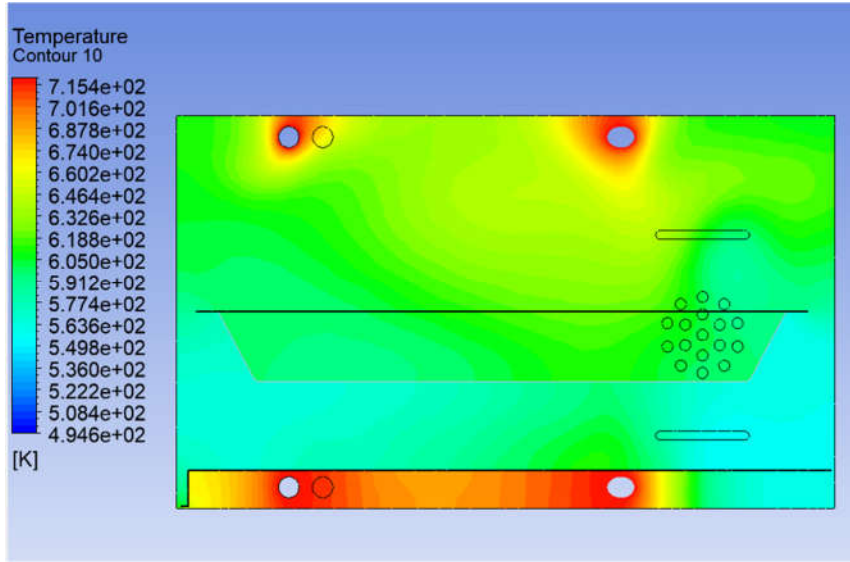
Şekil 8. Fan üfleme merkezli x-y eksenlerinde hız dağılımı

Şekil 8’de hız dağılımının renk skalası, düşükten yükseğe doğru değişen akış hızlarını kolayca ayırt etmeyi sağlıyor. Görselde, hava giriş çıkış hızlarının fırının altından ve üstünden eşit şekilde hareketlendiği ve homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.



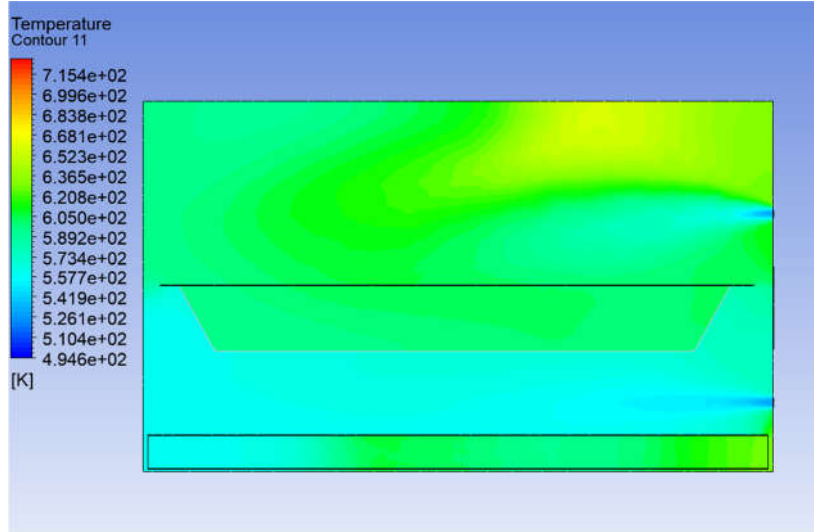
Şekil 9. x-y eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyin sıcaklık dağılımı

Şekil 9’de görüldüğü üzere fırın içerisindeki ortalama sıcaklığın ise 325 °C , fırın tepsinin altındaki hava sıcaklığı 290 °C üstünde ise 355 °C dir. Ayrıca alt ısıtıcı bölümünde hava 427 °C sıcaklıktadır. Bu durum fırın içerisinde ısıl tabakalaşma olduğunu, homojen sıcaklık dağılımının tam sağlamadığını göstermektedir. Bu da gıdaların pişirilmesi sırasında homojen bir pişirme kalitesi elde edilemeyeceği anlamına gelmektedir.



Şekil 10. Y-z eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyin sıcaklık dağılımı

Şekil 10'a baktığımızda fırın içerisindeki ortalama sıcaklığın ise 325 °C , fırın tepsisinin altındaki hava sıcaklığı 290 °C üstünde ise 355 °C dir. Ayrıca alt ısıtıcı bölümünde hava 427 °C sıcaklıktadır. Bu durum fırın içerisinde ısıl tabakalaşma olduğunu, homojen sıcaklık dağılımının tam sağlamadığını göstermektedir. Özellikle fırının sağ alt kısmında, fırın sıcaklığını n etki etmediği bir birikme tespit edilmiştir. Fan konumu itibariyle böyle bir durum gözlenmiş olabilir.



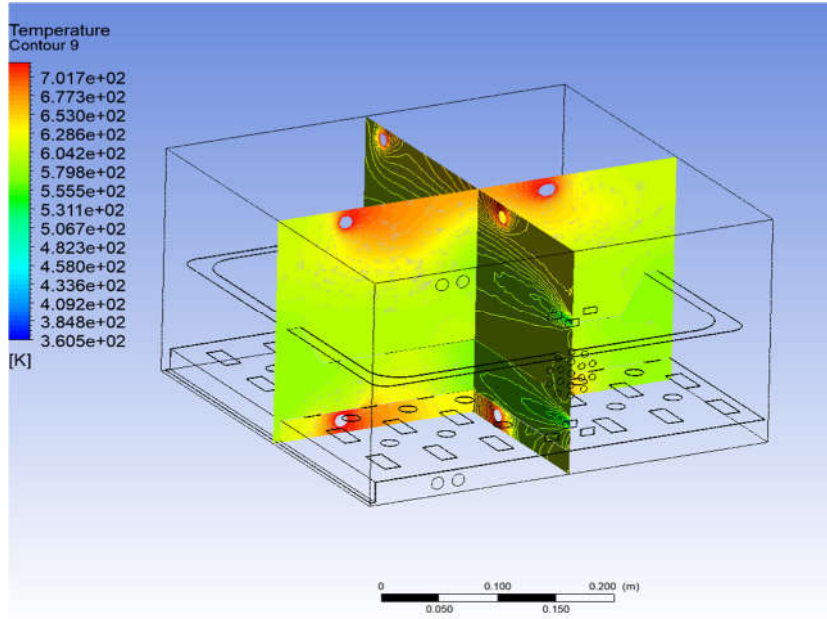
Şekil 11. X-y eksenlerinde fan üfleme merkezli yüzeyin sıcaklık dağılımı

Şekil 11'a baktığımızda fırın içerisindeki ortalama sıcaklığın ise 325 °C , fırın tepsisinin altındaki hava sıcaklığı 290 °C üstünde ise 355 °C dir. Ayrıca alt ısıtıcı bölümünde hava 347 °C sıcaklıktadır. Bu durum fırın içerisinde ısıl tabakalaşma olduğunu, homojen sıcaklık dağılımının tam sağlamadığını göstermektedir.

3.2.Yeni tasarlanan fırının analizi ve sonuçları

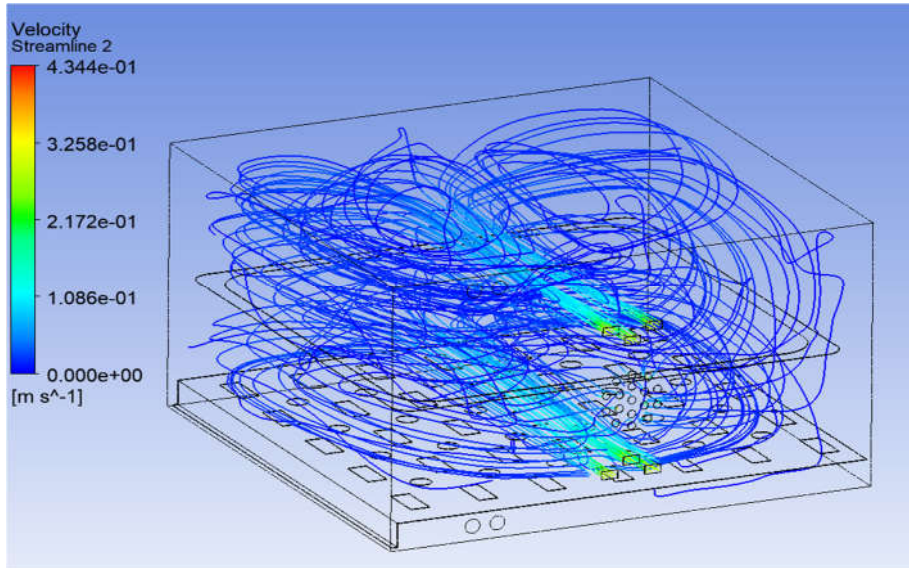
Analiz sınır koşulları ve çözüm metodolojisi mevcut fırın ile aynı tutulmuştur.

Yeni tasarlanan fırın analizine ait hız ve sıcaklık dağılımları aşağıdadır.



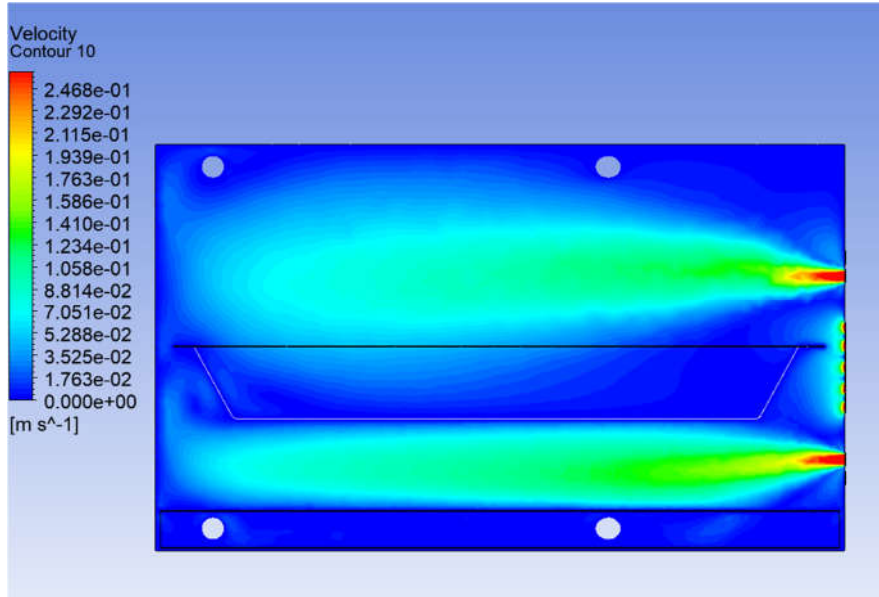
Şekil 12. Yeni tasarlanan fırında hız ve sıcaklık kontürleri için alınan yüzeyler

Yeni tasarlanan fırın, mevcut fırın ile aynı eksenlerde karşılaştırılmıştır. Bundan ötürü x-y ve y-z yönlerinde alınan hız ve sıcaklık kontürleri yukarıdaki kesitler için belirtilmiştir.



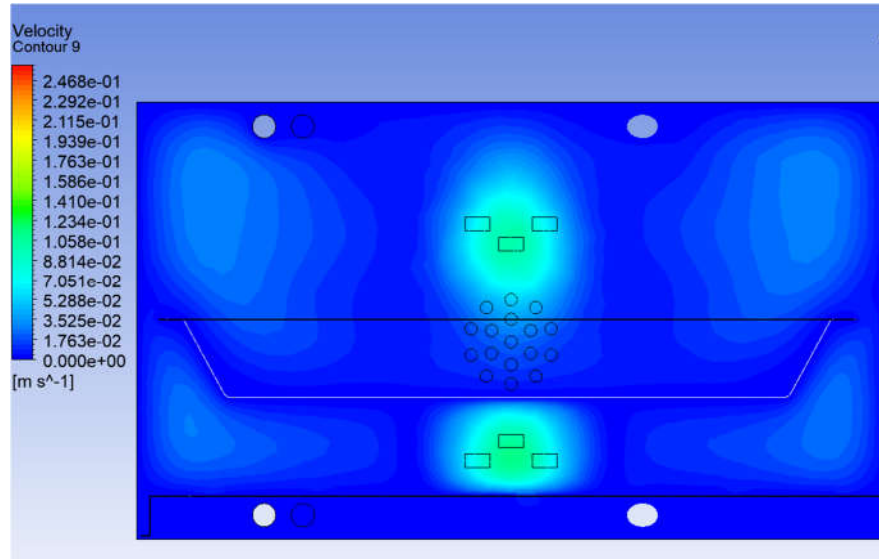
Şekil 13. Yeni tasarlanan fırında fan giriş çıkış akış çizgileri

Şekil 13' de akış çizgilerinin yoğunluğu ve rengi, belirli bölgelerdeki akış hızlarının büyüklüğünü açıkça ortaya koyuyor. Özellikle yeni tasarımda düzenli olmayan eşit ve homojen yayılmayan hız dağılımlarının önüne geçilmesi çalışılmıştır. Fırın merkezine yerleştirilen yeni fan sacında giriş deliklerinin yüzey alanları aynı kalacak şekilde üç ayrı bölüme ayrılmış ve homojen dağılımı sağlamak için düşülmüştür.



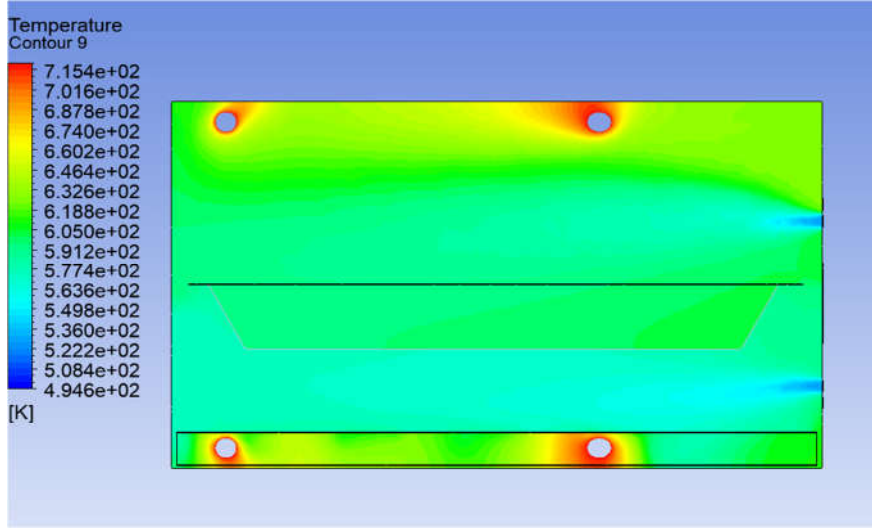
Şekil 14. X-y eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyin hız dağılımı

Şekil 14’de hız dağılımının renk skalası, düşükten yükseğe doğru değişen akış hızlarını kolayca ayırt etmeyi sağlıyor. Görselde, hava giriş çıkış hızlarının fırının altından ve üstünden eşit şekilde hareketlendiği gözlemlenmiş, herhangi bir vorteks etkisi saplanmamıştır.



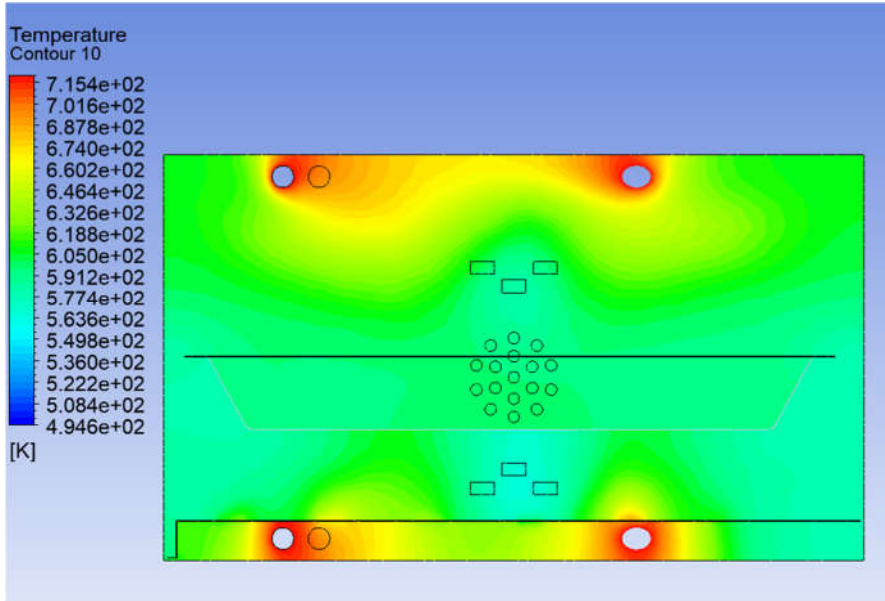
Şekil 15. Y-z eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyin hız dağılımı

Şekil 15’de hız dağılımının merkezden giriş çıkışları boyunca yüksek hızlarda, diğer noktalar ise aynada yansımaları oluşacak şekilde homojen dağıldığı görülmüştür.



Şekil 16. X-y eksenlerinde fırın merkezindeki yüzeyin sıcaklık dağılımı

Şekil 16’te görüldüğü üzere fırın içerisindeki ortalama sıcaklığın ise 332 °C , fırın tepsisinin altındaki hava sıcaklığı 290 °C üstünde ise 355 °C dir. Ayrıca alt ısıtıcı bölümünde hava 387 °C sıcaklıktadır. Mevcut fırından farklı olarak alt ızgarada sıcaklık birikmelerinin azaldığı daha homojen yayılmanın olduğu gözlemlenmiştir.

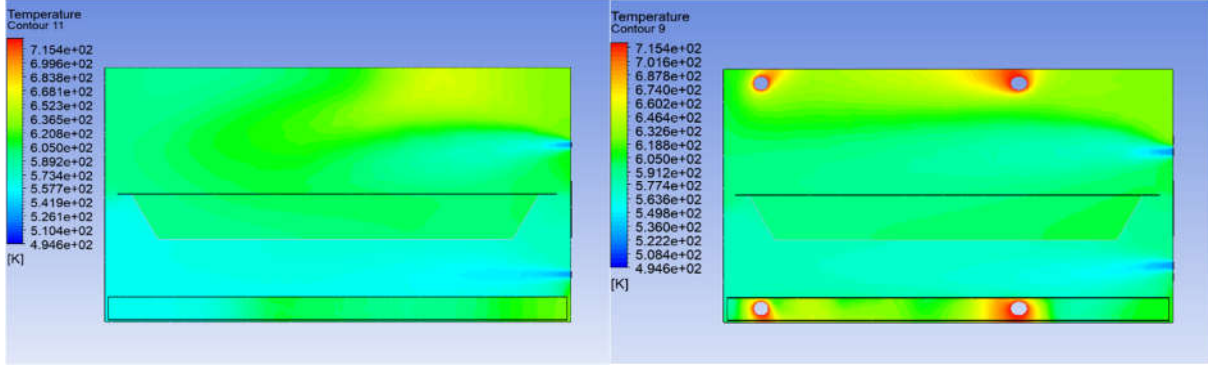


Şekil 17. y-z yönünde merkez noktasında alınan sıcaklık kontürleri

Şekil 17’te görüldüğü üzere fırın içerisindeki ortalama sıcaklığın ise 332 °C , fırın tepsisinin altındaki hava sıcaklığı 290 °C üstünde ise 355 °C dir. Ayrıca alt ısıtıcı bölümünde hava 387 °C sıcaklıktadır. Görüldüğü üzere fan sacının fırın merkezine konumlandırılması ile daha homojen ve eşit ısı dağılımı görülmektedir, buda fırın içindeki ürünün daha eşit ve nüfuziyet oranı fazla şekilde pişmesini sağlayacaktır.

4. BULGULAR ve YORUMLAR

4.1. x-y kesitindeki sıcaklık kontür karşılaştırması

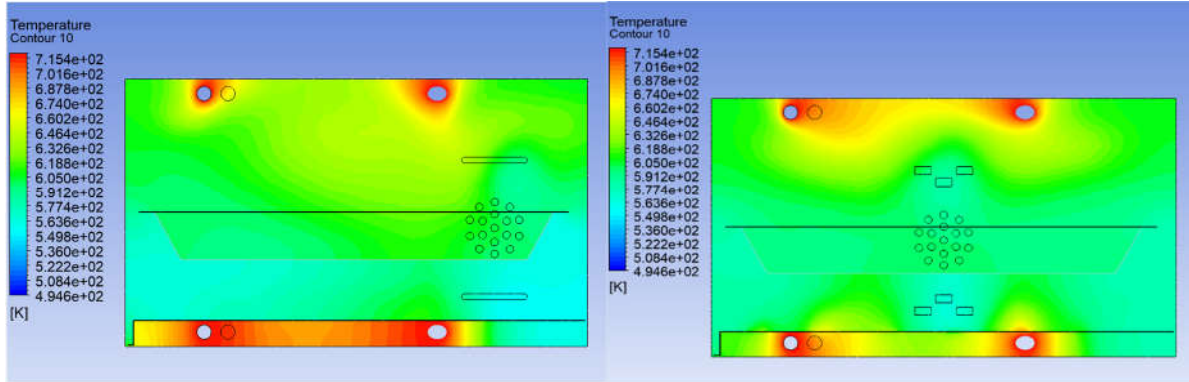


a) Mevcut fırın

b) Yeni Tasarım

Yukarı karşılaştırması verilen mevcut ve yeni tasarımda x-y eksenlerinden alınan sıcaklık kontürleri ele alınmıştır. Yapılan iyileştirmeler ile daha homojen bir akış sirkülasyonu elde edilmiştir, alt koruma ızgarası altında yoğun sıcaklık birikimleri azaltılmış, tepsi alt ve üst kısımlarında daha kontrollü akış sağlanmıştır.

4.2. y-z kesitindeki sıcaklık kontür karşılaştırması

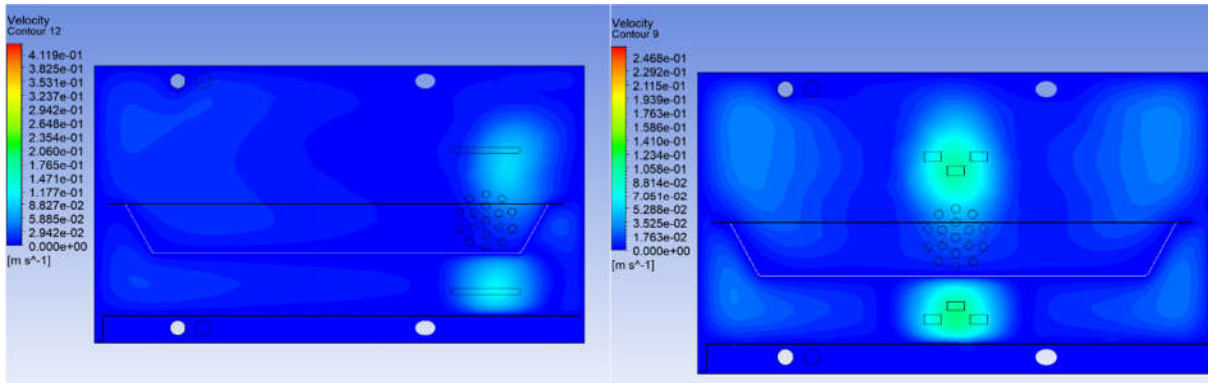


a) Mevcut fırın

b) Yeni Tasarım

Yukarı karşılaştırması verilen mevcut ve yeni tasarımda y-z eksenlerinden alınan sıcaklık kontürleri ele alınmıştır. Sağ alt kısmında düşük sıcaklık yerini daha ortalama sıcaklığa bırakmıştır. Yeni tasarımda alt koruma ızgarası menfez sayıları artırılarak ısı geçişi artırılmıştır.

4.3. y-z kesitindeki hız kontür karşılaştırması

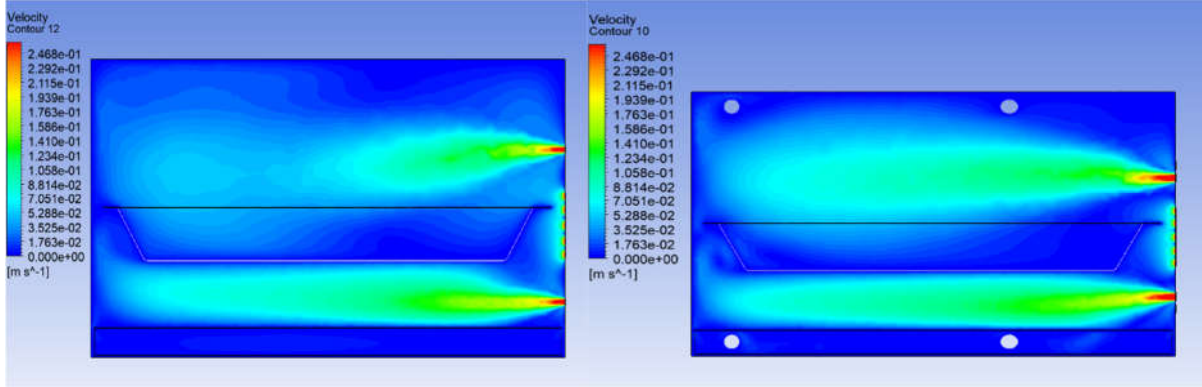


a) Mevcut fırın

b) Yeni Tasarım

Yukarıdaki şekillerde y-z kesitindeki hız kontürleri hava akışının rejimini göstermektedir. Fan koruma sacının fırın merkezine doğru alınması akışın her iki yöne eşit dağılmasını sağlamış, giriş delikleri aynı yüzey alanı kalacak şekilde eşit bölümlere ayrılması daha etkili akış sağlanmasına neden olmuştur.

4.4. x-y kesitindeki hız kontür karşılaştırması



b) Mevcut fırın

b) Yeni Tasarım

Yukarıdaki şekillerde x-y kesitindeki hız kontürleri hava akışının rejimini göstermektedir. Fan koruma sacının fırın merkezine doğru alınması akışın her iki yöne eşit dağılmasını sağlamıştır.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, fırın içindeki sıcaklık dağılımını iyileştirmek ve homojenliği artırmak amacıyla yapılan tasarım değişiklikleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Fan konumunun değiştirilmesi ve alt ızgara tasarımındaki revizyonlar, fırın performansında önemli iyileşmeler sağlamış ve bu değişikliklerin etkileri kapsamlı analizlerle ortaya konmuştur.

Fanın fırın merkezine yakın bir noktaya taşınmasıyla, sıcak hava akışının yönlendirilmesi daha etkili hale gelmiş, böylece tüm fırın hacmi boyunca daha dengeli bir hava sirkülasyonu elde edilmiştir. Bu düzenleme, sıcak hava akışını sadece merkezde yoğunlaştırmak yerine, köşe bölgeler dahil üzere tüm iç hacimde eşit şekilde yayılmasını sağlamıştır. Sıcaklık tabakalaşmasının azalmasıyla, fırın içinde ısı homojenlik önemli ölçüde sağlanmış ve sıcaklık dağılımındaki dalgalanmalar minimize edilmiştir.

Alt ızgaradaki delik sayısının artırılmasıyla, hava dolaşımı optimize edilmiş ve alt bölgelerde oluşabilecek sıcak hava birikimlerinin önüne geçilmiştir. Izgara üzerindeki delik sayısının artışı, ısı akışını daha serbest hale getirmiş ve sıcak hava hareketinin fırın içinde daha etkin bir şekilde yönlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu değişiklik, sıcaklık farklarının azaltılmasına doğrudan katkı sağlamış ve ısı transferi süreçlerini hızlandırarak daha dengeli bir ısı ortamı oluşturmuştur.

Tüm bu değişiklikler fırının enerji tüketimini azaltacağı ve daha homojen pişirme işlemi sağlayacağı için ürün kalitesinin artmasına olanak sağlayacaktır.

6. ÖNERİLER

İlerleyen zamanlarda farklı fan geometrileri ve hızlarının etkilerinin incelenmesi, ızgara delik şekilleri ve düzenlerinin optimize edilmesi, kullanılan malzemelerin termal iletkenlik özelliklerinin değerlendirilmesi gibi ek çalışmalarla sistem performansının daha iyi incelenebileceği öngörülmektedir.

Ayrıca yeni ve mevcut tasarımların zamana bağlı analizleri de yapıp karşılaştırılacak, pişirme sıcaklığına ulaşma süreleri ve tükettikleri elektrik enerjisi miktarı belirlenecektir. Böylece daha belirgin şekilde verim farkı görülebilecektir.

Bu analizlerle, fırınlarda enerji verimliliği ve ürün kalitesini artırma çalışmalarının potansiyeli net bir şekilde ortaya konulmuş olacaktır. Yenilikçi tasarım yaklaşımları, işletme maliyetlerini düşürmenin yanı sıra, üretim süreçlerinde kaliteyi artırarak rekabet gücünü yükseltmesi hedeflenmektedir.

7. TEŞEKKÜR

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesine ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf TEKİN hocamıza teşekkürlerimi iletiyorum. Saygılarımla.

8. KAYNAKLAR

R. Rıdvan Sekmen, (2014). Ev tipi fırınlarda kullanılan hareketli raf mekanizması yataklarının polimer esaslı malzemelerle tasarım ve imalatı

S. Aslı KAYIHAN, (2003). Elektrikli fırınların ısı performansının deneysel olarak incelenmesi

Onur ÇAĞSAL, (2003). Ev tipi fırınlarda pişirme kalitesini iyileştirecek pişirme sürelerini kısaltacak alternatif pişirme metotları ile çalışan hibrit fırın çalışmaları



ENCEMINE-ÇAD İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ İLE ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMİ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Yusuf TEKİN¹

¹Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Müh. Bölümü Kayseri/TÜRKİYE.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1081-6399>

Abakar Abakar ABAKAR²

²Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Makina Müh. ABD Kayseri/TÜRKİYE.

²ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-0096-2065>

Özet

Engemine ÇAD'ın başkenti olup, Elektrik ihtiyacı dizel, LPG ve biogaz ile çalışan jenaratörler, rüzgar türbinleri ve güneş enerjisi PV panellerinden sağlanmaktadır. Şehir merkezi dışındaki yerleşlerde genellikle güneş enerjisi kullanılarak PV panellerden elektrik üretilmektedir. Duguiya şehir merkezine yakın bir yerleşke olup, nüfusu 3000 dir. Yaklaşık 500 hane vardır. Elektrik ihtiyacı güneş enerjisinden sağlanmaktadır. Yetersiz olduğu durumlarda her evde bulunan dizel jenaratörler çalıştırılmaktadır. Biz bu çalışmada bu tür yerleşkelerde PV güneş paneller yerine, vakum tüplü/Parabolik güneş kollektörlerinden ORC sistemi ile elektrik üretim sistemi tasarlamayı amaçladık. Çalışmada, N'Djamena bölgesindeki meteorolojik veriler kullanılmıştır. ORC sisteminde çalışma akışkanı olarak R134a ve R245fa soğutucu akışkanları seçilmiştir. Tasarlanan sistemin yıl boyunca sağladığı enerji miktarı ve sistem verimleri hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin verimliliği ve etkinliği hesaplanarak, sistemi üzerinde yapılabilecek iyileştirme belirlenmiştir. Yapılan prototip tasarımda güneş kollektörlü ORC elektrik üretim sisteminin veriminin %13 ila %30 arasında olduğunu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Rankine Çevrimi, Elektirk üretimi.

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR ELECTRICITY GENERATION SYSTEM WITH ORGANIC RANKINE CYCLE FOR N'DJAMENA-CHAD

Abstract

N'Djamena is the capital of Chad, electricity is provided by diesel, LPG, and biogas powered generators, wind turbines and solar PV panels. In settlements outside the city center, electricity is generally generated from PV panels using solar energy. Duguiya is a settlement close to the city center with a population of 3000. There are approximately 500 households. Electricity is provided by solar energy. When it is insufficient, diesel generators in each house are used. In this study, we aimed to design an electricity generation system with ORC system from vacuum tube / parabolic solar collectors instead of PV solar panels in such settlements. In the study, meteorological data in N'Djamena region were used. R134a and R245fa refrigerants were selected as the working fluid in the ORC system. The amount of energy provided by the designed system throughout the year and system efficiencies were calculated. In addition, the efficiency and effectiveness of the system were calculated and the improvements that can be made on the system were determined. In the prototype design, it was observed that the efficiency of the solar collector ORC electricity generation system is between 13% and 30%.

Keywords: Solar Energy, Rankine Cycle, Electric generation.

Giriş

Afrika, elektriğe erişimi olmayan 634 milyondan fazla insanla enerji yoksulluğundan en fazla etkilenen kıtadır. Oysa elektrik, ekonomik ve sosyal kalkınmanın en önemli faktörlerinden biridir. Afrika'daki genel elektrifikasyon oranının %45 olduğu tahmin edilmektedir. Bu oranın %72'si kentsel alanlarda, %28'i ise kırsal

alanlardadır. Aslında Çad, hem kırsal hem de kentsel alanlarda neredeyse enerji sürekliliği olmayan, Sürekli kesintilere maruz kalan bir ülkedir. Ülkenin %92'si bu şekilde enerji yoksunluğu yaşamaktadır. Başkent dışında genellikle elektrik saat 18:00 da gelmekte ve saat 23:00 da kesilmektedir. Elektrik üretiminin %90'ından fazlası fosil yakıtlardan üretilmektedir. Ülkede Petrol bolluğuna rağmen, üretilen petrolün çok azının Çad'ın kullanımına sunulması Çad nüfusunun elektrik enerjisine erişim oranını düşürmektedir. Başkent N'djamena'da (Encemene) kesintisiz elektrik kullanabilen nüfus oranı %14, bu oran diğer illerde %1 ile %4 arasında değişmektedir. Bu nedenden dolayı kentsel ve kırsal alanlarda elektriğe erişim sorununu çözmek için önemli adımlar atılması gerekliliğini göstermektedir.

Güneş enerjisi dünyanın en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmiş, evren var olduğu sürece sürekli yenilenmesi nedeniyle tükenmezdir ve tekelleştirilemeyen veya kontrol edilemeyen güvenli bir enerjidir, temiz ve çevre dostudur. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri kullanılarak yüksek sıcaklıkta, yüksek kalitede enerji elde edilmesi mümkündür.

Yenilenebilirliği, ulaşılabilirliği ve elektrik enerjisine dönüştürülebilirliği nedeniyle güneş enerjisi son yıllarda fosil yakıtlı sistemlere alternatif olarak konumlanmaktadır. Çad için bir geçiş alternatifi olabilir. Çad çok fazla güneş radyasyonu alan bir ülkedir ve Afrika'da çok fazla güneş ışığı alan Sahelian bölgelerinden biridir. Yerdeki küresel radyasyonun yoğunluğu günlük ortalama olarak 4,5 ila 6,5 kWh/m² arasında değişmektedir ve yıllık güneşlenme süresi ülkenin güneyinde 2850 saatten kuzeyinde 3750 saate kadar değişmektedir, bu da ülkeyi yüksek güçlü konsantre güneş enerjisi santrallerinin inşası için son derece uygun hale getirmektedir. Organik Rankine çevrimi (ORC), düşük ve orta sıcaklıklarda enerji üretim verimliliği sunan dolayısıyla güneş enerjisi ve ısı geri kazanım uygulamalarında kullanılabilen bir çevrimdir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjili ORC elektrik üretim sistemlerinin kurulumu için büyük miktarlarda güneş ışığı ve alan gerekmektedir. Bu nedenle özellikle Afrika'nın Sahelian bölgeleri ve özellikle de Çad için uygundur.

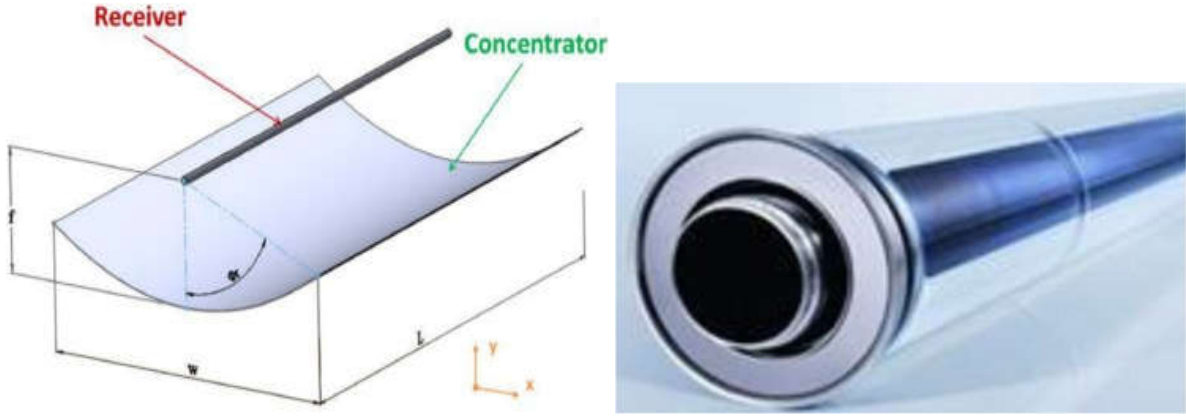
Yoğunlaştırıcılar, güneş ışınlarını odak noktasındaki toplayıcıya yansıtan bir dizi yansıtıcıdan oluşur. CST teknikleri farklı teorilere ve düzenlemelere sahiptir, ancak aynı işlem prensibine sahiptir: Güneş enerjisi toplayıcıları, yansıtıcıdan gelen güneş radyasyonunu emen ve ısıl enerjiye dönüştüren kollektörlerdir. Yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri yıllardır kullanılmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinin farklı çeşitleri vardır. Bu çalışmada parabolik oluk tipi yansıtıcı ve yansıtıcısız vakum tüplü güneş kollektörleri kullanılan, ORC çevrimi ile elektrik üretim sistemi tasarlanacaktır. Yapılan tasarımla Chad - N'Djamena (Encemene)'daki bir yerleşke için organik Rankine çevrimli güneş enerjisinden elektrik üretimi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda tasarlanacak sistemle ilgili Encemene şehrindeki güneş radyasyonu, termodinamik hesaplamalar ve sistemin teknik ön fizibilite analizi yapılacaktır.

Cad-Engemene Yerleşkesi

Çad-Encemene yılın 8 ila 9 ayı yoğun güneş enerji alan bir bölgede bulunmaktadır. Elektrik İşleri NASA İdaresi tarafından yapılan ölçüm verilerine göre Encemene ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 3300 saat (günlük toplam 10,3 saat) olup, güneş enerjisi bakımından pek çok ülkeye göre avantajlı durumdadır. Dugiya, Çad'da başkent Encemene ya 85 km uzaklıkta bir köydür. Köyde 2.000'den fazla kişi ve yaklaşık 500 ev yaşamaktadır. Köy sakinleri genellikle buzdolabı, televizyon, ütü ve bilgisayar gibi elektrikli cihazlar kullanmaktadır. Sahada yapılan araştırmaya göre, bu köyün toplam tüketiminin günlük ortama 50 kW olduğu belirlenmiştir.

Parabolik yansıtıcı güneş kollektörü

Parabolik yansıtıcı güneş kollektöründe (Tasarım 1), güneş ışığını toplamak ve yoğunlaştırmak için parabolik krom nikel kaplamalı saçtan oluşan yansıtıcı kullanılmıştır. Yansıtıcıdan gelen güneş ışınımı kollektörün odak noktasındaki toplayıcıda toplanmakta ve toplanan güneş enerjisi çalışma akışkanına aktarılmaktadır. Literatürde parabolik güneş kollektörü ile yapılan çalışmalar büyük ölçekli elektrik üreten sistemlerdir ve çalışma akışkanı sıcaklığı 373 ila 523 K aralığındadır.



Şekil 1. Parabolik güneş kolektörü.

Kollektörde kullanılan yansıtıcı, parabolik güneş kolektörlerinin optik çalışması, performanslarının belirlenmesinde en önemli fiziksel faktörlerden biridir. Kollektörün tasarımında önemli boyutlardan biri parabol açıklığı w ve diğeri ise yansıtıcı yüksekliği f değerleridir. Parabol açıklığına gelen güneş ışınımı toplayıcıya yansıtılır. Açıklık alanı, açıklık genişliği ve toplayıcı uzunluğunun çarpımı olarak hesaplanmaktadır.

$$A_{ap} = W * L \quad (1)$$

Açıklık yüksekliği, yani odak noktası ise

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad \text{ve} \quad x^2 = 4yf \quad f = \frac{w^2}{16.a} \quad (2)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır.

Kollektörde kullanılan toplayıcı, metal bir boruyu çevreleyen ara bölgesi vakumlanmış bir cam tüpten oluşmaktadır. Konveksiyon yoluyla ısı kaybını en aza indirmek için vakumlanmıştır. Dış tüpün camı borosilikattir ve geçirgenliği artırmak için tüp hem iç hem de dış yüzeyde yansımaya önleyici bir kaplama ile kaplanarak yansımaya kaybı en aza indirilmiştir. Yansımaya kaybı yaklaşık %4'tür. Emicinin emme kapasitesi üç katmanlı bir kaplama ile artırılmıştır. Bu, kızılötesi spektrumdaki ısı kaybını azaltmaktadır.

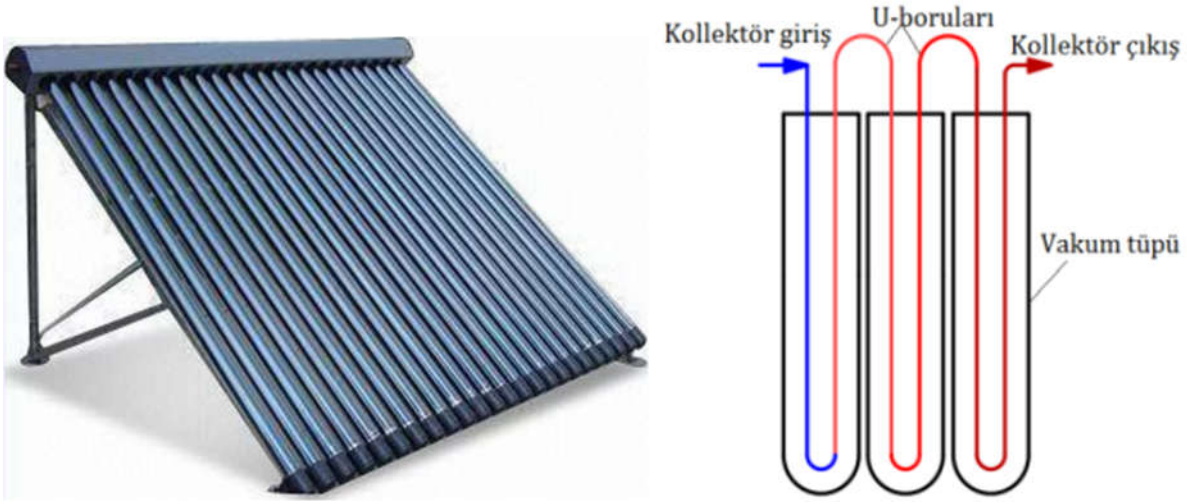
Tasarlanan parabolik yansıtıcılı güneş kolektörü 2,3 m açıklık uzunluğu ve 2 m uzunluğunda 2,3x2 m² yüzey alanına sahiptir. Parabolik güneş kolektörü doğu-batı yönünde gün içerisinde güneşi takip etmektedir. Kollektör devresinde çalışma akışkanı olarak su kullanılmıştır. Tablo 1'de parabolik yansıtıcılı güneş kolektörünün özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1. Tasarlanan parabolik güneş kolektörünün özellikleri.

Parametreler	Veriler	Parametreler	Veriler
Kollektör boyutları	W = 2,3m , L = 2m	Metal Isı İletkenlik Katsayısı	16W/mK
Kollektör eğimi	15 ⁰	Metal Boru Emisivitesi	0,95
Odak uzaklığı	f= 1,1 m	Cam Örtü Dış Çapı	60mm
Yansıtıcının yansıtma oranı	$\rho = 0,9$	Cam Örtü Et Kalınlığı	3 mm
Emici Metal Boru Dış Çapı	90mm	Isı İletkenlik Katsayısı	300W/mK
Emici Metal Botu Et Kalınlığı	3mm	Güneş Işınlarnını Geçirgenlik oranı	0,90

Yansıtıcısız Vakum tüplü güneş kolektörü

Vakumlu cam tüplü borulardan tasarlanan güneş kolektöründe (Tasarım 2) kullanılan toplayıcı Şekil 2'de görülmektedir. Bu vakum tüplü güneş toplayıcısı, iç içe geçmiş eş eksenli ara bölgesi vakumlu iki cam tüp ve cam tüpün içine yerleştirilmiş u şeklindeki bakır borudan oluşmaktadır.



Şekil 2. Yansıtıcısız U vakum tüplü güneş kolektörü.

Tablo 2. Yansıtıcısız U vakum tüplü güneş kolektörünün özellikleri.

Parametreler		Veriler
Dış Cam Tüp Dış Çapı		0,07
İç cam tüp (Yutucu Yüzey) Dış Çapı		0,06
Dış Cam Tüp Uzunluk		1,85
İç Cam Tüp Uzunluk		1,8
Cam tüp Et Kalınlıklar		0,002
İç metal boru dış çap		0,05
İç metal boru iç çap		0,038
Dış Cam Tüp Geçirgenlik		0,9
Yansıtıcı Yüzey Yansımaya katsayısı		0,9
Yutucu Yüzey	Yutma Katsayısı	0,95
	Yayma Katsayısı	0,8
U-Bakır boru	Boru dış çapı (m)	0,010
	Et Kalınlığı (m)	0,05

Yukardaki özellikleri verilen vakumlu tüplerin 10 adeti birleştirilerek bir kolektör tasarlanmıştır. Bu kolektör Şekil 2 de görülmektedir. Kolektörde çalışma akışkanı olarak su kullanılmıştır. Daha yüksek sıcaklıklara ulaşmak istenmesi durumunda yağ da kullanılabilir.

Güneş enerjisi hesaplamaları

Güneş enerjisinden parabolik kolektörde elde edilen faydalı ısı 1a nolu denklemden vakum tüplü kolektörde ise 1b nolu denklemden hesaplanmaktadır.

$$Q_u = A_{ap} \cdot F_R \left[S - \frac{A_r}{A_{ap}} U_L (T_i - T_{amb}) \right] \quad 1a$$

$$Q_u = A_t \cdot F_R \cdot (S - U_L (T_i - T_a)) \quad 1b$$

bu formülde ki emilen güneş enerjisi miktarı

$$S = G_b \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \quad 2$$

Formülü ile hesaplanmaktadır. Burada ρ , yansıtma, τ , yutma ve α , oranıdır. G_b , dünyada yatay düzleme gelen direk Güneş ışınımı olup,

$$G_b = \tau_b G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cos 360 \frac{n}{365} \right) \cdot (\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta) \quad 3$$

formülü hesaplanmaktadır. Işın radyasyonu için atmosferik geçirgenlik τ_b ise

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right)} \quad 4$$

formülü ile hesaplanmaktadır. 1 nolu denklemdeki U_L ısı kaybı katsayısı olup,

$$U_L = \frac{Q_{\text{loss}}}{A_r \cdot (T_r - T_a)} \quad 5$$

Denkleminde ve ısı kaybı $Q_{\text{kayıp}}$ ise

$$Q_{\text{loss}} = \frac{A_r \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} - \frac{1}{\varepsilon_c} \left(\frac{D_r}{D_{ci}}\right)} \quad 6$$

denkleminde hesaplanmaktadır.

Denklemin 1 deki F_R , akış faktörüdür.

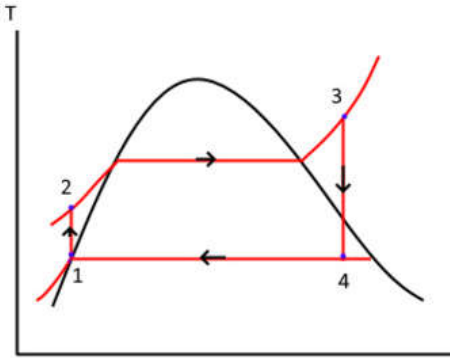
$$F_R = F' * F'' \quad 7$$

$$F' = \frac{1/U_1}{\frac{1}{U_1} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i}\right)} \quad \text{ve} \quad F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_r \cdot U_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p}\right) \right] \quad 8$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{F' \cdot A_r \cdot U_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p}\right) \right] \quad 9$$

Denklemlerinden hesaplanmaktadır. Tüm hesaplamalar Excel'de yapılmıştır.

Organik Rankine Çevrim sistemi



Güneş enerjili enerji üretim sistemleri enerji üretiminde çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Organik Rankine çevrimi (ORC), güneş enerjisini elektrığe dönüştürmek için etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Bu bölümde, parabolik yansıtıcı güneş kolektörleri ve yansıtıcısız vakum tüplü güneş kolektörleri tarafından üretilen enerji, Organik Rankine Çevrimine aktarılarak elektrik üretilen ve bu sistemin performansı analiz edilecektir. ORC de ısı transfer akışkanı olarak R134a ve R245fa seçilmiştir. ORC sıkça kullanılan organik akışkanlardan olan R134a ve R245fa, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesinde kullanılmaktadır.

ORC sistemi 4 aşamadan oluşur: Organik akışkan besleme pompasında (1-2) basınçlandırılır ve evaporatörden geçer ve harici bir ısı kaynağı (2-3) ile tamamen buharlaşır. Doymuş buhar, elektrik jeneratörüne (3-4) bağlı olan türbinde genişler. Son olarak türbinden çıkan buhar kondenserden geçer ve tekrar besleme pompasına gitmeden önce tamamen yoğuşur.

$$\text{➤ } 1-2 \quad W_{1-2} = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}v(P_2 - P_1) \quad 10$$

$$\text{➤ } 2-3 \quad Q_{2-3} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad 11$$

$$\text{➤ } 3-4 \quad W_{3-4} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad 12$$

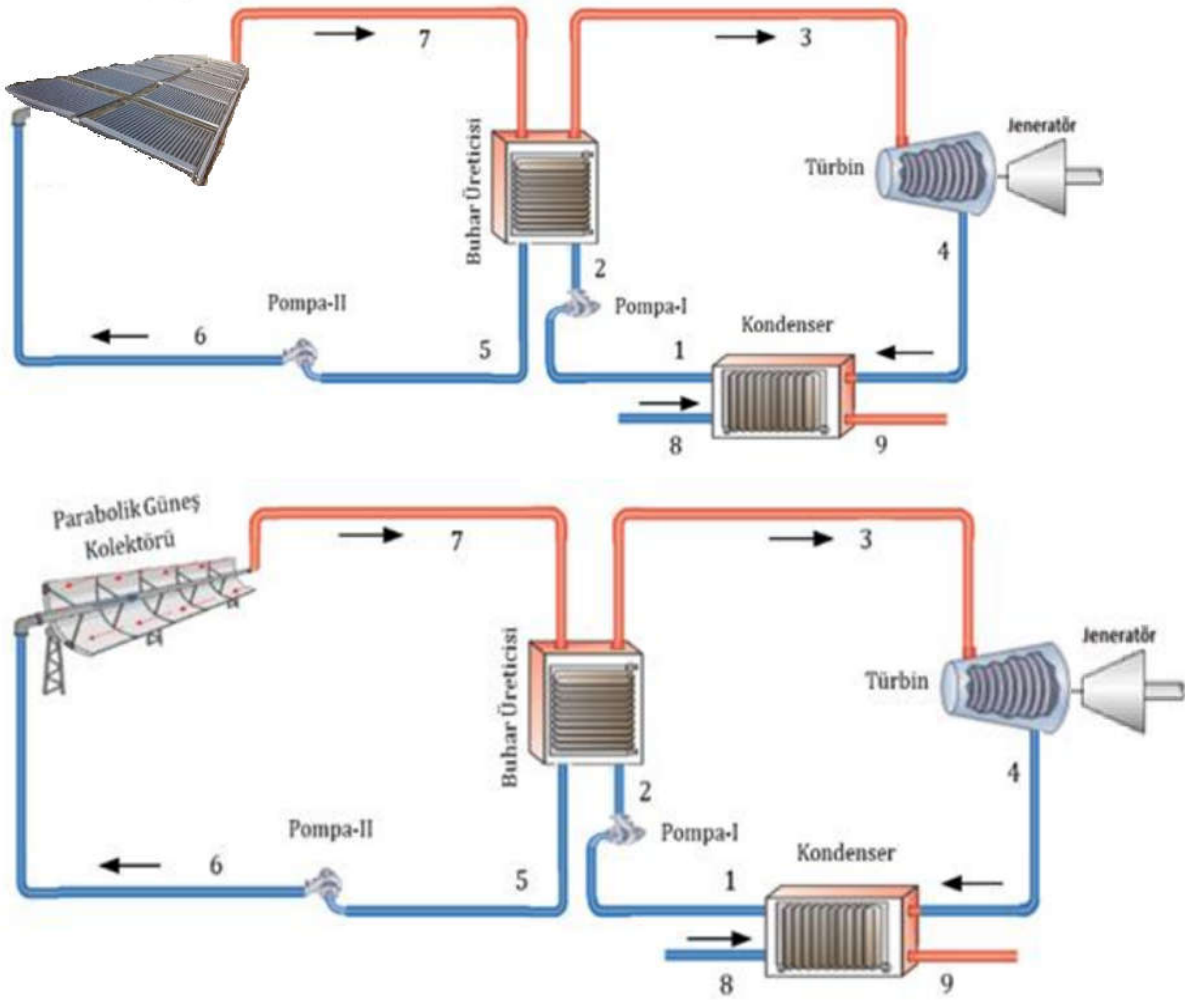
$$\text{➤ } 4-1 \quad Q_{4-1} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad 13$$

Organik Rankine Çevriminin ısı verimi

$$\eta_{th} = \frac{|W_{net}|}{Q_g} = \frac{Q_g - Q_c}{Q_g} = 1 - \frac{Q_c}{Q_g} \quad 14$$

Elektrik üretim sistemi

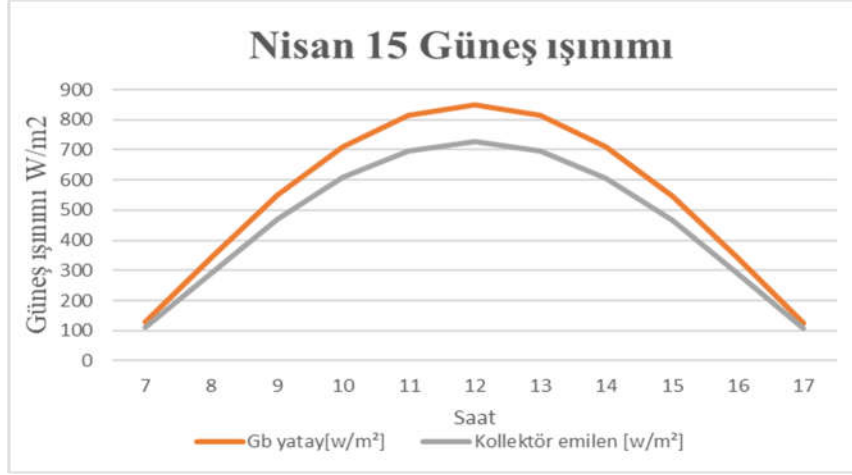
Parabolik güneş kollektörlü ve U vakum tüplü güneş kollektörlü elektrik üretim sistemi şeması şekil 3’de görülmektedir. Parabolik kollektörlü sistemde 40 adet parabolik kollektör kullanılması durumundaki hesaplamalar yapılmıştır. Vakum tüplü sistemde ise her biri 10 adet tüpten tasarlanmış vakum tüplü 50 adet kollektör kullanılması durumunda hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3. Elektrik üretim sistemi şeması.

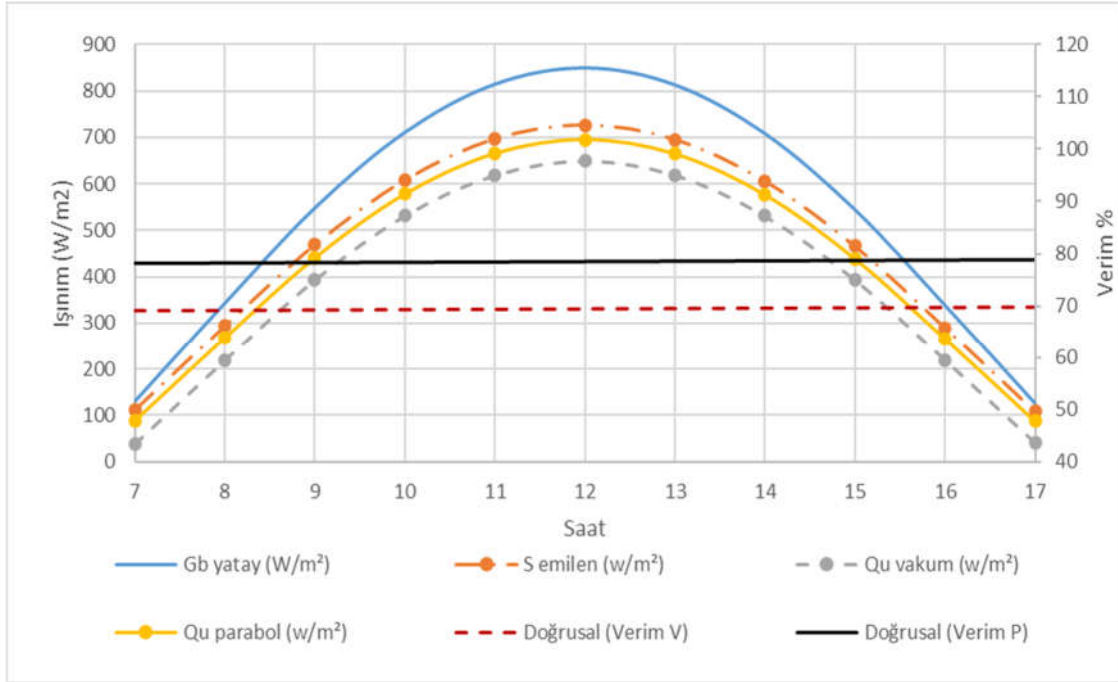
Hesaplamalar ve sonuçlar

15 Nisan günü parabolik ve U vakum tüplü güneş kolektörü için elde edilen sonuçlar aşağıda grafiklerde yer almaktadır.



Şekil 4. Parabolik kollektöre 15 Nisanda gelen güneş ışınımı.

Şekil 4'de, 15 Nisan sabah 7 ile akşam 17 arasında güneş ışınımının gelişimini göstermektedir. Gbyatay (W/m^2), Yer küreye yatay düzleme gelen ışınım olup, güneş öğlesinde maksimum değeri $850 W/m^2$ dir. Kollektör tarafından emilen güneş ışınımı ise maksimum $730 (W/m^2)$ dir.

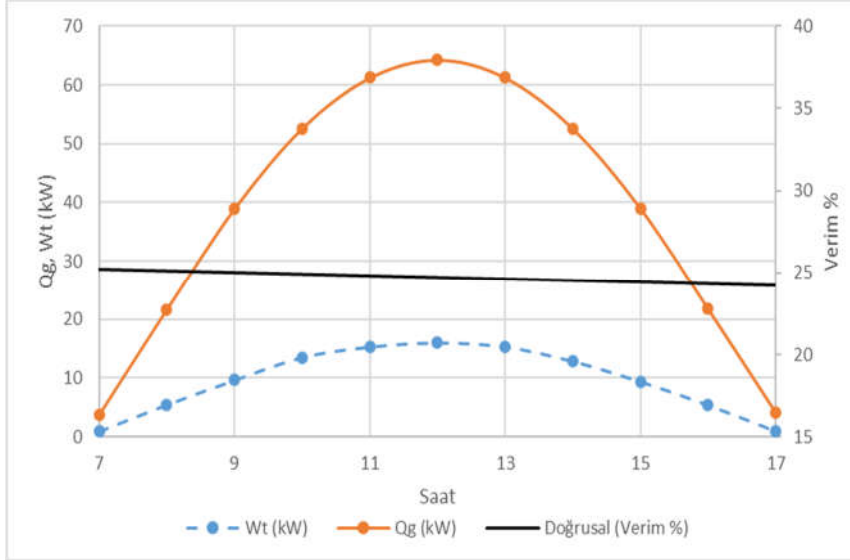


Şekil 5. Kollektörde elde edilen faydalı enerji ve verimin gün içinde değişimi.

Kollektöre gelen, kollektörde elde edilen enerji ve verimin gün içinde değişimi şekil 5'de görülmektedir. Kollektöre gelen güneş ışınımı saat 12 de $860 W/m^2$, parabolik kollektörde suya aktarılan enerji $700 W/m^2$ ve vakum tüplü kollektörde suya aktarılan enerji $640 W/m^2$ olduğu görülmektedir. Parabolik güneş kollektörünün veriminin ortalama %78, vakum tüplü kollektör veriminin ise %69 olduğu görülmektedir.

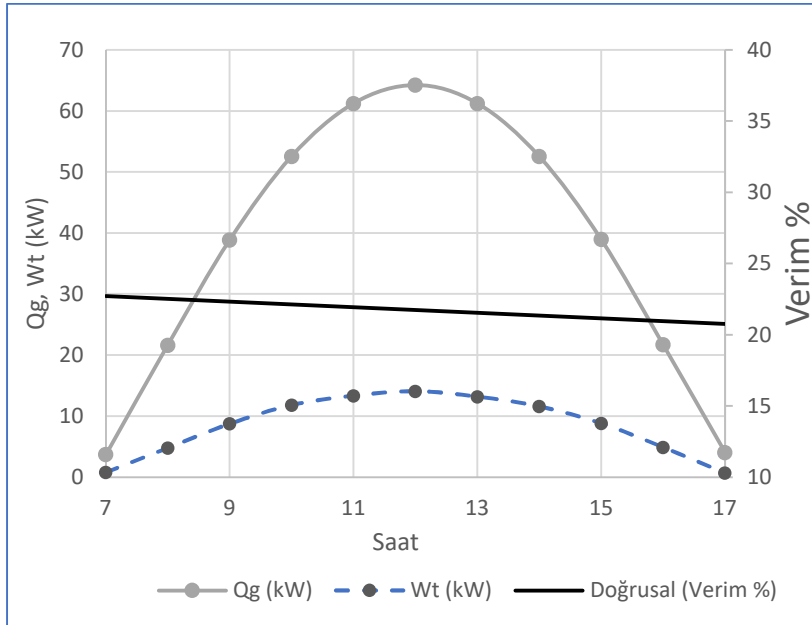
ORC çevrim hesaplamaları

Denklem 10-13, çalışma akışkanı termodinamik özellikleri ve güneş enerjisinden elde edilen veriler kullanılarak parabolik kollektörlü sistem için yapılan hesaplamalar aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.. Kollektör devresinde 40 adet parabolik kollektör olması ve R245fa için Rankine çevrimi alt basıncının 344 kPa ve üst basıncının 700 kPa ve R134a için alt basıncının 1200 kPa ve üst basıncının 1600 kPa olduğu durum için hesaplamalar yapılmıştır



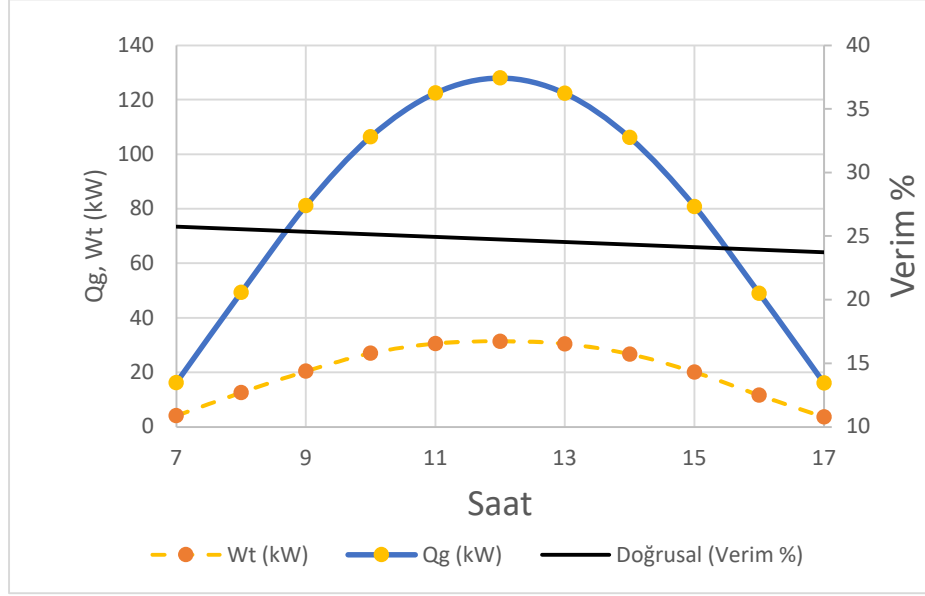
Şekil 6. Vakum tüplü kollektör, R143a akışkanı için ORC de iş, Qg ve verimin zamanla değişimi.

Vakum tüplü kollektörde R143a akışkanı kullanılması durumunda ORC çevrimine giren enerji, üretilen iş ve çevrim veriminin 15 Nisan gün içerisindeki değişimi şekil 6 da görülmektedir. Güneş öğlesinde çevrime 50 adet vakum tüplü kollektörlerden elde edilen 65 kW enerji aktarılmıştır. Buna karşılık çevrimde 16 kW iş elde edilmiştir. Çevrim verimi %24 tür.



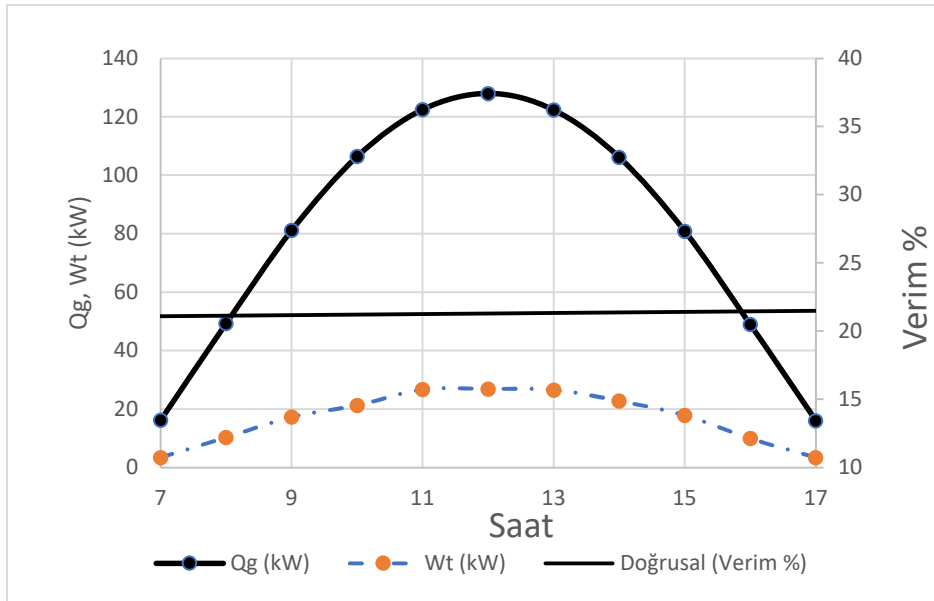
Şekil 7. Vakum tüplü kollektör, 245fa akışkanı için ORC de iş, Qg ve verimin zamanla değişimi.

Vakum tüplü kollektörde R245fa akışkanı kullanılması durumunda ORC çevrimine giren enerji, üretilen iş ve çevrim veriminin 15 Nisan gün içerisindeki değişimi şekil 7 de görülmektedir. Gün ortasında ısı güç Q_g yaklaşık 60 kW'a ulaşırken, elde edilebilecek mekanik güç 14 kW tır. Bu da enerji dönüşümü sırasındaki kayıplara işaret etmektedir. Verimlilik, muhtemelen artan kayıplar veya sistem verimliliğindeki düşüş nedeniyle gün boyunca %28 ile %24 arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 8. Parabolik kollektörlü R134a akışkanı için ORC de iş, Q_g ve verimin zamanla değişimi.

Parabolik vakum tüplü kollektörde R134a akışkanı kullanılması durumunda ORC çevrimine giren enerji, üretilen iş ve çevrim veriminin 15 Nisan gün içerisindeki değişimi şekil 8 de görülmektedir. Şekil 8'de maksimum giren ısı saat 12 de 128 kW, türbinde üretilen işin 38 kW ve çevrim veriminin %24 civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 9: Parabolik kollektörlü R245fa akışkanı için ORC de iş, Q_g ve verimin zamanla değişimi.

Parabolik vakum tüplü kollektörde R245fa akışkanı kullanılması durumunda ORC çevrimine giren enerji, üretilen iş ve çevrim veriminin 15 Nisan gün içerisindeki değişimi Şekil 9 da görülmektedir. Grafikte maksimum 128 kW giren ısı miktarına karşılık 14 kW iş elde edilmiş ve Çevrim verimi %22 olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Sistemden elde edilen iş ve sistem verimleri.

Saat	Parabol R134a		Parabol R245fa		Vakum R134a		Vakum R245fa	
	Wt (kW)	Verim	Wt (kW)	Verim	Wt (kW)	Verim	Wt (kW)	Verim
7	4,1	25,3	0,8	21,9	0,9	24,7	0,8	21,9
8	12,6	25,5	4,8	22,2	5,4	25,2	4,8	22,2
9	20,4	25,2	8,8	22,5	9,6	24,8	8,8	22,5
10	27,0	25,4	11,8	22,5	13,5	25,7	11,8	22,5
11	30,6	25,0	13,4	21,8	15,3	25,0	13,4	21,8
12	31,4	24,6	14,1	21,9	16,0	24,9	14,1	21,9
13	30,5	24,9	13,2	21,6	15,3	25,0	13,2	21,6
14	26,7	25,2	11,6	22,1	12,9	24,4	11,6	22,1
15	20,1	24,9	8,8	22,7	9,4	24,1	8,8	22,7
16	11,6	23,7	4,9	22,6	5,4	24,8	4,9	22,6
17	3,6	22,6	0,7	17,4	1,0	23,6	0,7	17,4

Parabolik ve vakum tüplü güneş kollektörlü elektrik üretim sistemlerinden elde edilebilecek iş ve sistem verimlerinin 15 Nisan gününde değişim değerleri tablo 3 de görülmektedir. Tabloda görüldüğü üzere 1600-1200 kPa basınçları arasında çalışan R134a çalışma akışkanı kullanan sistemin daha verimli olduğu, parabolik güneş kollektörü kullanılan sistemin ise daha fazla iş elde edilebileceği görülmektedir. Fakat R245fa akışkanı için çevrim basınçları 700-300 kPa olup, sistem kurulum maliyetinin ve işletme enerji tüketiminin daha az maliyetli olacağı anlaşılmaktadır.

SONUÇLAR

Encemene , Dugya yerleşkesi 15 Nisan günü için yapılan hesaplama sonuçları aşağıda yer almaktadır.

- Parabolik güneş kollektörü kullanılan Tasarım 1 ve U tipi vakum tüplü kollektör kullanılan Tasarım 2 de çalışma akışkanı olarak R134a kullanılması durumunda R245fa'dan daha yüksek iş elde edildiği görülmektedir. Fakat R134a çalışma basınç aralığının (1,6-1,2 MPa) yüksek, R245fa'nın çalışma basınç aralığının (0,7-0,3 MPa) düşük olması nedeniyle R245fa'nın kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir.
- Tasarım 1'deki sistemde 40 parabolik kollektör ve R134a akışkanı kullanılması durumunda gün içinde üretilen en yüksek iş 31kW dır.
- Tasarım 2'deki sistemde 10 tüplü 50 kollektör ve R134a akışkanı kullanılması durumunda gün içinde üretilen en yüksek iş 16 kW dır.
- Dugya yerleşkesi için öngörülen 50 kW lık enerji ihtiyacını elde etmek için Tasarım 1'deki kollektör sayısının 40 yerine 70 adet olması gerektiği belirlenmiştir.
- Dugya yerleşkesi için öngörülen 50 kW lık enerji ihtiyacını elde etmek için Tasarım 2'deki kollektör sayısının 50 yerine 160 adet olması gerektiği belirlenmiştir.

ÖNERİLER

- Sistem tüm yıl çalışması durumunda üretilebilecek iş hesaplamalarının yapılarak yıllık enerji ihtiyacının karşılanma oranları hesaplanmalıdır.
- Sistemlerin daha verimli çalışması için iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır.
- Sistemlerin mekanik tesisat elemanlarının teknik özellikleri belirlenmelidir. Mekanik tesisat projeleri hazırlanmalıdır.
- Sistemlerin kurulum ve işletme maliyet hesaplamaları yapılmalıdır.

Kaynaklar

- Ravi, K., Krishna, C. & Sendhil. K. (2021) Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation *Journal of Cleaner Production* **1 February 2021, 125296** <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125296>
- Mokhtar, G., Boussad, B., Ahmed., K., H., Dong., L. & S., S. (2021) optical numerical investigation of a solar power plant of parabolic trough collectors *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 550-569, March, 2021 Yildiz Technical University Press, Istanbul, Turkey
- Asım, A., Om, P., Rukaiya, K., Gaurav, K., Shatrudham, P., S, M., & Mozammil, H. (2024) Parabolic trough solar collectors: A sustainable and efficient energy source *Materials Science for Energy Technologies* <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.08.002>
- Ayhan, A., İsmail, B. & Mehmet. K. (2014) Vakum Tüplü Kollektörlerin Güneş Havuzu Performansı Üzerine Etkisi *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* **4 (1) (2014) 1-10** <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/14944>
- Azat, S. & Serhan, K. (2019) Bütünleşik Parabolik Yansıtıcı Ve İç Borulu Vakum Tüplü Güneş Toplayıcısının Buhar Üretimi Performans Analizi *14. ulusal tesisat mühendisliği kongresi – 17-20 nisan 2019/izmir* <https://mmoteskon.org/wp-content/uploads/2019/03/2019-052.pdf>
- Mustafa, B. B. (2019) Güneş enerjisi destekli bir organik rankine çevriminin simülasyonu ve analizi *yüksek lisans tezi* <http://acikerisim.akdeniz.edu.tr/xmlui/handle/123456789/4451>
- Görkem, Ş. (2010) Parabolik oluk tipi güneş kolektörlerinin teorik olarak incelenmesi *yüksek lisans tezi* <https://hdl.handle.net/11499/1451>
- Goni, S., Adannou, H., Diop, D., Kriga, A., Khayal, A., Nebon, B., Cheidikh Beye, A., Aziz Niang, S. & Drame, M. (2019) Observation and Simulation of Available Solar Energy at N'Djamena, Chad *Smart Grid and Renewable Energy*, 2019, 10, 165-178
- Erhan, C. (2021) Isı borulu ve güneş izleyicili parabolik oluklu güneş kolektörü ile ticari düz plaka ve ticari vakumlu tüp güneş kolektörlerinin karşılaştırması *yüksek lisans ödevi* DOI:10.13140/RG.2.2.16099.02081
- Barış, K. & Ertuğrul, C. (2015) Organik Rankine Çevrimi (ORC) ile Birlikte Çalışan Buhar Sıkıştırıcı Bir Soğutma Çevriminin Ekserji Analizi *Tesisat Mühendisliği- Sayı 150 - Kasım/Aralık 2015* https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/ccaccc010cc2223_ek.pdf
- Ertuğrul, C. (2014) cooling performance investigation of a system with an organic rankine cycle using waste heat sources *J. of Thermal Science and Technology Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, **34, 1, 101-109, 2014**
- Canan, C. (2019) jeotermal ısı kaynaklı organik rankine çevriminin (orc) farklı organik akışkanlar için termodinamik analizi *J. of Thermal Science and Technology Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, **39, 2, 169-177, 2019**
- Emrecan, E. Durmuş, K. & Filippo, V. Organik Rankine Çevrimli ve Biyokütle Yakıtlı Isı Ve Güç Tesisinin Ekonomik Analizi

**CLEAN CLOTHES, CLEAN PURCHASING: A SUSTAINABLE APPROACH TO BUYING WASHING MACHINES USING CODAS MULTI-CRITERIA DETERMINATION****Fatma ŞENER FİDAN¹**

Dr. Öğr. Üyesi, Abdullah Gül University, Department of Industrial Engineering, Kayseri, Türkiye
(Responsible Author) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2397-3628>

Sena AYDOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi, Gazi University, Department of Industrial Engineering, Ankara, Türkiye
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1267-1779>

Abstract

Consumers face several choices when purchasing a washing machine, a modern necessity. They expect washing machines to be durable, offer a variety of programs, and be competitively priced, given the wide range of brands and models available. Research indicates that washing textiles has the greatest environmental impact after the production of raw materials. Therefore, it is crucial to choose a washing machine that balances environmental impact, usability, and cost. This study utilized the CODAS (Combination Distance-based Assessment) method to identify the best washing machine available in Turkey. Environmental impacts were analyzed using Simapro Software through a life cycle assessment. The Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) problem considered key factors such as cost, the number of programs, and environmental impact. According to the research findings, the HOOVER H3WS29TAME/1-17 emerged as the best option, followed by the GRUNDIG GPWM and ALTUS AL9103MD models.

Keywords: Multi Criteria Decision Making, Life Cycle Assessment, CODAS, Washing Machine, Environmental impacts

Introduction

A washing machine is an indispensable home appliance that has transformed the laundry process. It is a machine designed to remove dirt and stains from clothing and other materials using water, detergent, and mechanical force. The first washing machine was created in the late 18th century, but it did not become a widespread household device until the mid-20th century. According to retail statistics from Euromonitor, the global market for white goods, such as washing machines, reached 247 billion USD and 490 million units in 2019 (Turkish White Goods Manufacturers Association, 2021). Furthermore, it is anticipated that the global market for white goods will continue its rapid expansion over the next five years, reaching 557 million units and 285 billion USD by 2024.

Due to its large population and household size, Turkey is one of the most significant markets. In 2021, 2.15 million washing machines were sold in Turkey (TURKSTAT, 2021). In conclusion, the washing machine has become an indispensable household appliance, making laundry day easier and more efficient. However, despite their numerous benefits, washing machines can have an environmental impact. Washing machines consume substantial amounts of water, electricity, and chemicals, which can contribute to water pollution. Nonetheless, technological advancements and a focus on sustainability have led to the development of more efficient and environmentally friendly washing machines. As a result, an increasing number of consumers are seeking eco-friendly alternatives that reduce their environmental impact. Studies indicate that the utilization phase of a fabric has the greatest environmental impact (Bourrier, 2011; Klüppel, 2003). To mitigate the negative environmental consequences associated with washing machines, it is essential to consider the machine's energy usage before purchase.

As consumers become more conscious of the environmental impact of home appliances, several regulations have been implemented to encourage the production of more environmentally friendly washing machines. This shift in consumer perception has led to an increased emphasis on environmental sustainability, in addition to price and warranty considerations. One tool that helps consumers evaluate the energy efficiency of washing

machines is the energy label, which provides information on the machine's energy consumption during operation. This information enables consumers to make informed purchasing decisions and assess the environmental impact of their choices.

The method of conducting a life cycle assessment (LCA) involves evaluating the environmental impact of a product throughout its entire life cycle, encompassing the stages from raw material extraction to disposal (ISO, 2006a, 2006b). When contemplating the purchase of a washing machine, an LCA can provide significant information on the environmental impacts of various models and manufacturers. During the assessment process, various factors are taken into consideration, including, but not limited to, energy and water usage throughout the product's lifespan, as well as the potential environmental impacts associated with its production, transportation, and eventual disposal. By comparing the LCAs of several washing machines, consumers can make better-informed decisions and choose a model with the smallest environmental footprint. Additionally, firms can utilize LCAs to identify areas for improvement and modify their manufacturing methods to reduce the environmental impact of their products. Ultimately, conducting an LCA for a washing machine purchasing decision can provide valuable insights to both consumers and producers, thereby promoting more sustainable and responsible product choices.

The environmental impacts of washing machines have been the subject of several studies. Using an LCA, Bourrier et al. (2011) compared the environmental impact of a washing machine manufactured in 2011 to one manufactured in 2005. Regardless of the machine tested, the utilization phase of the washing machine contributed 80% of the total environmental impact, according to the research. Garg et al. (2018) conducted a study on a 5 kg semi-automatic washing machine, identifying power consumption during operation and raw material consumption during assembly as the major hotspots in the machine's life cycle. Similarly, Lee and Tansel (2012) assessed the environmental impact of three water-using devices, including a washing machine, from the creation of the raw materials to their disposal. The study found that 73% of the environmental consequences during the consumption phase were linked to the energy required to heat water for washing machines. Yuan et al. (2016) conducted an LCA on a Chinese horizontal-axis washing machine and discovered that the production and usage phases had the most significant environmental impacts, with wastewater discharge during the usage phase being responsible for the eutrophication potential.

When considering the purchase of a washing machine, buyers face a variety of alternatives and considerations. In this process, multi-criteria decision-making (MCDM) is a valuable tool, enabling consumers to assess multiple criteria and prioritize their needs based on their own preferences and values. Common evaluation factors for washing machines include energy efficiency, water consumption, capacity, spin speed, noise level, durability, and brand reputation. Consumers may also consider pricing, the availability of warranties and maintenance services, and the machine's compatibility with their home's plumbing and electrical infrastructure. By comparing various criteria, customers can make informed decisions that align with their values and meet their specific needs.

Most previous research has examined the environmental impact of a single washing machine over its lifecycle. In studies on textile products, the use phase typically considers the consumption of a single washing machine, but none have addressed the consumption of multiple washing machines as an MCDM problem, incorporating both environmental and economic criteria from the consumer's perspective. The purpose of this study was to compare washing machines with similar characteristics offered by various companies in Turkey, based on economic and environmental parameters (Fidan et al., 2022). The environmental impacts were calculated using the LCA approach. The results served as input for the MCDM problem, and the CODAS (COmbinative DIstance-based ASsessment) method was used to rank the options (Keshavarz Ghorabae et al., 2016). As a relatively new method, CODAS has been applied to a limited number of topics in the literature, such as personnel evaluation and supplier selection, but not to the selection of a washing machine from the consumer's perspective (Alioğulları and Tüysüz, 2020; Badi et al., 2017; Es, 2020; Mathew and Sahu, 2018; Tuş and Adalı, 2018). This research recommended that users minimize the environmental impact of washing machines during their usage phase by making environmentally and economically informed choices at the time of purchase.

Materials and Methods

CODAS Method

CODAS is a multi-criteria decision-making (MCDM) technique that assists decision-makers in evaluating and ranking a group of options based on numerous criteria (Keshavarz Ghorabae et al., 2016). The CODAS technique has been applied in various fields, including banking, healthcare, and transportation, and has proven to be a valuable resource for decision-makers facing complex and multidimensional challenges. This method enables decision-makers to consider multiple perspectives and priorities, facilitating informed decisions through a transparent and unambiguous evaluation process.

The CODAS technique employs a distance-based approach to assess alternatives based on a set of criteria that are weighted according to their relative importance. This approach differs from others by using two separate distance calculations: Euclidean distances and taxicab distances. The technique facilitates the selection of the alternative that is the farthest from the ideal negative outcome. Specifically, the method utilizes the taxicab distance to finalize the ranking after applying the Euclidean distance. The stages of applying the CODAS methodology are outlined below:

Step 1: The decision matrix X_{ij} consisting of n alternatives and m criteria is formed as in equation (1). ($X_{ij} \geq 0$)

$$X_{ij} = [X_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Step 2: The decision matrix created in this step is normalized using equation (2). Here N_b is the benefit criterion and N_c is the cost criterion.

$$n_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} & j \in N_b \text{ ise} \\ \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} & j \in N_c \text{ ise} \end{cases} \quad (2)$$

Step 3: The weighting process of the normalized decision matrix is calculated as in equation (3). r_{ij} represents the weighted performance value normalized of i . alternative according to the j .criteria. W_j is the weight performance according to the j . criteria.

$$r_{ij} = W_j * n_{ij} \quad (3)$$

Step 4: In this step, the negative ideal solution points are calculated as in equation (4). In order to determine the negative ideal solution point, the smallest values of the elements in all columns are selected in the weighted matrix.

$$ns = [ns_j]_{1 \times m} \quad ns_j = \min_i r_{ij} \quad (4)$$

Step 5: Euclidean distance (E_i) and Taxicab distance (T_i) values for each alternative value are calculated using equation (5) and equation (6).

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad (5)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad (6)$$

Step 6: A comparative relative evaluation matrix is created. The ψ value in Equation (7) is the threshold value showing the equality of E_i distances.

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & |x| \geq \tau \\ 0 & |x| < \tau \end{cases} \quad (7)$$

The decision maker is responsible for determining the τ value, which is typically suggested to be selected within the range of 0.01 to 0.05. If the discrepancy between the Euclidean distances of the two options being compared falls below the τ value, then it's recommended to compare them using the Taxicab distances. Typically, studies use a threshold parameter value of 0.02. Comparative evaluation matrix;

$$R_a = [h_{ik}]_{n \times n} \quad \text{ve} \quad h_{ik} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_i - T_k)) \quad (8)$$

Step 7: Evaluation score for all alternatives is calculated by equation (9). The alternative with the highest evaluation score among each alternative is the best choice.

$$H_{ik} = \sum_{k=1}^n h_{ik} \quad (9)$$

Life Cycle Assessment Method

LCA is a holistic and comprehensive evaluation process designed to identify, analyze, and manage the environmental impacts associated with a specific product or service throughout its entire life cycle. This assessment considers every stage of a product's journey, starting from the extraction of raw materials and continuing through production, transportation, use, and eventual disposal or recycling. To conduct an LCA, the process is typically divided into several stages, which are calculated according to the ISO 14040 standard. These stages provide a systematic framework for conducting an LCA and ensure that all relevant factors are addressed. In Figure 1, which outlines the steps of the LCA process, the following stages can be observed:

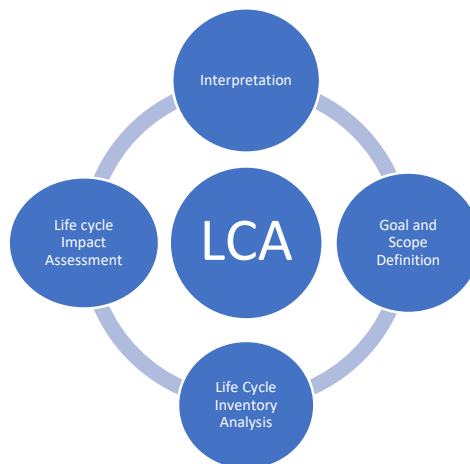


Figure 1. LCA Methodology

Step 1 Goal and Scope Definition: This stage involves establishing the objectives and boundaries of the LCA, including defining the functional unit, setting system boundaries, and determining the requirements for data collection.

Step 2 Life Cycle Inventory Analysis (LCI): This step involves gathering data on the inputs and outputs associated with each stage of the product or service's life cycle, such as energy and material inputs, air and water emissions, and waste outputs.

Step 3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA): This stage involves analyzing the environmental implications associated with the inputs and outputs identified during the inventory analysis. This may include evaluating impacts on climate change, water resources, human health, and biodiversity.

Step 4 Interpretation: This stage involves integrating the results of the inventory analysis and impact assessment to draw conclusions and provide recommendations for improving the environmental performance of the product or service.

Ultimately, the LCA process offers a comprehensive and systematic approach to analyzing the environmental impacts of a product or service. It supports informed decision-making and promotes sustainability and environmental stewardship.

Problem Statement

The multi-criteria decision-making process commences with the identification of evaluation criteria. In this study, the criteria include factors that people typically consider when purchasing a washing machine. Table 1 provides an overview of the criteria and their specifics. These criteria were sourced from the website of Europe's leading consumer electronics retailer and manufacturer-published documentation, such as energy labels. Using the LCA technique, the values for the environmental impact criteria were calculated. These criteria include global warming potential (GWP), acidification potential (AP), and eutrophication potential (EP).

To identify the alternatives, washing machines with a capacity of 9 kg were filtered, resulting in the selection of 20 washing machines from various brands and types. A secondary restriction was applied based on the number of revolutions, focusing on machines with 1200 and 1000 revolutions per minute, as these are prevalent in the market. Consequently, 13 options remained for analysis.

Table 1. Criteria List

Criteria	Name	Unit	Max/Min	Weight
C1	Number of programs	Number	Max	0.10
C2	Sale price	TL	Min	0.25
C3	GWP	kg CO ₂ eq.	Min	0.25
C4	AP	kg SO ₂ eq.	Min	0.20
C5	EP	kg PO ₄ eq.	Min	0.20

Life Cycle Assessment Implementation

The first step of the LCA analysis evaluates the environmental impacts of 100 washing cycles of a washing machine. The functional unit used in the study is 100 cycles of the washing machine, and the production steps and raw materials are excluded. The system boundaries are limited to the washing process during the use phase, employing a gate-to-gate approach. Detergent consumption is not considered in the study, as it is assumed to remain constant across the 13 washing machines being compared.

The LCI data is derived from both primary and secondary sources. When primary data is unavailable, the Ecoinvent V.3.7.1 (PhD) Database is utilized as a secondary data source (Wernet et al., 2016). The required data for the LCI phase is obtained from the energy labels published by manufacturers, which are mandated by the European Union. Table 2 presents the data collected for the alternatives studied over 100 washing cycles.

Table 2. LCI

No	Washing Machine Model (Alternatives)	Energy Label	Energy Consumption	Water Consumption
A1	LG F4J3VYP3WE	D	77	50
A2	GRUNDIG GWM 91214	B	57	49
A3	BOSCH WGA142X1TR	C	66	44
A4	SAMSUNG WW90T4020CE/AH	D	76	50
A5	ELECTROLUX EW6FN429BT	C	65	50
A6	PROFILO CMU12T91TR	C	66	44
A7	HOOVER H3WS 29TAME/1-17	A	49	46
A8	BOSCH WAU24T91TR	C	66	44
A9	ELECTROLUX EW8F229ST	C	65	49
A10	PROFILO CGA242X1TR	C	66	44
A11	ALTUS AL 9103 MD	B	57	49
A12	ALTUS AL 9123 X	A	49	42
A13	GRUNDIG GPWM 9	A	44	38

During the LCIA phase, specific environmental impacts were calculated using LCI data. The CML-IA methodology, which has been widely used in previous LCA studies, was selected for this analysis. Three distinct environmental impact potentials were evaluated based on the environmental effect categories defined by this methodology: acidification potential (AP), global warming potential (GWP), and eutrophication potential (EP). The selection of these environmental impacts was informed by literature, environmental concerns, and the study's objectives. For the calculations, Simapro 9.2.02 (PhD version) and Ecoinvent V.3.7.1 databases were utilized (Pré Consultants, 2016; Wernet et al., 2016). The results obtained in the LCIA step are presented in Table 3. These results were subsequently used as input for the CODAS methodology.

Table 3. LCIA Results

Alternatives	GWP	AP	EP
A1	45.51	0.24	0.15
A2	33.70	0.18	0.11
A3	39.01	0.21	0.13
A4	44.92	0.24	0.15
A5	38.42	0.20	0.13
A6	39.01	0.21	0.13
A7	28.97	0.15	0.10
A8	39.01	0.21	0.13
A9	38.42	0.20	0.13
A10	39.01	0.21	0.13
A11	28.97	0.15	0.10
A12	33.70	0.18	0.11
A13	26.01	0.14	0.09

CODAS Implementation

The solution of the problem with the CODAS method is given below step by step.

Step 1: The decision matrix X_{ij} were created and given in Table 4.

Table 4. Decision Matrix

Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5
A1	10	6999	45.51	0.24	0.15
A2	15	6999	33.70	0.18	0.11
A3	13	9799	39.01	0.21	0.13
A4	12	8499	44.92	0.24	0.15
A5	14	8299	38.42	0.20	0.13
A6	10	8999	39.01	0.21	0.13
A7	16	6999	28.97	0.15	0.10
A8	10	9999	39.01	0.21	0.13
A9	14	9999	38.42	0.20	0.13
A10	14	9799	39.01	0.21	0.13
A11	15	7199	28.97	0.15	0.10
A12	15	8199	33.70	0.18	0.11
A13	14	10499	26.01	0.14	0.09

Step 2: Normalization of decision matrix elements were calculated and given in Table 5.

Table 5. Normalized Decision Matrix

Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0.63	1.00	0.57	0.57	0.57
A2	0.94	1.00	0.77	0.77	0.77
A3	0.81	0.71	0.67	0.67	0.67
A4	0.75	0.82	0.58	0.58	0.58
A5	0.88	0.84	0.68	0.68	0.68
A6	0.63	0.78	0.67	0.67	0.67
A7	1.00	1.00	0.90	0.90	0.90
A8	0.63	0.70	0.67	0.67	0.67
A9	0.88	0.70	0.68	0.68	0.68
A10	0.88	0.71	0.67	0.67	0.67
A11	0.94	0.97	0.90	0.90	0.90
A12	0.94	0.85	0.77	0.77	0.77
A13	0.88	0.67	1.00	1.00	1.00
max	16				
min		6999	26	0.14	0.09

Step 3: Weighted matrix elements were calculated and given in Table 6.

Table 6. Weighted Decision Matrix

Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0.06	0.25	0.14	0.11	0.11
A2	0.09	0.25	0.19	0.15	0.15
A3	0.08	0.18	0.17	0.13	0.13
A4	0.08	0.21	0.14	0.12	0.12
A5	0.09	0.21	0.17	0.14	0.14
A6	0.06	0.19	0.17	0.13	0.13
A7	0.10	0.25	0.22	0.18	0.18
A8	0.06	0.17	0.17	0.13	0.13
A9	0.09	0.17	0.17	0.14	0.14
A10	0.09	0.18	0.17	0.13	0.13
A11	0.09	0.24	0.22	0.18	0.18
A12	0.09	0.21	0.19	0.15	0.15
A13	0.09	0.17	0.25	0.20	0.20
Weight	0.10	0.25	0.25	0.20	0.20

Step 4: In this step, the negative ideal solution points were calculated and given in Table 7.

Table 7. Negative ideal Solution Matrix

Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0.06	0.25	0.14	0.11	0.11
A2	0.09	0.25	0.19	0.15	0.15
A3	0.08	0.18	0.17	0.13	0.13
A4	0.08	0.21	0.14	0.12	0.12
A5	0.09	0.21	0.17	0.14	0.14
A6	0.06	0.19	0.17	0.13	0.13
A7	0.10	0.25	0.22	0.18	0.18
A8	0.06	0.17	0.17	0.13	0.13
A9	0.09	0.17	0.17	0.14	0.14
A10	0.09	0.18	0.17	0.13	0.13
A11	0.09	0.24	0.22	0.18	0.18
A12	0.09	0.21	0.19	0.15	0.15
A13	0.09	0.17	0.25	0.20	0.20
Negative ideal Solution	0.06	0.17	0.14	0.11	0.11

Step 5: Euclidean distance (E_i) and Taxicab distance (T_i) values for each alternative value were calculated and given in Table 8 and Table 9.

Table 8. Euclidean Distance Matrix

Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5	E_i
A1	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08
A2	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12
A3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
A4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
A5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
A6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
A7	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.15
A8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
A9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
A10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
A11	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.15
A12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
A13	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.16

Table 9. Taxicab Distance Matrix

Alternatives	C1	C2	C3	C4	C5	T_i
A1	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08
A2	0.03	0.08	0.05	0.04	0.04	0.24
A3	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.09
A4	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06
A5	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.14
A6	0.00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.09
A7	0.04	0.08	0.08	0.07	0.07	0.33
A8	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.07
A9	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.10
A10	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.10
A11	0.03	0.08	0.08	0.07	0.07	0.32
A12	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.21
A13	0.03	0.00	0.11	0.09	0.09	0.30

Step 6: A comparative relative evaluation matrix was created and is presented in Table 10. The threshold parameter value was set at 0.02.

Table 10. Comparative Relative Evaluation Matrix

Alternatives	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
A1	0.00	-0.19	0.03	0.07	0.02	0.03	-0.32	0.06	0.02	0.02	-0.30	-0.01	-0.30
A2	0.19	0.00	0.23	0.26	0.16	0.23	-0.12	0.25	0.21	0.22	-0.11	0.06	-0.11
A3	-0.03	-0.23	0.00	0.00	-0.07	0.00	-0.35	0.01	-0.01	0.00	-0.33	-0.17	-0.33
A4	-0.07	-0.26	0.00	0.00	-0.10	0.00	-0.39	0.00	-0.01	0.00	-0.37	-0.20	-0.37
A5	-0.02	-0.16	0.07	0.10	0.00	0.02	-0.28	0.10	0.02	0.02	-0.27	-0.10	-0.26
A6	-0.03	-0.23	0.00	0.00	-0.02	0.00	-0.35	0.01	0.00	0.00	-0.33	-0.17	-0.33
A7	0.32	0.12	0.35	0.39	0.28	0.35	0.00	0.38	0.34	0.34	0.01	0.18	-0.01
A8	-0.06	-0.25	-0.01	0.00	-0.10	-0.01	-0.38	0.00	-0.01	-0.01	-0.36	-0.20	-0.36
A9	-0.02	-0.21	0.01	0.01	-0.02	0.00	-0.34	0.01	0.00	0.00	-0.32	-0.15	-0.32
A10	-0.02	-0.22	0.00	0.00	-0.02	0.00	-0.34	0.01	0.00	0.00	-0.32	-0.16	-0.32
A11	0.30	0.11	0.33	0.37	0.27	0.33	-0.01	0.36	0.32	0.32	0.00	0.17	-0.02
A12	0.01	-0.06	0.17	0.20	0.10	0.17	-0.18	0.20	0.15	0.16	-0.17	0.00	-0.16
A13	0.30	0.11	0.33	0.37	0.26	0.33	0.01	0.36	0.32	0.32	0.02	0.16	0.00

Step 7: Table 11 displays the calculated evaluation scores for all the available alternatives, offering a comprehensive overview of each option's performance. Based on these scores, the alternative with the highest evaluation score was identified as the most favorable choice. The ranking of the alternatives is shown in Table 12, enabling stakeholders to easily compare and select the option that best meets their needs and preferences.

Table 11. Evaluation Score Matrix

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	H _i
A1	0.00	-0.19	0.03	0.07	0.02	0.03	-0.32	0.06	0.02	0.02	-0.30	-0.01	-0.30	-0.88
A2	0.19	0.00	0.23	0.26	0.16	0.23	-0.12	0.25	0.21	0.22	-0.11	0.06	-0.11	1.48
A3	-0.03	-0.23	0.00	0.00	-0.07	0.00	-0.35	0.01	-0.01	0.00	-0.33	-0.17	-0.33	-1.52
A4	-0.07	-0.26	0.00	0.00	-0.10	0.00	-0.39	0.00	-0.01	0.00	-0.37	-0.20	-0.37	-1.78
A5	-0.02	-0.16	0.07	0.10	0.00	0.02	-0.28	0.10	0.02	0.02	-0.27	-0.10	-0.26	-0.77
A6	-0.03	-0.23	0.00	0.00	-0.02	0.00	-0.35	0.01	0.00	0.00	-0.33	-0.17	-0.33	-1.45
A7	0.32	0.12	0.35	0.39	0.28	0.35	0.00	0.38	0.34	0.34	0.01	0.18	-0.01	3.06
A8	-0.06	-0.25	-0.01	0.00	-0.10	-0.01	-0.38	0.00	-0.01	-0.01	-0.36	-0.20	-0.36	-1.74
A9	-0.02	-0.21	0.01	0.01	-0.02	0.00	-0.34	0.01	0.00	0.00	-0.32	-0.15	-0.32	-1.34
A10	-0.02	-0.22	0.00	0.00	-0.02	0.00	-0.34	0.01	0.00	0.00	-0.32	-0.16	-0.32	-1.39
A11	0.30	0.11	0.33	0.37	0.27	0.33	-0.01	0.36	0.32	0.32	0.00	0.17	-0.02	2.86
A12	0.01	-0.06	0.17	0.20	0.10	0.17	-0.18	0.20	0.15	0.16	-0.17	0.00	-0.16	0.58
A13	0.30	0.11	0.33	0.37	0.26	0.33	0.01	0.36	0.32	0.32	0.02	0.16	0.00	2.90

Table 12. The Ranking of the Alternatives

No	Alternatives	Energy Label	H _i	Rank
A7	HOOVER H3WS 29TAME/1-17	A	3.06	1
A13	GRUNDIG GPWM	A	2.9	2
A11	ALTUS AL 9103 MD	B	2.86	3
A2	GRUNDIG GWM 91214	B	1.48	4
A12	ALTUS AL 9123 X	A	0.58	5
A5	ELECTROLUX EW6FN429BT	C	-0.77	6
A1	LG F4J3VYP3WE	D	-0.88	7
A9	ELECTROLUX EW8F229ST	C	-1.34	8
A10	PROFILO CGA242X1TR	C	-1.39	9
A6	PROFILO CMU12T91TR	C	-1.45	10
A3	BOSCH WGA142X1TR	C	-1.52	11
A8	BOSCH WAU24T91TR	C	-1.74	12
A4	SAMSUNG WW90T4020CE/AH	D	-1.78	13

The order of the alternatives obtained using the CODAS method was A7-A13-A11-A2-A12-A5-A1-A9-A10-A6-A3-A8-A4. According to Table 12, the A7 Hoover H3WS washing machine demonstrated the highest performance. A7 featured the most programs and was one of the most affordable models available. Additionally, its consumption during the use phase was notably low. It was followed by Grundig GPWM (A13) and Altus 9103 (A11), both of which had extremely similar values. Although A13 had the highest price, its significantly low consumption during the use phase secured it second place. With a H_i value of 1.48, Grundig GWM (A2) ranked fourth. Altus AL 9123 X (A12), with the final positive H_i value, was ranked fifth.

The top five alternatives with positive H_i values all had an energy class of A or B. Although the sales prices of these top five alternatives varied significantly, this variation did not influence the long-term outcomes due to their low consumption levels during the use phase. The remaining eight alternatives consisted of washing machines with energy classifications of C and D. Among these, the H_i values were typically close to one another, with a relatively modest number of programs; however, the prices varied considerably.

Findings and Discussion

This study aimed to rank 9 kg washing machines offered in Turkey by multiple brands with comparable features, utilizing a MCDM approach that considered both economic and environmental factors. The ranking process employed the LCA methodology to define environmental criteria and used the CODAS method, a recently published and innovative approach in the relevant literature, to rank the alternatives.

The results revealed that the HOOVER H3WS 29TAME/1-17 washing machine achieved the highest rank, followed by GRUNDIG GPWM and ALTUS AL 9103 MD in second and third positions. The findings highlighted that the volatility in washing machine sales prices has a less significant impact compared to the effects of long-term consumption costs. This underscores the importance of prioritizing the use phase when making purchasing decisions, as this phase substantially influences environmental performance and cost-effectiveness.

Additionally, the study demonstrated that energy labels play a crucial role in promoting environmentally friendly choices by providing transparency and guiding consumers toward energy-efficient models. The research offers valuable insights for scientists, policymakers, industry professionals, and consumers by identifying key factors that should be considered when purchasing a washing machine.

Future enhancements to this study could involve incorporating additional criteria, such as the costs associated with future usage, maintenance, and replacement, as well as experimenting with other MCDM methods to validate and expand the findings. Moreover, this study indirectly encourages consumers to reduce the environmental impact of washing machines by making informed decisions during the purchasing process, ultimately contributing to a more sustainable and responsible consumption model.

References

- Alioğulları, E., Tüysüz, F., 2020. EDAS ve CODAS yöntemiyle İstanbul ilinin dış ticaret kapasitesinin incelenmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknol. Derg.* 240–248.
- Badi, I., Shetwan, A.G., Abdulshahed, A.M., 2017. Supplier selection using COmbinative Distance-based ASsessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making, in: *Proceedings of The 1st International Conference on Management, Engineering and Environment (ICMNEE)*. pp. 395–407.
- Bourrier, C., 2011. Washing machine-ETH sustainability summer school 2011 [Web archive].
- Es, H.A., 2020. CODAS Yöntemi ile Eğitim Hizmetlerine göre İç Anadolu Bölgesindeki İllerin Değerlendirilmesi, in: *Çok Kriterli Karar Verme*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, pp. 319–332.
- Fidan, F.Ş., Kızılkaya Aydoğan, E., Uzal, N., 2022. The impact of organic cotton use and consumer habits in the sustainability of jean production using the LCA approach. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–15.
- Garg, S., Gaurav, R., Singh, G.S., Dangayach, P.N.R., Rao, P.N., 2018. A life-cycle Assessment of Household Semi-automatic Washing Machine in India. *Int J Manuf Res* 11, 66–80.
- ISO, 2006a. 14040. *Environ. Manag. Cycle Assessment—principles Framew.* 235–248.
- ISO, 2006b. 14044. *Environ. Manag. Life Cycle Assess. Requir. Guidel.* 14044.
- Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., 2016. A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making. *Econ. Comput. Econ. Cybern. Stud. Res.* 50.
- Kluppel, H.-J., 2003. The Impact of Environmental Concerns, Energy Requirements, and Water Availability on the Marketplace (Environment and the Marketplace), in: *5th World Conference on Detergents: Reinventing the Industry: Opportunities and Challenges*. The American Oil Chemists Society, p. 56.
- Lee, M., Tansel, B., 2012. Life cycle based analysis of demands and emissions for residential water-using appliances. *J. Environ. Manage.* 101, 75–81.
- Mathew, M., Sahu, S., 2018. Comparison of new multi-criteria decision making methods for material handling equipment selection. *Manag. Sci. Lett.* 8, 139–150.
- Pré Consultants, 2016. Simapro Software.
- Turkish White Goods Manufacturers Association, 2021. *Beyaz Eşya Sektörü: Geleceği Bugün Şekillendirmek*.
- TURKSTAT, 2021. *Türkiye Resmi İstatikleri*.
- Tuş, A., Adalı, E.A., 2018. Personnel assessment with CODAS and PSI methods. *Alphanumeric J.* 6, 243–256.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230.
- Yuan, Z., Zhang, Y., Liu, X., 2016. Life cycle assessment of horizontal-axis washing machines in China. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 15–28.



OPTIMIZATION OF ENERGY MANAGEMENT IN SOLAR/ WIND POWER STATIONS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Mehmet ZİLE¹

¹Gazi Üniversitesi, Tusaş Kazan Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknoloji Bölümü- Uçak Teknolojisi, Ankara, Türkiye.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0457-2124>

Abstract

Energy producers in solar-wind hybrid power plants submit their planned production and consumption estimates for the next day to the Market Management System via the Internet daily. Consumption estimates are their consumption and the consumption of the facilities they sell, if any. If energy producers in solar/wind hybrid power plants sell electricity to an Eligible Consumer, that consumption facility must estimate hourly what it will consume the next day. Eligible consumers can choose their suppliers and get their electricity from the private sector and the Electricity Distribution Companies. Solar/wind hybrid power plant producers obtain electrical energy from wind and sun and sell electrical energy to consumer companies. This consumer facility must estimate how much it will consume the next day hourly and request that amount of electrical energy from the producer. Consumers only make consumption estimates and commit to how much they will consume at what time the next day. The aim is to minimize the total energy cost. The cost of responding to instantaneous demands is high. An Artificial Intelligence Algorithm has been developed to reduce energy costs. Using this developed algorithm, a computer program has been created that provides weather, load, and production forecasts. This computer program has effectively done unit assignment, production, and load management. Thus, changes in solar/wind hybrid power plants and energy consumers have been better monitored. This study has made online optimization and coordination possible for power plants and energy consumers.

Keywords: Energy Optimization, Energy Management, Solar/ Wind Energy.

Introduction

Energy producers in solar-wind hybrid power plants submit their planned production and consumption estimates for the next day to the Market Management System via the Internet daily. Consumption estimates are their consumption and the consumption of the facilities they sell, if any (Marzband et al., 2016; Liu et al., 2018). If energy producers in solar-wind hybrid power plants sell electricity to an Eligible Consumer, that consumption facility must estimate hourly what it will consume the next day. Eligible consumers can choose their suppliers and get their electricity from the private sector and the Electricity Distribution Companies. The consumer can obtain electricity at a more affordable price. Energy producers in solar-wind hybrid power plants also offer sales in addition to their daily production schedules. Consumers only make consumption estimates and commit to how much they will consume at what time the next day. After the participants complete their data entries, the system is closed to data entry by the Market Manager. System day-ahead prices and orders are created. The total cost that will occur during that day is minimal. The system makes a combination calculation that includes all day hours and instructs the company to reduce the total cost. Although other companies' offers are lower, they have yet to be accepted. With the publication of the instructions, the day-ahead planning is completed. Although the production and consumption amounts of the day ahead are balanced, there are deviations in real-time (Sarshar et al., 2017; Tabar et al., 2017). If one of the solar-wind hybrid power plants is disabled due to a malfunction or a large consumption facility starts to operate suddenly, it disrupts the balance. The system balance is tried using the offers presented in the power market to achieve this balance. Production is easy to plan, but consumption is almost impossible to predict. The cost of responding to instantaneous demands is high. An Artificial Intelligence Algorithm has been developed to reduce energy costs. This optimization algorithm has made it possible to make weather, load, and production forecasts. Unit assignment, production management, and load management were done effectively. Thus, changes in Solar/Wind Hybrid Power Plants and Energy Consumers have been better monitored. Online optimization and coordination in power plants and energy consumers have become possible.

Artificial Intelligence

Artificial Intelligence is a field of computer science. Feedback: The science of psychology, knowledge, and understanding is closely linked to various other disciplines, such as computational linguistics, data processing, decision support systems, and computational modeling. Use all these disciplines as sources. Computer Science with Artificial Intelligence is designed to have computer systems that are intelligent, language capable, learning, reasoning, and problem-solving (Harmanani et al., 2016; Johanyák et al., 2012). Artificial intelligence can be defined as trying to understand the thinking structure of humans and developing computer processes that will reveal this similarity. So, it is an attempt to think of a programmed computer. According to a broader definition, artificial intelligence, knowledge, perception, vision, thinking, and decision-making, such as computers, are equipped with capabilities specific to human intelligence. Using programs equipped with knowledge in a particular area of expertise instead of a general-purpose program to solve each problem led to a revival in artificial intelligence. In a short time, a methodology called “Expert Systems” developed. Artificial intelligence researchers are divided into two groups at the end of all these studies. One group tries to make systems that think like humans. At the same time, the other group aimed to produce systems that could make rational decisions. It is necessary to determine how people feel about producing a human-like program. Psychological experiments can do this. After sufficient experiments, a theory can be created with the information obtained. The computer program can then be produced based on this theory. If the program's input/output and timing behavior are the same as in humans, some of the mechanisms of the program may be present in the human brain. To produce systems that think like human beings is within the research area of cognitive science. The main goal of these studies is to use computer models to analyze human thinking processes. Artificial intelligence researchers want to reach from the beginning ideal to produce systems that behave like humans. The method that produces intelligent behavior in the computer can be obtained by modeling the processes in the human brain. However, it can be produced by acting completely from other principles. Rational thinking systems are based on logic. The aim is to find the solution using inference rules after logically depicting the problem. Logic tradition, which holds a significant place in artificial intelligence, aims to produce such programs to produce intelligent systems. In Rational Behavioral Systems, artificial intelligence is defined as examining and creating rational behaviors. One of the conditions required to act rationally is to make correct inferences and act according to the results of these inferences. Sometimes, it may be necessary to do something, even though it is not a proven solution. The ability of people to solve specific problems using “if-then” rules in their knowledgebase system has inspired this type of artificial intelligence. The most advanced example of knowledge-based systems is expert systems. The specialist knowledge of a particular problem is placed in the knowledge base of an expert system. Communication between the user and the computer-based expert system will occur until the problem is solved. It is also possible to use information-based systems in the military field. For example, the decision-making situation is complex; however, decision-making logic can be transformed into a specific rule hierarchy in the areas of expertise. Such systems can be created depending on need if it is economical to use the knowledge-based system. The Rule of Reinforcement Learning is close to counseling. The unsupervised learning algorithm does not need to know the desired output. A criterion that evaluates the production versus the given input is used.

Energy Management in Solar/Wind Hybrid Power Stations

Load estimation calculation in Solar/Wind Hybrid Power Plants is necessary to plan electrical services. This calculation should be consistently estimated in terms of both the magnitude and geographic location of the electrical charge for different processes of the planning range. The primary purpose of the load estimation calculation is to determine the hourly total load value of the system. In load estimation calculations, system load and peak load value are determined. Hourly, daily, weekly, and monthly values of production energy in Solar/Wind Hybrid Power Plants are estimated. Due to the load estimation calculation, it provides exceptionally high savings for the institutions providing electricity service. Load calculations control processes and decisions such as unit determination, fuel allocation, and offline network analysis in Solar/Wind Hybrid Power Plants. System load is a dynamic and randomly moving process comprising thousands of separate components. Load behavior in Solar/Wind Hybrid Power Plants is affected by economic factors, such as time, day, season, and weather. Unit determination and hourly plans for operating units in solar/wind hybrid power plants are optimized to minimize system operating costs. The decisions should be compatible with load balance, sloping reserve, production, and ramp speed limits. In solar/wind hybrid power plants, the upper and lower wind speed limitations should be calculated. Estimating the output consistently is complex due to the

uncertainty of wind speed. Power generation output is greatly affected by wind power. Wind speed estimation is much more difficult when considering a prediction problem in a time series. In solar/wind hybrid power plants, weather forecasting is essential in solving time-dependent forecasting problems. Consistent calculations of the temperature and the amount of rainfall are required in different geographic areas. It includes weather forecasts, numerical weather values, climate monitoring, drought detection, severe weather activities, sudden flood warnings, stream monitoring, and control. There is a strong relationship between outdoor temperature and electrical power demand. In load forecast calculations, hourly weather values should be known. The performance of short-term load prediction calculations is evaluated with actual temperatures.

Optimization of Energy Management Using Developed Artificial Intelligence Algorithm

The artificial intelligence algorithm developed for optimizing energy management is shown in Figure 1.

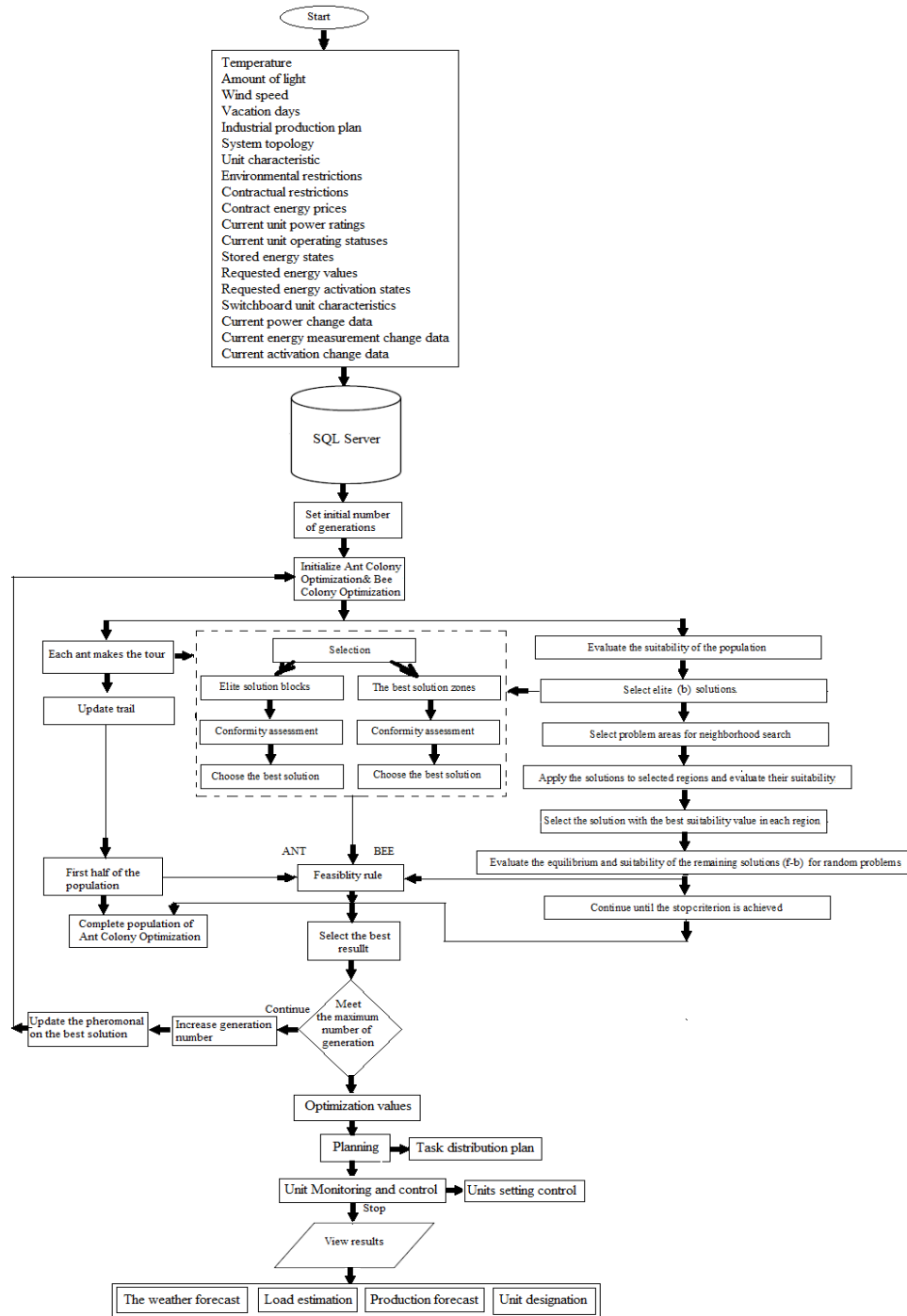


Figure 1. Artificial intelligence algorithm developed for optimization of energy management

Measured, predicted, and previous year's air temperature, light falling on the ground, and wind speed data are entered. The determined public holidays and industrial production plans for this year are entered. System topology and unit characteristics are entered. Environmental and contractual restrictions and contract energy price data are entered. Current unit power values and operating states are entered. The current stored energy content, the requests', and the activation states' current energy values are entered. Power station characteristics, Current power change data, current energy measurement change data, and current activation change data are entered as data. Optimization solutions are obtained using the created Artificial Bee/Ant Hybrid Algorithm. Using these data, high-level work planning is made for all flexible components. Units are controlled by creating task distribution plans. Setpoints are determined using data obtained from planning. Control and inspection of components are made at minute intervals. Thus, units can be monitored and controlled using setpoints and start/stop commands. Using the data obtained here, audits and controls are carried out to change the planned and contractual values. The optimization of the energy management program interface created is shown in Figure 2.

SOLAR/WIND ENERGY MANAGEMENT PROGRAM

FORECAST WEATHER

Date : 20.05.2021 Time : 09 hh 08 mm 00 ss

Temperature : +20 °C

Wind Speed : 5 m/sn

Wind Direction : 159 °

Solar Radiation : 195 W/m²

Air Pressure : 1.134 Bar

Humidity : 29 %

PROGRAM INPUTS

Vacation Days : 01.01.2021,23.0

Contract Energy Prices : 0,0309 kw/USD

Current Unit Power Ratings : 17650 kW

Stored Energy States : 118 kW

Requested Energy Values : 34680 kW

Current Power Change : +%12, -%9

Current Activation Change : +%7, -%5

Power Demand Forecast Value (kW)

29746

ENERGY GENERATION

Solar Power Plant 1

Solar Power Plant 2

Wind Power Plant 1

Wind Power Plant 2

Load Forecast Value (kW)

12480

PLANNING TOTAL GENERATION ENERGY (kW)

23670

Total Demand Price Cost (USD)

1173

SYSTEM TOTAL RESERVE (kW)

176

Enter Data Import Data Export Data Schedule Reset

Figure 2. Optimization of energy management program interface created.

The Forecasts interface allows importing weather forecast data and measurements from external sources such as weather forecast services. Externally imported weather forecasts: The difference between external forecast data and locally measured weather data should be minimized. This algorithm has been adapted to local field measurements using the developed algorithm. The obtained weather forecast data is input to planning functions' basic data for weather forecasts, taken as data from weather forecasting institutes. The Weather Forecasts Main Screen allows you to set the starting time and the forecast range. This function lets users view different airspaces defined in the system. If air process measurements are available, the actual values of each air data measurement are displayed. External weather information is imported manually. The calculation function is started manually. Forecasted weather data plans are entered. This information and plans are imported from the relevant Excel file. Weather forecast calculation results are exported as an Excel file. Allows the user to change the parameters settings on this screen. Here, External Variables and Calendar information are entered. The obtained data is imported from the Excel file. Forecast plans are entered manually. Information on these is imported from the Excel file. It allows the calculated forecasts planning for demand to be displayed on a trend screen. The production forecasts calculate the production of renewable solar/wind energy sources based on the predicted weather conditions. The developed algorithm converts two weather variables to the expected power generation, sectionally and linearly. In Figure 3, The Generation Power Forecasts Main Screen Generation Forecasts Main Screen is given.

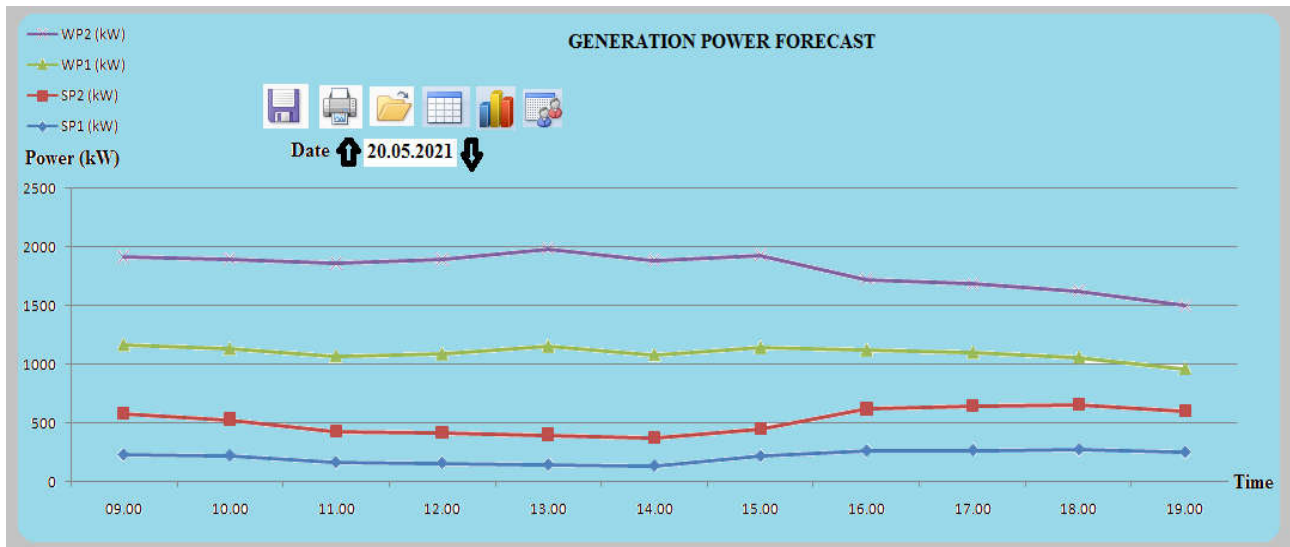


Figure 3. The Generation Power Forecasts Main Screen created

The Generated Production Forecasts Main Screen allows the start time and calculation range to be determined. The forecast data is provided, allowing the weather-related forecast settings to be changed for each unit. Predictions calculation is started manually. Prediction plans are entered. Data is imported from the Excel file. Relevant results are output from the Excel file. In addition, the relevant renewable production states are selected for each edible production class. Details regarding the respective renewable generation unit are displayed.

Conclusion and Recommendations

Artificial intelligence algorithms for optimization of energy management have been developed to reduce energy costs. An Artificial intelligence algorithm created a computer program that allows for weather forecasts, load predictions, and production estimation. By using this program, unit assignment, production management, and load management have been done effectively. The Weather Forecasts main screen allowed you to set the starting time and the forecast range. This function lets users view different airspaces defined in the system. Thus, changes in solar/wind hybrid power plants and energy consumers were better monitored. Online optimization and coordination have become possible in power plants and energy consumers. Using this computer program makes efficient planning and more accurate energy production and management estimation possible by energy-generating companies. Thus, these companies will be able to make more profit by making energy management more effective. The gain obtained using different energy sources at the right time will increase.

References

- Marzband, M., Parhizi, N., Adabi, J. M. (2016). Optimal Energy Management for Stand-Alone Microgrids Based On Multi-Period Imperialist Competition Algorithm Considering Uncertainties: Experimental Validation. *International Transactions Electric Energy Systems*, Vol.26, pp.1358-1372.
- Liu, T., Tan, X., Sun, B. (2018). Energy Management of Cooperative Microgrids: A Distributed Optimization Approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.96, pp.335-346.
- Sarshar, J., Moosapour, S.S., Joorabian, M. (2017). Multi-Objective Energy Management of A Micro-Grid Considering Uncertainty in Wind Power Forecasting. *Energy*, Vol.139, pp.680-693.
- Tabar, V. S., Jirdehi, M. A., Hemmati, R. (2017). Energy Management in Microgrid Based on The Multi-Objective Stochastic Programming Incorporating Portable Renewable Energy Resource as Demand Response Option, *Energy*, Vol.118, pp.827-839.

Harmanani, H. M., Drouby, F., Ghosn, S. B. (2016). A Parallel Genetic Algorithm for the Open-Shop Scheduling Problem Using Deterministic and Random Moves. *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 14, no. 1, pp. 130-144.

Johanyák, Z. C., Papp, O. (2012). A Hybrid Algorithm for Parameter Tuning in Fuzzy Model Identification. *Acta Polytechnica Hungarica*, vol.9, no.6, pp.153-165.

**TEST ANALYSIS OF POWER TRANSFORMERS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE****Mehmet ZİLE¹**¹Gazi Üniversitesi, Tusaş Kazan Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknoloji Bölümü- Uçak Teknolojisi, Ankara, Türkiye.¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0457-2124>**Abstract**

The faults during energy transmission and operations usually occur in power transformers. Interruptions, voltage drops, and sudden interventions in overcurrents in transformers lead to essential maintenance. Therefore, power transmission and supplier prices should be routinely tested, and transformers should be done more effectively. Transformer tests were analyzed using this artificial intelligence correction. Data was obtained from sensors and measurement devices in transformer units. It includes a data collection system consisting of hardware and software to collect and expand computer hardware—electronic hardware stores data from sensors connected to different computer transformer units. Data obtained from the transformer was transferred with PIC microcontrollers in the designed circuit and moved to the computer quickly and securely via the USB port. A configuration is written in the language of Visual Studio so that the analog environment can be presented visually in a personal digital format. The voltage values obtained from the sensors using the RS-232 serial port can be recorded on the computer and listed in the program. The measurement precision and efficiency of the designed software and hardware were tested on the natural system. The obtained data system was successfully demonstrated. This study makes remote deregulation and control of power transformers possible.

Keywords: Power Transformers, Transformer Routine Tests, Artificial Intelligence.**Introduction**

The demand for electricity in the world is increasing day by day. Electrical energy should be delivered to the consumer with the least uninterrupted loss, in the highest efficiency and most economical way. The systems used in generating, transmitting, and consuming electrical energy must be routinely tested to ensure that they are of good quality and continue to work in a quality manner (Wang et al., 2010; Akbari et al., 2010). The power transformers' field and routine power factor tests should be done regularly, and the test results should be evaluated (Samirmi et al., 2012; Samirmi et al., 2013; Sun et al., 2012). Thus, possible malfunctions will be predicted. Unwanted power outages will be prevented, and the energy quality will be maintained. The equivalent circuits of power transformers in different connection types are in the form of multi-model functions (Davaranah et al., 2013; Stojanovic et al., 2013). An artificial intelligence algorithm is used to optimize multi-model functions (Harmanani et al., 2016; Johanyák et al., 2012). The primary purpose of using this algorithm is to capture all local maximum values in power transformers in different connection forms. This study developed software in C # program language using the algorithm developed. Based on this algorithm, an interface program has been created in the Visual Basic Programming language to optimize parameters in power transformers. Using this program, performing routine analysis in power transformers has become possible.

Artificial Intelligence

Artificial Intelligence is a field of computer science. Feedback: The science of psychology, knowledge, and understanding is closely linked to various other disciplines, such as computational linguistics, data processing, decision support systems, and computational modeling. Use all these disciplines as sources. Computer Science with Artificial Intelligence is designed to have computer systems that are intelligent, language capable, learning, reasoning, and problem-solving (Harmanani et al., 2016; Johanyák et al., 2012). Artificial intelligence can be defined as trying to understand the thinking structure of humans and developing computer processes that will reveal this similarity. So, it is an attempt to think of a programmed computer. According to a broader definition, artificial intelligence, knowledge, perception, vision, thinking, and decision-making, such as

computers, are equipped with capabilities specific to human intelligence. Using programs equipped with knowledge in a particular area of expertise instead of a general-purpose program to solve each problem led to a revival in artificial intelligence. In a short time, a methodology called “Expert Systems” developed. The classification of streams under Artificial Intelligence is shown in Figure 1. Artificial intelligence researchers are divided into two groups at the end of all these studies. One group tries to make systems that think like humans. At the same time, the other group aimed to produce systems that could make rational decisions. It is necessary to determine how people feel about producing a human-like program. Psychological experiments can do this. After sufficient experiments, a theory can be created with the information obtained.

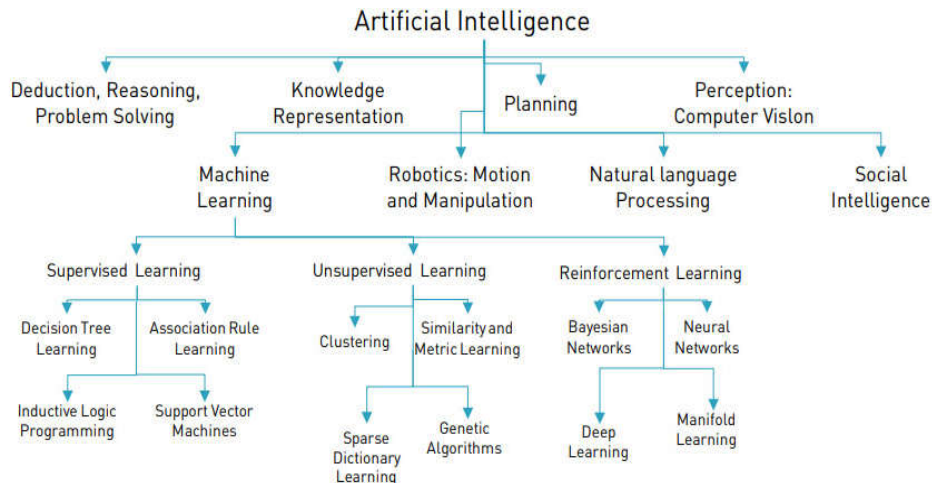


Figure 1. Classification of the stream under artificial intelligence

The computer program can then be produced based on this theory. If the program's input/output and timing behavior are the same as in humans, some of the mechanisms of the program may be present in the human brain. To produce systems that think like human beings is within the research area of cognitive science. The main goal of these studies is to use computer models to analyze human thinking processes. Artificial intelligence researchers want to reach from the beginning ideal to produce systems that behave like humans. The method that produces intelligent behavior in the computer can be obtained by modeling the processes in the human brain. However, it can be produced by acting completely from other principles. Rational thinking systems are based on logic. The aim is to find the solution using inference rules after logically depicting the problem. Logic tradition, which holds a significant place in artificial intelligence, aims to produce such programs to produce intelligent systems. In Rational Behavioral Systems, artificial intelligence is defined as examining and creating rational behaviors. One of the conditions required to act rationally is to make correct inferences and act according to the results of these inferences. Sometimes, it may be necessary to do something, even though it is not a proven solution. The ability of people to solve specific problems using “if-then” rules in their knowledgebase system has inspired this type of artificial intelligence. The most advanced example of knowledge-based systems is expert systems. The specialist knowledge of a particular problem is placed in the knowledge base of an expert system. Communication between the user and the computer-based expert system will occur until the problem is solved. It is also possible to use information-based systems in the military field. For example, the decision-making situation is complex; however, decision-making logic can be transformed into a specific rule hierarchy in the areas of expertise. Such systems can be created depending on need if it is economical to use the knowledge-based system. The Rule of Reinforcement Learning is close to counseling. The unsupervised learning algorithm does not need to know the desired output. A criterion that evaluates the production versus the given input is used.

Test Analysis in Power Transformers

The experiment test analysis diagram developed in the Kahramankazan Transformer Center Laboratory is given in Figure 2. The created measurement panel is shown in Figure 3.

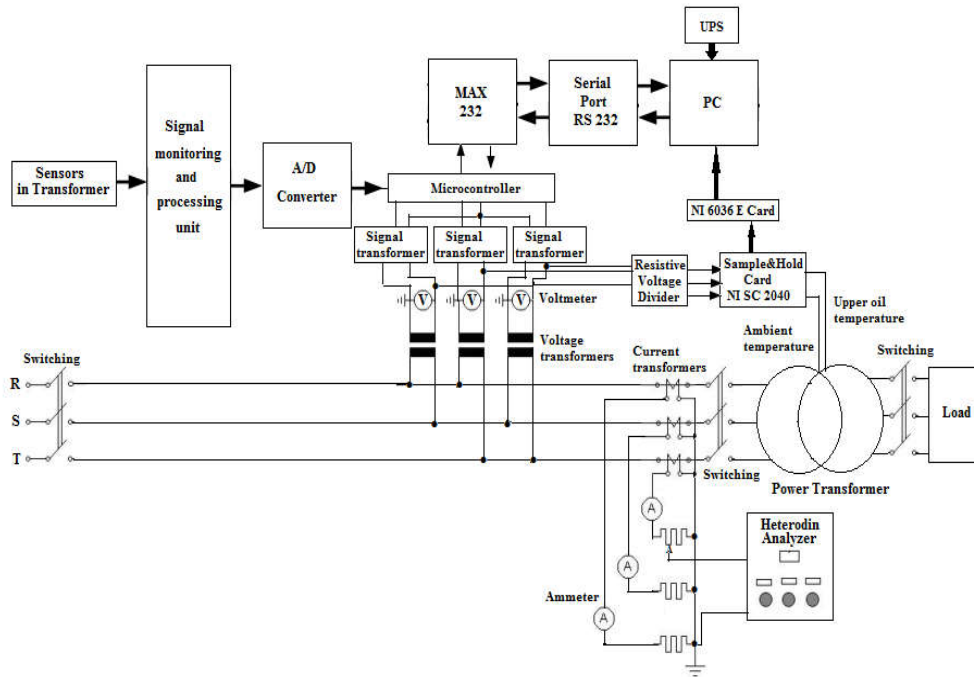


Figure 2. Created experiment test diagram in power transformers



Figure 3. Created power transformer measurement panel

The panel hardware consists of one personal computer, one uninterruptible power supply, one sampling & holding card, one data acquisition card, one resistive voltage divider card, three current and voltage transformers, and three resistive voltage dividers. There are many sensors for different transformer units, analog/digital signal converters for sensors, and many serial ports. This panel has been installed within the control building of Kahramankazan Transformer Center. Conventional current and voltage transformer information of the measurement point has been brought to the measurement system with the help of cables, and connections have been made. Information on the upper oil temperature sensors and ambient temperature sensors placed in the power transformers located outside the control building has been brought to the side of the measuring system using a signal converter, and connections have been made. The data obtained has been processed in a Matlab environment. The generated algorithm and computer program have estimated all parameters of the transformer. The analysis diagram for power transformers is given in Figure 4.

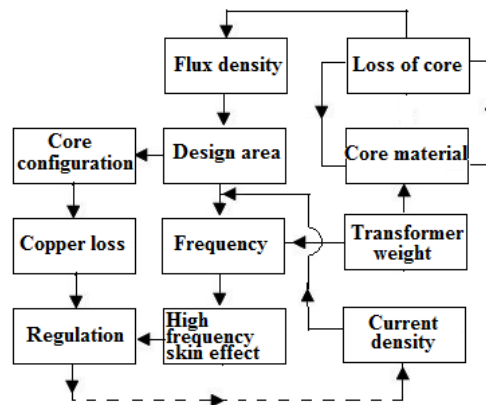


Figure 4. Created Test analysis diagram in power transformers.

The excitation current test has determined the deformation of the transformer windings, short circuits of the winding, winding breaks, and core malfunctions. Insulation tests have been carried out to determine the insulation condition of the insulating materials forming the transformer. Insulation tests on the transformer were performed on the windings and the windings between the windings and the tank ground. Isolation data of the transformer have been recorded in a database and kept in the direction of isolation. The values obtained in the insulation measurements between the winding tanks have been compared with the previous values, and the changes have been checked. If there is a change, the extent of this change and why it is caused have been investigated. The PF test was also applied to the insulating oil. About 25% of the weight of the transformer is oil. Oil is used for the isolation and cooling of transformers. The isolation of the oil varies according to the rate of moisture, water, and foreign substances in its content. This is because the tap changer has a movable structure, and because of the arcs formed during the on-load tap-change operation, the stage's insulating oil is contaminated more quickly. For this reason, tank oil and tier oil are contained in separate compartments in the tank. Usually, the conductivity of the insulation surface area varies. The insulation resistance rises rapidly when the first voltage is applied, and its value decreases logarithmically. According to the structure of the insulation material used in transformers, this increase can sometimes take a few hours, while it takes between ten and fifteen minutes in some materials. The polarization index is obtained by dividing the tenth-minute resistance value by the first-minute resistance value. This value helps to decide the insulation condition of the transformer, considering the characteristic resistance curve. The dielectric absorption ratio was evaluated according to the absorption current. The insulation resistance in the transformers has been measured between the primary and secondary windings and the tank and between the primary and secondary windings. In insulation resistance measurements, the most important factors affecting the measurement are humidity, pollution, and temperature. Leakage flows vary according to the dry and clean surface. If the insulation surface is damp or oily, the resistance will be low as leakage currents increase. Therefore, this situation is also seen in the polarization index. In the same way, the current will increase according to the amount of moisture absorbed by some insulating materials. This will change the insulation resistance badly. The windings' temperatures are considered to eliminate the differences between the two measurements. The obtained values were multiplied by the temperature correction coefficient given at 20 °C. The measurements are fixed to a specific temperature. As a result of all these measurements, the measured values are expected to exceed a certain limit. The winding ratio test has been used to determine whether the winding suits the project. Whether there is a conductor break or short circuit fault in the transformer windings is understood. The measurement has been made between the winding pairs in a single phase. During the measurement, the conversion ratio between the pairs of windings in which the same magnetic flux flows has been measured. The conversion ratio was measured between the pair of windings, which are parallel to each other in the vector diagram. To test the bridge method, it is necessary to know the transformer's connection group and examine the phase diagrams. The connection structure of the transformer must be examined to determine the connection group. The purpose of the transformer winding resistance tests is to determine the short circuit of the transformer winding, bad contact in the joints, the status of the contacts, the winding, and the breakage of the faults. The DC resistance values measured at the same stage were compared with the factory or previous test values by considering temperature values. The phases of each stage were evaluated. Values between the stages should increase or decrease steadily. According to the order of priority, detailed tests and controls have been performed to determine the

source of the fault. Winding resistance measurements have generally been taken using a bridge technique, voltmeter-ammeter method, or micro-ohmmeter. The measured results have been compared with the previous values. The values will be high if there is any looseness in the windings or a break in internal connections. The difference between phases or temperature-corrected values of the previous measurement should not exceed 5%. The other transformer tests are the dielectric strength and puncture voltage tests. Mineral oils are generally used in transformers, and there are two types of paraffin and naphtha-based. Naphtha-based oils oxidize more quickly than those based on paraffin. Products resulting from this oxidation dissolve more quickly and do not sink to the bottom of the transformer. In this case, the circulating oil circulates inside the transformer, which creates an undesirable situation. The oil in the transformer loses its insulation properties over time. The dielectric strength test is straightforward and highly demanding. Current is applied to the electrodes' ends, and the tension increases until a jump occurs. When the jump occurs, the current is immediately interrupted. The value of this voltage at the time of the jump is the result of the test. It has been compared with the value given by the standard. The measured values have been recorded. The aging of the oil has been monitored. If the puncture voltage is below the specified limit value, it is replaced with new oil according to the cleaning process or operating conditions.

The Created Algorithm for analyzing routine tests of power transformers is given in Figure 5. At the end of the iteration, the new population consists of two parts. Solutions for each selected region and random search solutions are maintained until the optimization criterion is achieved. Winding losses due to current harmonics have been considered. It also includes the increase in core losses due to voltage harmonics. The maximum load rate has been determined using the measurement data. The measurement system seen in the diagram given in Figure 6 has been installed in the control building of Kahramankazan GIS Transformer Center.

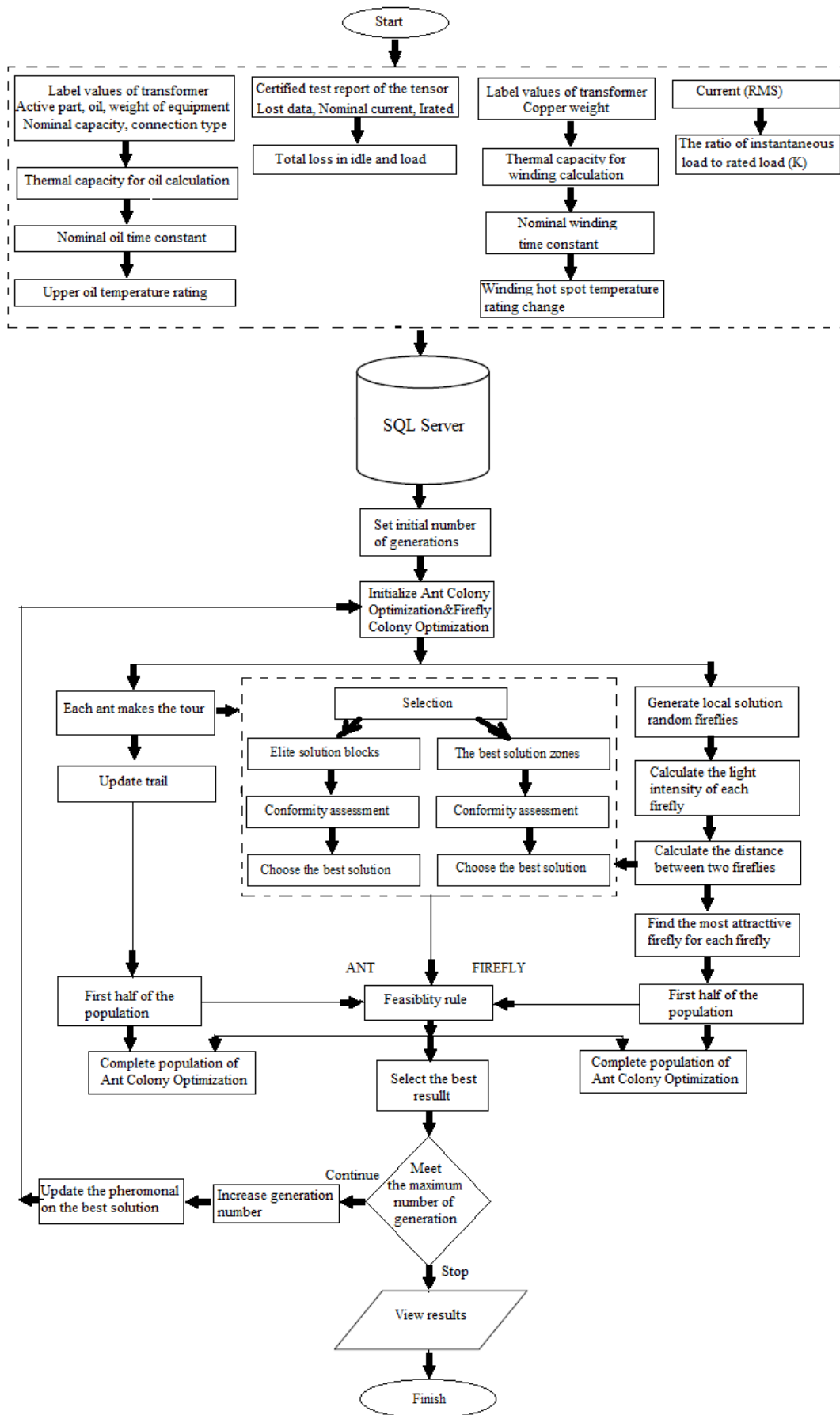


Figure 5. The analysis algorithm developed in power transformers.

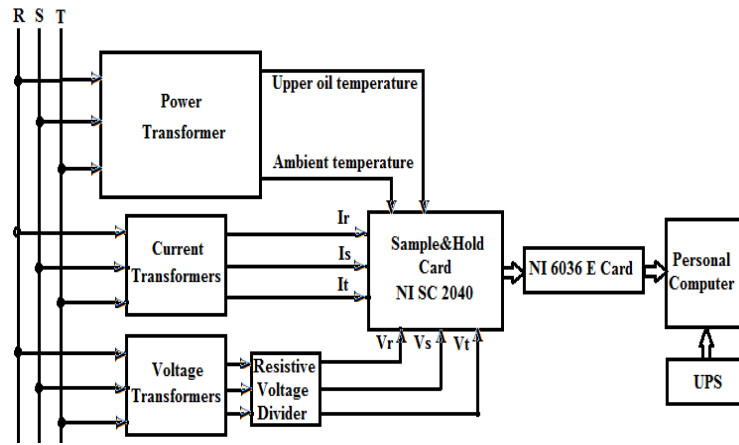


Figure 6. The diagram of the measurement system.

Conventional current and voltage transformer information of the measurement point has been connected to the measurement system. The information on the upper oil temperature sensors and the ambient temperature sensors installed in the power transformers located outside the control building have been connected to the measuring system using a signal converter. The personal computer, the signal transducer, and the sensors' uninterruptible power supply have been used in the measurement system. A one-minute data record was created, and the data was taken in seconds. The data in the measurement taken using the Lab-view program have been processed through the codes written in the M-file extension in the Matlab Program. During the data processing, the conventional current and voltage transformer conversion ratios and the corresponding coefficients of the temperature sensors have been written in the appropriate places in the M-file. Thus, the actual values have been obtained. Using the eight channels in the National Instruments' SC2040 card, current and voltage information and ambient and upper oil temperatures have been taken. The 6036E Card enables an analog/digital signal conversion between the SC2040 and the computer. It has also been used to sample analog signals from the output of the SC2040 inserted in the PCMCIA slot. The voltage divider card has been used to obtain voltage information. Magnetic circuit openable cable-type current clamps have been used to receive current information. It was terminated on the resistor and connected to the SC2040 channels to convert the clamp output current to the voltage. Resistance thermometers have been used for temperature measurements. Signal transducers have been used to provide a constant current that the resistive thermometer's variable resistor must go through. 6036E and SC2040 sampling and holding cards to communicate with each other healthily to record data are used in the Lab-view program. The Matlab Program has been used to process the recorded raw data. The hardware of the transformer routine test analysis program is shown in Figure 7.

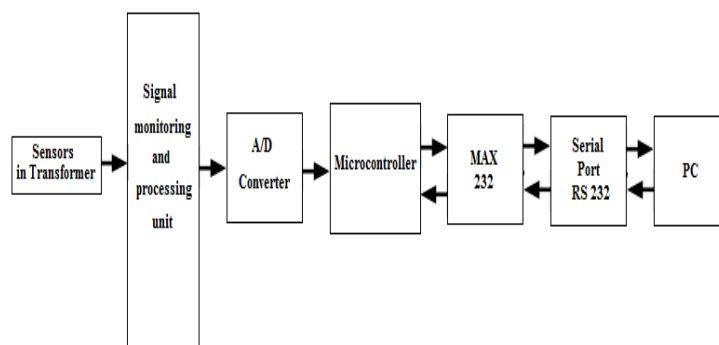


Figure 7. Hardware of the transformer routine test analysis program

The software was developed in the Microsoft Visual Studio 2017 development environment using the C# programming language. Microsoft SQL Server 2017 database has been used for the environment where the information is stored. The data obtained from operating the information and the created program has been

stored in the database. General definitions and information to be used in the algorithm transformer unit information formation are entered into the transformer fault table. After the algorithm runs and ends, the transformer failure is automatically displayed. Electronic hardware has been realized to transfer data from 30 sensors connected to different transformer units to the computer. An interface card in the developed system has been designed using the microcontroller to communicate with the computer via sensors, microcontroller, and serial port. The program of this card has been written in PICC. The voltage values obtained from the sensors using the RS-232 serial port have been displayed on the program screen created on the computer screen. In addition to the electronic circuit designed to communicate with the computer. The interface program has been written in the Visual Basic programming language. The microcontroller and the MAX232 interface have been used to exchange data over the serial port. The Interface of the transformer routine test analysis is shown in Figure 8.

Figure 8. The Interface of Transformer Routine Test Analysis

Information such as demand records obtained with the remote control unit, recording information of interruptions and voltage drops, and the transformer's temperature and power threshold alarms have been used to control transformer centers and routine tests. Knowing the transformer load may be prevented from being changed prematurely. Due to the overload, the premature wear of the transformers may be prevented. Transformer maintenance operations are simplified. The response time can be set. The cause and location of the problem may be known. The protection relay breakdown dates and times have been recorded. Thus, the number and duration of interruptions can be determined. In addition to the traditional distribution transformer control methods, the operator can use grid-related transformer equipment, load curves, etc. The information has been provided economically. In this way, service quality improvements have offered such benefits. In this way, it is ensured that the electrical networks spread over a wide area from a central point are monitored instantaneously, routine tests are performed, and enterprises can operate safely and economically.

The data from the developed algorithm and the experimental results from the transformer were compared. It is understood that the error in the optimum data obtained from the developed algorithm is between -2% and +2%. The results have been reached faster.

Conclusion and Recommendations

In traditional methods, there are many routine tests in power transformers. These tests are expensive and time-consuming. At the same time, the tests are dangerous because they are made with high voltage. The study provided routine testing and evaluation with hardware and software created without performing many tests on power transformers. There is no such study in the literature. Using the heuristic algorithm, performing routine test evaluations in power transformers without performing many tests gives a new phenomenon to the literature. The complexity of the parameters in the power transformers necessitated the use of the optimum resolution algorithm. For this reason, developing an artificial firefly algorithm has been preferred to solve complex optimization problems in power transformers realistically and quickly. The software was created using the Firefly algorithm in C# programming language. C# programming language has been preferred because of its flexible working structure, minimization of code memorization, rich graphical infrastructure, ease of communication with hardware, and rich visual theme and tracking elements. Electronic equipment has been created to transfer data from sensors connected to different transformer units to computers. An interface card in the developed system has been designed using the microcontroller to communicate with the computer via sensors, microcontroller, and serial port. The program of this card has been written in PICC. The voltage values obtained from the sensors using the serial port have been displayed on the program screen created on the computer screen. In addition to the electronic circuit designed to communicate with the computer, an interface program has been written in the Visual Basic Programming Language. Data transfer via microcontroller and serial port has been performed. The data from the sensors on the transformer have been sent to the computer. The inputs and outputs have been monitored using the hardware controller. Entering the information to be read and determining the rates has been done via the interface. The values entered were sent to the PIC and have been determined. The microcontroller has monitored the parameters produced from the sensors in the transformer units. The developed algorithm's data and the transformer parameters' experimental results have been compared. It is understood that the error in the data obtained from the developed algorithm is between -2% and +2%. The results obtained from transformer experiments have proven this algorithm's accuracy, learning speed, and robustness. The transformer overrides some of its loads so that overheating can be prevented. Thus, the most expensive and essential element of the electricity transmission and distribution chain transformers will be operated healthily and will not exceed their valuable lives. Possible failures of the power transformers, which are the essential elements of the electrical energy system, have been evaluated regularly by evaluating the test results of the field commissioning and routine power factor tests. Energy quality has been maintained by preventing undesired power cuts.

References

- Harmanani, H. M., Drouby, F., Ghosn, S. B. (2016). A Parallel Genetic Algorithm for the Open-Shop Scheduling Problem Using Deterministic and Random Moves. *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 14, no. 1, pp. 130-144.
- Johanyák, Z. C., Papp, O. (2012). A Hybrid Algorithm for Parameter Tuning in Fuzzy Model Identification. *Acta Polytechnica Hungarica*, vol.9, no.6, pp.153-165.
- Wang, D., Tang, W. H., Wu, Q. H. (2010). Ontology-Based Fault Diagnosis for Power Transformers. *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8.
- Akbari, A., Setayeshmehr, A., Borsi, H., Gockenbach, E., Fofana, I. (2010). Intelligent Agent-Based System Using Dissolved Gas Analysis to Detect Incipient Faults in Power Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 26, no. 6, pp. 27-40.
- Samirmi, F. D., Tang, W. H., Wu, Q. H. (2012). Implementation of Gaia Methodology for Multi-Agent Based Transformer Condition Monitoring. *2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1-8.

- Samirmi, F. D., Tang, W. H., Wu, Q. H. (2013). Power Transformer Condition Monitoring and Fault Diagnosis with Multi-Agent System Based on Ontology Reasoning. *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-6.
- Sun, H. C., Huang, Y. C., Huang, C. M. (2012). Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence: A Review. *Energy Procedia*, vol.14, pp. 1226-1231.
- Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M, Iravani, R. (2013). Performance Enhancement of the Transformer Restricted Earth Fault Relay. *Power Delivery, IEEE Transactions*, vol. 28, no. 1, 467-474.
- Stojanovic, Z., Djuric, M. (2013). The Algorithm for Directional Earth-Fault Relay with No Voltage Inputs. *Electric Power Systems Research*, vol.96, pp. 144-149.

**ENERGY EFFICIENCY WITH WASTE HEAT RECOVERY IN AN INDUSTRIAL FACILITY****Mustafa GENÇAY¹**¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2203-2634>**Altuğ BOZKURT²**²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6458-1260>**Erşan Ömer YÜZER³**³ Hakkari Üniversitesi, Çölemerik MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Hakkari, Türkiye.³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9089-1358>**Abstract**

In recent years, concerns about global warming and the depletion of limited energy resources have made energy conservation a trend. Therefore, using energy efficiently and recovering the energy consumed in all enterprises with high energy consumption are among the most researched and topical issues. Compressed air is the energy source required for piston movements, pneumatic systems and the operation of many machines in industrial plants. While industrial air compressors pressurize the air due to their working principles, most of the energy is converted into heat and various losses. The heat of the oil used to cool the screws of the compressor, which heat up while producing compressed air, is cooled with the help of a heat exchanger. The heat released during cooling is utilized as an energy source that we can use for air conditioning. Within the scope of this study, heating systems, which are an important energy use in an electrostatic powder coating production facility, were analyzed. One of the most efficient researches to minimize energy consumption in heating is to make the waste heat of the compressor available. Using such a heat source for air conditioning provided a sustainable solution for the facility by preventing the consumption of available electrical energy. The energy consumption of one of the air conditioners used as a heat source in the administrative building for 1 month was measured and recorded with the help of an electricity meter. By comparing the capacities of the devices, the amount of electrical energy consumed annually for heating was calculated by estimating the consumption of the device by inductive method. The project and installation of heating the administrative building by transferring the hot water obtained by energy recovery from the compressors to the fancoils by means of a pump was designed and installed. With the installation of this energy recycling system, 108.689 kWh of electrical energy was saved annually and as a result of the economic analysis, the amortization period of the heat recovery system was calculated as 2.01 years.

Keywords: Energy efficiency, heat recovery, air conditioning, industrial plant.**1. Introduction**

Uncontrolled consumption of underground and surface resources has made high carbon emissions and climate change problems inevitable. In a world with limited energy resources, the possibility of future energy supply-demand imbalances increases the importance of energy efficiency and conservation methods. Today, the industrial sector is at the center of this problem, accounting for about 40% of global final energy consumption [1]. In this context, states are developing various regulations and incentive mechanisms to promote environmental sustainability. Turkey announced on September 21, 2021 that it would become a party to the Paris Agreement and subsequently officially joined the agreement on November 11, 2021. Under the 2053 Net Zero Emission target, green development strategies aim to accelerate the transformation of energy-intensive sectors [2]. For this reason, companies with high energy consumption were encouraged to conduct energy audits by switching to ISO 50001 Energy Management System. Reviews of energy management processes show that one of the highest energy consumption points in industrial facilities is compressed air compressors. These systems account for about 10% of global industrial electricity consumption. However, the energy

efficiency of pneumatic systems is as low as 6-10% due to over-sizing and over-consumption [3]. Waste heat recovery is an important method to improve the energy efficiency of industrial processes. The waste heat generated during the compression process can be recovered up to 85% using the right technologies. This recovery, especially when utilized in areas such as hot water production or process heating, significantly reduces the energy consumption and carbon emissions of businesses[4]. The life cycle graph of a compressed air compressor is shown in Figure 1.

Life cycle costs of compressed air system

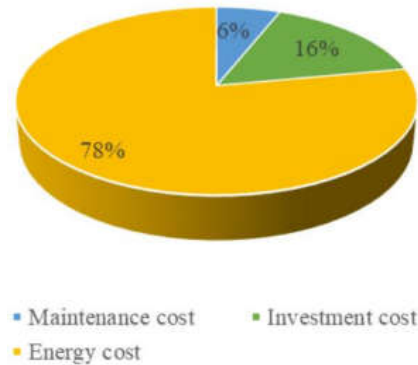


Figure 1. Compressed air compressor life cycle [5]

Figure 1 shows that the biggest cost in the life cycle of an air compressor is energy consumption. When this situation is evaluated, it reveals that recovering energy by reusing the waste heat, which has a large share in energy consumption, within the facility is both an easy and efficient method. Various studies in this field have been examined in the literature. Opoku et al. investigated the recovery of waste heat from two air compressors used in an industrial plant in Ghana using heat exchangers. The hot water obtained with this system is planned to be used for heating processes in the cocoa processing plant. According to MATLAB modeling, the system can provide a maximum heat recovery of 158 kW and can pay for itself in as little as 8 months [6]. Murgia et al. used the waste heat of compressors as a thermal source in the Organic Rankine Cycle (ORC). Two methods were tested as recovery cycle and simple cycle. Power generation was 3.01 kW in the recovery cycle and 2.13 kW in the simple cycle [7]. Sapmaz and Kaya examined the energy efficient working points in compressed air systems and determined that a heat recovery system can be applied to 4 out of 5 compressors in a facility they examined. It was stated that 7.2 million kWh of energy could be saved annually with this method [8]. Saidur et al. emphasized that industrial compressed air systems are one of the most expensive energy sources and showed that energy recovery between 50% and 90% can be achieved with plate heat exchangers [9]. Jouhara et al. examined waste heat recycling technologies and stated that plate heat exchangers can provide energy recovery with an efficiency of up to 90% [10]. Sarode et al. emphasized that waste heat from compressors can be converted into resources such as hot water, electricity and cooling. With these applications, it was emphasized that energy consumption can be saved by 20% to 60% and annual heating costs can be reduced by 90% [11]. Pacas used compressor waste heat in a facility to produce hot air and hot water, and with this energy, it met certain needs of the facility free of charge [12]. Broniszewski and Werle, in their study in Poland, recovered compressor waste heat through a heat exchanger and used it for heating the plant and calculated that the investment was paid back in 1.1 years thanks to incentives [5]. Akhan and Eryener designed a heat recovery system integrated into solar wall-mounted air heaters for use in an automotive factory in Turkey during winter months. It is stated that this system can pay for itself in 6 months [4]. Döner and Ciddi focused on reducing energy costs and investigated the prevention of air leakage and heat recovery in a two-stage method. It is calculated that the system can pay for itself in 4 years [13]. Studies show that compressor waste heat can be recovered at low cost and that these methods make significant contributions to energy savings and cost reduction. The return on investment of the systems varies depending on the percentage of compressor operation and the annual utilization period of the plant. The results of the studies emphasize the importance of the dissemination of such systems.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 describes the methods and materials used for compressor energy recovery in a factory producing electrostatic powder coatings. Section 3 evaluates the data

obtained as a result of the application in terms of economic analysis. Finally, conclusions and recommendations are presented.

2. Materials and Methods

2.1. Compressed Air System

Compressors have an important place among the points with the highest energy consumption in industrial facilities. Compressors are devices used to provide compressed air and are one of the main energy sources in the operation of industrial facilities. Compressed air is used especially in pneumatic systems, pistons, test equipment, cleaning processes and many industrial applications. Screw compressors work with male and female rotors that rotate in opposite directions. This movement draws in compressed air, reducing the gap between the rotors and the housings. The compressed air is then displaced towards the outlet and made available [14]. When this air reaches the required pressure value, it is stored in a compressed air tank, ready for use and distributed for use at the required points in the plant. The model of the oil-injected and rotary screw compressor type is shown in Figure 2.

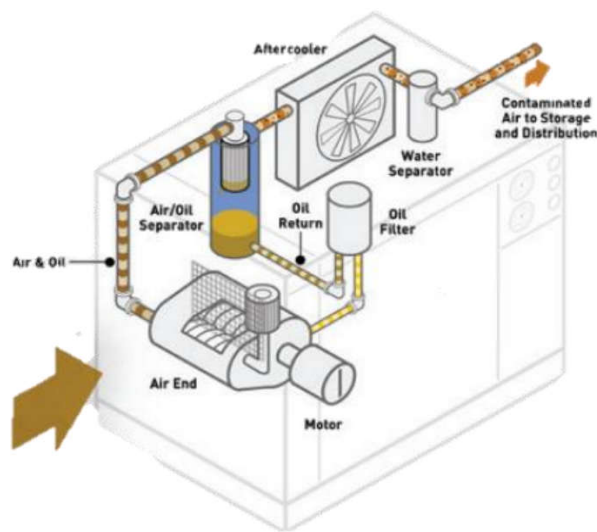


Figure 2. Oil-injected rotary screw compressor model [15]

Approximately 94% of the electrical energy used by an industrial air compressor is converted into heat and loss through radiation during the compression process. The remaining 6% is used as compressed air. This presents a significant opportunity to improve energy efficiency. A properly designed heat recovery unit can recover between 50% and 94% of the available thermal energy (as low-grade heat) to heat air or water up to 90°C (140°F) [16]. Failure to recover this waste heat may cause the company to fall behind other companies with which it competes. Technical specifications of the compressor used in the study are given in Table 1.

Table 1. Compressor label information used in the study

MAWP	12.75 Bar – 185.0 psi – 1.27 Mpa
Qv	344.8 l/s – 730.7 cfm – 20.7 m ³ /min
Voltage	400 V
Frequency	50 Hz
Phase	3 Ph
Motor Power	110 kW – 147.51 hp
Motor Speed	4200 rpm

The compressor used in the study is of a size selected according to the general usage trends of the facility. Enterprises with high compressed air needs can use larger and more numerous compressors.

2.2. Compressor Energy Recovery System

In oil-injected rotary screw type compressors, oil is used for both cooling and lubrication of the screws. In order to cool the screws, the heated oil is cooled with the help of air and the hot air generated during this process is released to the atmosphere as waste heat. In energy recovery systems, on the other hand, plate heat exchangers are used to transfer heat from oil to water by passing oil and water through the heat exchanger without mixing. Depending on the design of the heat exchanger, the efficiency of the system may vary. In such systems, the correct heat exchanger selection and design is one of the important factors that directly affect the efficiency of heat recovery. The model describing the working principle of the plate heat exchanger used in the application is shown in Figure 3.

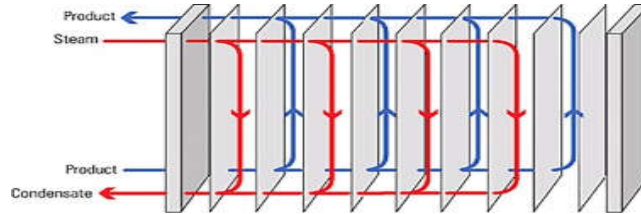


Figure 3. Plate heat exchanger model [10]

Other factors affecting the efficiency of the system include the load status of the compressor, the insulation of the system and the duration of use. The energy from the compressor is usually recovered in the form of hot water with minimal losses. Since hot water is used as an input in many industrial production sectors, there is a very low investment in the installation of the system with only heat exchanger and pipe costs, resulting in short amortization periods. This is an important advantage that makes energy recovery systems economically efficient. The plate heat exchanger mounted inside the compressor used in the application and its components are shown in Figure 4.



The integrated energy recovery system mainly comprises:

- ① Complete stainless steel oil/water heat exchanger protecting the oil quality and water circuit
- ② Thermostatic bypass valve
- ③ Simple on/off handle

Figure 4. Plate heat exchanger inside the compressor [17]

After the heat recovery system is attached to the compressor, a simple system with cold water inlet and hot water outlet is obtained. In this study, waste heat was used as an energy source for air heating since hot water is not required in the production processes. This type of application ensures that the available waste heat can be effectively utilized even when hot water is not needed in the production system. The general structure of the energy recovery system is shown in Figure 5.

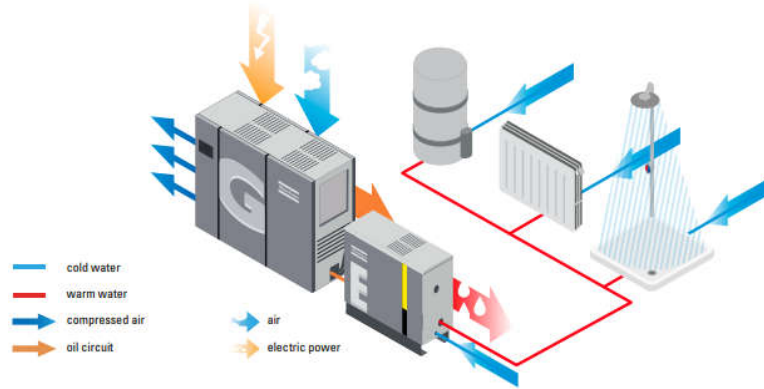


Figure 5. Energy recovery system [16]

As can be seen in Figure 5, the hot water obtained from the system is generally used to meet the hot water and heating needs provided by electrical energy, providing free energy without any additional energy cost. This provides a significant saving in terms of energy efficiency. Because the energy obtained through waste heat recovery provides economic and environmental advantages for the plant by reducing electricity consumption.

2.3. Amount of Energy Consumed by Existing Heating Systems

The offices, cafeteria, Research and Development(R&D) laboratory and Quality Control departments in the administrative building part of the facility were partially heated by air conditioners and fan electric heaters. However, due to the lack of an energy monitoring system that can measure the energy consumption of all devices and the difficulty of measuring the energy consumption of each room individually, the energy consumption of one air conditioner for one month was taken into account. For the other appliances, energy consumption was estimated from these measurement results by inductive method. The consumption values of the air conditioner measured with the help of an electricity meter are given in Table 2.

Table 2. Energy consumption chart of the air conditioner

Date	Time	Energy Consumption (kWh)	Energy Difference (kWh)	Time Difference	Hourly Energy Consumption (kWh)
22.01.2024	09:13	493.272	----	----	----
23.01.2024	09:18	519.915	26.643	24.08	1.1
24.01.2024	09:25	539.383	19.468	24.11	0.81
25.01.2024	10:42	557.972	18.589	25.28	0.74
26.01.2024	09:31	574.986	17.014	22.81	0.75
27.01.2024	11:04	593.327	18.341	25.55	0.72
30.01.2024	09:30	643.823	50.496	70.43	0.72
31.01.2024	11:18	662.462	18.639	25.8	0.72
01.02.2024	09:09	675.731	13.269	21.85	0.61
02.02.2024	09:45	692.139	16.408	24.6	0.67
06.02.2024	11:13	759.213	67.074	97.46	0.69
07.02.2024	09:32	771.071	11.858	22.26	0.53
08.02.2024	10:32	781.416	10.345	25	0.41
13.02.2024	09:03	838.633	57.217	119.51	0.48
15.02.2024	08:59	867.115	28.482	47.93	0.59
19.02.2024	11:15	935.211	68.096	98.26	0.69
24.02.2024	11:33	1015.054	79.843	120.3	0.66
27.02.2024	09:30	1046.502	31.448	69.95	0.45
28.02.2024	09:22	1058.288	11.786	23.86	0.49
01.03.2024	09:40	1087.192	28.904	48.3	0.60
Average Hourly Consumption					0.65

Since the values in Table 2 could not be monitored remotely and data could not be obtained, they were recorded by going to the meter each time. The daily values were converted into hourly values by calculation. Then, the average hourly consumption of an air conditioner was determined by averaging these values and the realization rate was found. The same measurement was applied for fan resistance heaters and a rate of 0.8 was determined. The hourly consumption data in Table 3 were calculated by induction from the label values of the heater devices.

Table 3. Power consumption of the existing heating system

Heating Point	Energy Consumption (Label Value) (kWh)	Realization Rate	Hourly Consumption (Induction)(kWh)
Office 1	0.995	0.66	0.66
Office 2	0.995	0.66	0.66
Office 3	0.995	0.66	0.66
Office 4	0.995	0.66	0.66
R&D	1.5	0.66	1.02
Quality Office	2.2	0.66	1.43
Quality Work	2.3	0.66	1.52
Dressing Room	2.2	0.66	1.43
Lower Corridor	20.0	0.8	16.00
Upper Corridor	20.0	0.8	16.00
Quality Working Resistance	10.0	0.8	8.00
R&D Office Resistance	10.0	0.8	8.00

Among these working points, Office 1, 2, 3, 4, R&D, lower corridor, R&D office and resistance heaters consume 27.66 kWh of energy for a total of 10 hours between working hours (08:00-18:00). In addition, the quality office, quality work room, locker room, upper corridor and quality work resistance heater consume a total of 28.38 kWh of energy for 6 days and 24 hours. Since these systems are under the supervision of employees, they are sometimes left on, which leads to an increase above the calculated energy consumption. All these energy consumptions occur continuously every winter month, regardless of production activities, which increases the kWh per product. At the same time, it also increases the carbon footprint of the facility. Information including the annual energy consumption calculation of the facility is given in Table 4.

Table 4. Annual Heating Energy Amount

Working Time (Hour)	Energy Consumption (kWh)	Operating Time (Hours)	Operating Time (Days)	Operating Time (Week)	Operating Time (Month)	Total Energy Consumption (kWh)
08:00- 18:00	27.66	10	5	4	5	27660
00:00- 24:00	28.38	24	6	4	5	81734
Total Annual Energy Consumption						109.394

When Table 4 is examined, it is assumed that the facility needs to be heated for 5 months a year to estimate the annual energy consumption of the facility. As a result of the measurements and calculations, it was calculated that the facility consumed a total of 109.394 kWh of electrical energy for heating purposes before the application was made.

2.4. Established Air Conditioning Project

For the electrostatic powder coating production facility located in Çerkezköy Organized Industrial Zone, an assessment was made regarding the recovery of maximum 88 kW of waste heat that can be obtained from a 110 kW compressor. There is no need for hot water in the production process phase. Considering the

information obtained from the literature and the physical structure of the facility, it was concluded that the heat to be obtained with the energy recovery system is suitable for heating the administrative building. Since the building does not have a central heating system, a new central heating system was installed. The sizes and locations of the fancoils to be used in the heating system of the building were positioned according to the room areas with the help of AutoCAD program. The projects of the fancoils for the lower floor (a) and upper floor (b) are shown in Figure 6.

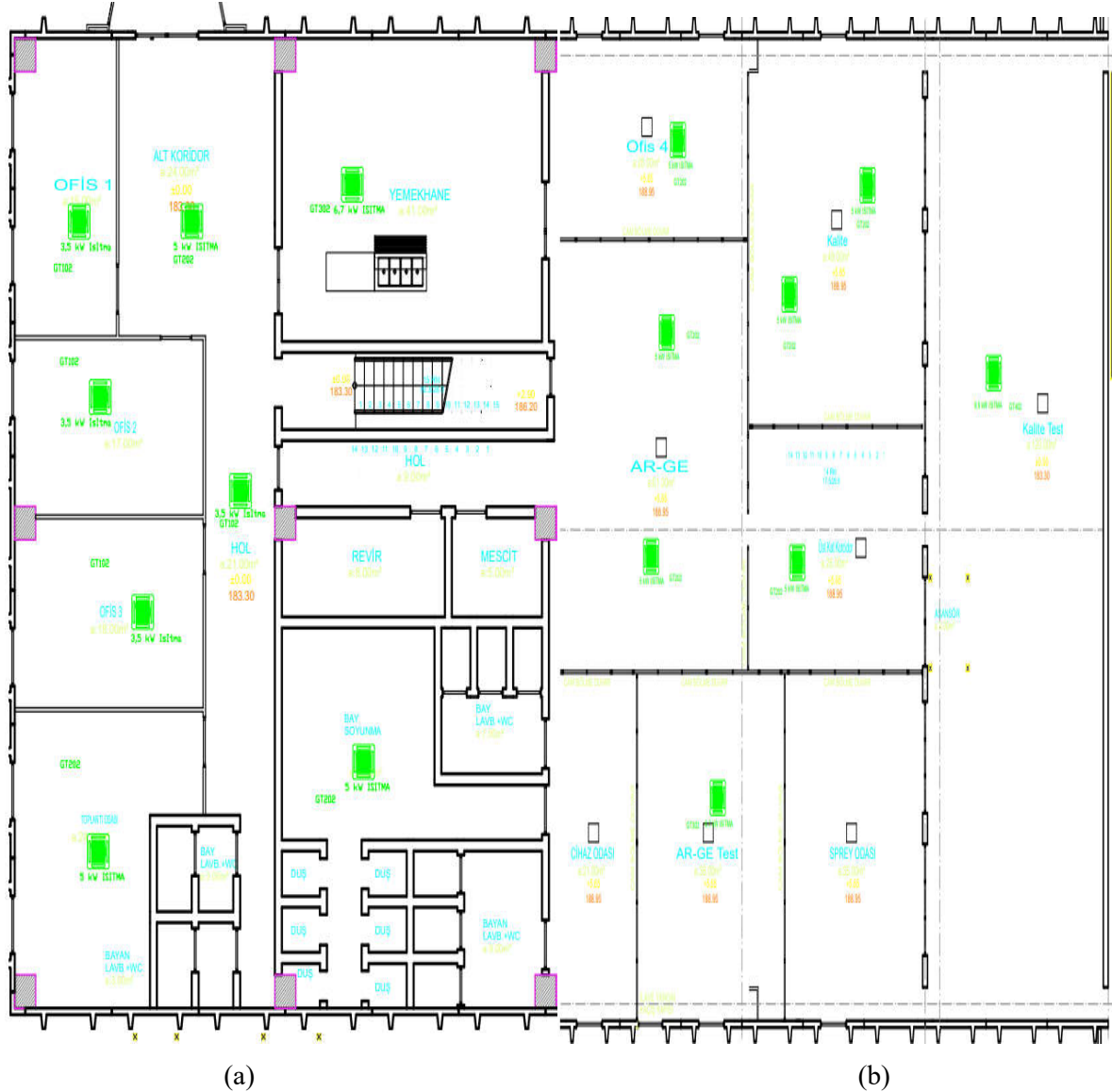


Figure 6. Fancoil positioning project (a) lower floor (b) upper floor

The meeting room downstairs and the R&D test room upstairs, which did not have a heating system before the application, were added to the heating system and the project was established for the areas in need of heating in the whole building. Even when the air temperatures dropped to minus values during the year, a minimum temperature of 22°C was observed in the rooms. With the heat recovery system, the hot water leaving the compressor enters the system between 50-80°C. This hot water is transmitted to the fancoil units with the help of a collector and a pump. The temperature of the water in the system is transferred to the rooms through the fan coil units and air conditioning is provided. In addition, considering the compressor failure, the existing heaters were kept in the facility in an operable condition as an alternative. The newly installed fancoil system was energized from 2 separate panels as upstairs and downstairs. After the system installation was completed,

when the system was operational, the energy consumption amounts were measured for the lower floor and upper floor. Table 5 shows the energy consumption information of the fancoils.

Table 5. Annual fancoil and pump energy consumption

Consumption Point	Hourly Consumption (kWh)	Operating Time (Hours)	Operating Time (Days)	Operating Time (Weeks)	Operating Time (Months)	Total Energy Consumption (kWh)
Upper Floor Fancoil	0.152	24	6	4	5	437.76
Lower Floor Fancoil	0.061	24	6	4	5	175.68
Water Pump	0.032	24	6	4	5	92.16
Total Annual Energy Consumption						705.6

As seen in Table 5, the annual energy consumption of the newly installed system decreased to 705.6 kWh, indicating that the system operates with high efficiency. This value clearly shows how effective energy recovery is and that an important step has been taken to increase the energy efficiency of the plant.

3. Economic Analysis

Since it is thought that the application will pay for itself in a short time, a simple economic analysis was carried out without considering interest and inflation. The annual energy consumption cost calculation of the current situation is given in Table 6.

Table 6. Table of energy cost consumed in the current situation

Working Time (Hour)	Energy Consumption (kWh)	Operating Time (Hours)	Operating Time (Days)	Operating Time (Weeks)	Operating Time (Month)	Total Energy Consumption (kWh)	kWh Price (TL)	Energy Consumed (TL)
08:00 - 18:00	27.66	10	5	4	5	27660	2.74	75788.4
00:00 - 24:00	28.38	24	6	4	5	81734	2.74	223951.2
Total Amount Saved						109.394		299.739.5

Considering the annual operating period before the new system was installed, it was calculated that 109.394 kWh energy savings could be realized for heating use. For this amount of energy consumption, the factory has to pay an annual bill of 299.739 TL. The energy consumption annual cost calculation of the newly installed system is given in Table 7.

Table 7. Energy cost table of the newly installed fancoil system

Consumption Point	Energy Consumption (kWh)	Operating Time (Hours)	Operating Time (Days)	Operating Time (Days)	Operating Time (Month)	Total Energy Consumption (kWh)	kWh Price (TL)	Energy Consumed (TL)
Upper Floor Fancoil	0.152	24	6	4	5	437.76	2.74	1199.462
Lower Floor Fancoil	0.061	24	6	4	5	175.68	2.74	481.3632
Water Pump	0.032	24	6	4	5	92.16	2.74	252.5184
Total Annual Energy Consumption						705.6		1931.0

The energy consumption of the newly installed system in the pumps and fancoil units were measured by means of meters. The annual energy consumption amount of the newly installed system is 1931 TL as seen in Table 7. In order to determine how much energy savings the facility has achieved after the system installation, the amount of energy consumption of the new system was calculated as 108688 kWh/year by subtracting the amount of energy consumption of the old system from the amount of energy consumption of the new system. This application has saved the facility 297.805 TL per year. In addition, 92.384.80 kg CO₂ emission was prevented and environmental damage was prevented. The cost of the plate heat exchanger purchased from the compressor manufacturer company within the scope of the project was 120.000 TL and the investment made for the fan coil system installed from scratch was 480.000 TL. The total project cost was realized as 600.000 TL. The return period of the investments made was calculated as 2.01 years.

4. Conclusions

Compressors have an important place in energy consumption for businesses that need to obtain compressed air. For this reason, the efficiency of energy recovery systems designed and implemented to minimize the costs of compressors is of great importance. In the evaluations made, it was observed that all heating systems using hot water can be easily applied and the system works stably.

Within the scope of this study, it was determined that with the energy recovery system applied in the administrative building of the electrostatic powder coating production facility, 12 rooms that were previously heated with different types of heating systems, as well as additional areas such as meeting room and R&D test room can be heated. The implemented air conditioning system has increased energy efficiency in the facility and at the same time reduced operational costs. The working principle of the system is based on distributing the waste heat generated by the compressor to the rooms in the building through fan coil units.

The project has significantly reduced the amount of energy used for heating, especially in winter. Even with the compressor running at 60% load, the minimum room temperature is maintained at 22 °C. This makes it possible for employees to work in a comfortable environment and allows energy consumption to be used efficiently. In addition, considering that the system should operate for a longer period of time in climates colder than the climatic conditions of the facility where the system is implemented, the return on investment is expected to be significantly shorter.

As a result, the successful implementation of this energy recovery system provided significant savings to the company and significantly reduced environmental damage. The successful results of the study were appreciated by the company management and it was decided to implement the same system in other factories. This study has once again demonstrated the importance of energy efficiency and environmentally friendly technologies in industrial facilities.

Kaynakça

- [1] Bosu. I., Mahmoud. H., & Hassan. H. (2023). Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency. economic. and environmental analysis. *Applied Energy*. 333. 120619.
- [2] <https://netsifirturkiye.org/2053-net-sifir-hedefi-ve-turkiyenin-uzun-donemli-iklim-degisikligi-stratejisi/> Access Date:02.12.2024
- [3] Gryboś, D., & Leszczyński, J. S. (2024). A Review of Energy Overconsumption Reduction Methods in the Utilization Stage in Compressed Air Systems. *Energies*, 17(6), 1495.
- [4] Akhan, H., & Eryener, D. (2018). Building integrated solar air heating with waste heat utilization. *Energy conversion and management*, 157, 136-145.
- [5] Broniszewski. M., & Werle. S. (2018). The study on the heat recovery from air compressors. In E3S Web of Conferences (Vol. 70. p. 03001). EDP Sciences.
- [6] Opoku. Richard. et al. "Exergoeconomic analysis of staggered tube cross-flow heat recovery unit incorporated into industrial air-compressor for process water heating." *Energy Conversion and Management: X* 7 (2020): 100055.

- [7] Murgia. S.. Valenti. G.. Colletta. D.. Costanzo. I.. & Contaldi. G. (2017). Experimental investigation into an ORC-based low-grade energy recovery system equipped with sliding-vane expander using hot oil from an air compressor as thermal source. *Energy procedia*. 129. 339-346.
- [8] Sapmaz. S.. & Kaya. D. (2017). Investigation of energy efficiency and emission reduction opportunities in compressed air systems. *Engineer and Machinery*. 58. 23-36.
- [9] Saidur. R.. Rahim. N. A.. & Hasanuzzaman. M. (2010). A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and sustainable energy reviews*. 14(4). 1135-1153.
- [10] Jouhara. H.. Khordehghah. N.. Almahmoud. S.. Delpech. B.. Chauhan. A.. & Tassou. S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 6. 268-289.
- [11] Sarode. R. P.. & Vinchurkar. S. M. (2023). An approach to recovering heat from the compressed air system based on waste heat recovery: a review. *Energy Sources. Part A: Recovery. Utilization. and Environmental Effects*. 45(3). 9465-9484.
- [12] PACAS. L. (2021). Methodology For The Utilization Of Waste Heat By Air-Cooled Compressors. *MM Science Journal*.
- [13] Doner, N., & Ciddi, K. (2022). Regression analysis of the operational parameters and energy-saving potential of industrial compressed air systems. *Energy*, 252, 124030.
- [14] <https://www.atlascopco.com/tr-tr/compressors/wiki/compressed-air-articles/rotary-screw-compressor> Access Date:02.12.2024
- [15] Johan. D. K.. Mashar. A.. & Slameto. S. (2023). Design of Oil-Free Compressor in Compressed Air System PT Sanbe Farma Unit 1. *Fluida*. 16(sp1). 46-52.
- [16] <https://www.atlascopco.com/tr-tr/compressors/products/energy-conversion/energy-recovery-systems/energy-recovery-unit-er-90-900> Access Date:02.12.2024
- [17] <https://www.dynamicairsystems.com.au/services-energy-recovery.html> Access Date:02.12.2024

**REGIONAL DETERMINATION OF SOCIAL ACCEPTANCE FACTOR OF CLEAN ENERGY TECHNOLOGIES IN TÜRKİYE****Bahadır YÖRÜR**

Research Assistant, Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Kütahya-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0003-4370-4238

Nihal ERGİNEL

Prof.Dr., Eskişehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Eskişehir-Türkiye, ORCID: 0000-0001-6231-9904

Abstract

Türkiye, a party to the Paris Climate Agreement, has transitioned to clean energy by prioritizing renewable and nuclear energy to ensure the goal of limiting carbon emissions. Although the installed capacity of renewable energy has increased in recent years, there is no nuclear energy investment other than the Akkuyu power plant, which will soon be operational. Türkiye is a large country in terms of its surface area and population. In addition, there are regional differences in economic and cultural terms. Before investing in the energy field, considering regional social factors and financial and technological factors is effective in the faster progress of investments. Lack of social acceptance is one of the most important factors limiting energy investments, as it can delay the installation and operation of energy facilities. Therefore, it is essential to determine the direction of regional support for the rapid implementation of energy projects. This study aimed to determine the regional social acceptance factor for nine regions used by Türkiye Transmission Isc. Visual pollution, noise pollution, regional contribution, environmental impact and affordability were used as evaluation criteria for the social acceptance factor. The contradictory structure of the evaluation criteria necessitates using multi-criteria decision-making methods. Within the scope of the analysis, DEMATEL method was used to calculate the criteria weights, and the AHP method was employed to rank the energy types that are solar, wind, hydroelectric, geothermal, biomass and nuclear energy. Geothermal energy was considered only for Western Anatolia and Western Mediterranean regions where its installed capacity is available. As a result of the study, the perspectives of the regions on nuclear energy are also revealed in addition to renewable energy types. In addition, social acceptance weights of the regions are obtained based on energy types and can be used as input for investment planning. As a result of the analysis, regional differences are compared and interpreted.

Keywords: Social Acceptance Factor, Clean Energy, DEMATEL, AHP, Regional Evaluation

INTRODUCTION

The growth of country economies, along with industrialization, has increased energy consumption to a great extent. The fact that fossil fuels mostly meet energy consumption has increased greenhouse gases and brought about global warming and climate change problems (Trevino-Martinez et al., 2022). Climate change anxiety pushes countries to take precautions, and various international agreements are being made. Many countries are putting forward different energy policies in the transition to clean energy and implementing them at different levels depending on their emissions. In Türkiye, a party to the Paris Climate Agreement, the last agreement made on climate, the transition to clean energy is aimed at renewable and nuclear energy investments.

Investment planning to be created in the transition from fossil to alternative energy sources depends on implementing appropriate energy policies (Dagoumas and Koltsaklis, 2019). In addition to technical, economic, and political factors, the social acceptance factor that reflects the local people's perspective on energy alternatives should also be considered when forming energy policies. If the local people have a negative attitude towards alternative energy sources, it may not be possible for investments to progress healthily (Zhang et al., 2022). For this reason, determining the level of support for alternative energy types is an important issue (Marzouk et al., 2024).

The Social Acceptance factor is considered one of the most critical factors in energy transformation (Ernst and Shamon, 2020). In the literature, studies are often on determining, weighting and classifying the factors that create or hinder social acceptance (Eriksen and Mikkelsen, 2024; Bhowmik et al., 2018; Yakan and Özer, 2023). In addition, studies have been conducted on the public's perspective towards renewable energy (Ribeiro et al., 2014), willingness to make additional payments (Assefa and Frostell, 2007) and public perception arising from the installation of renewable energy plants (Guo et al., 2015). The social acceptance dynamics of wind power plants in Türkiye were examined by Kılınç et al. (2017). The study conducted by Ekşi et al. (2019) aimed to evaluate the factors affecting social acceptance of energy investments. Another study has studied geothermal energy's environmental impacts and social acceptance (Tunçbilek and Yılmaz, 2022). In some studies where mathematical models are used, it is seen that the social acceptance factor is included in the models as a goal or constraint. Özcan and Erol (2014) weighed the social acceptance factor, which they tried to maximize as a goal in the mathematical model, using the analytical hierarchy method. Ervural et al. (2018) included the social acceptance factor in the model for maximization in their study and performed the analysis using the triangular fuzzy topsis method.

Whether determining the variables affecting the social acceptance factor or using it in a mathematical model, the studies in the literature generally aim to increase the support for energy alternatives. In addition to improving social acceptance, analyzing energy types together and determining the social acceptance factor for every kind of energy will be helpful in terms of creating energy policies. The high level of energy investment financing and Türkiye's regional differences require regional analysis of the social acceptance factor. This study calculates the social acceptance factor weights of six different energy types, five renewable energies (solar, wind, hydroelectric, geothermal, biomass) and nuclear energy, for nine load distribution regions used by Türkiye Transmission Isc.

The study consists of four sections. The methodology is presented in the second section, and the analysis results are given in the third section. The last section consists of the conclusions and recommendations section.

METHODOLOGY

As in many countries, Türkiye is focused on creating appropriate energy policies to combat the climate crisis. At this point, efforts to understand the status of energy alternatives for national and local energy plans are high (Park, 2021). Among these efforts is the social acceptance factor, which can be defined as determining the social perspective on energy alternatives (Paravantis et al., 2018). In evaluating the social acceptance factor, conflicting criteria require using multi-criteria decision-making (MCDM) methods for analysis. The Decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) method is also used to clarify the interactions in decision models, find the criteria weights, and support decisions with the Analytical hierarchical process (AHP) (Gölcük and Baykasoğlu, 2016). The AHP method is used extensively in weighting and ranking criteria and alternatives. However, AHP does not consider the indirect effects of each criterion and assumes that the criteria are independent without further addressing the interdependence between the criteria. The DEMATEL method evaluates the criteria's importance and reveals the criteria' causal relationships. It uses these causal relationships when determining the criteria weights (Wu and Tsai, 2012).

In the study conducted by Gökler and Boran (2023) for the supplier selection problem, the DEMATEL method was integrated into the DAHP method to determine the criteria and sub-criteria weights. In another study, an AHP model applying the DEMATEL method was created to define China's carbon neutrality transition path, and the factors affecting the carbon neutral transformation of the energy sector were obtained (You and Yi, 2022). The method in which grey-DEMATEL and AHP methods were integrated to investigate flood risk in urban areas was proposed by Zheng et al. (2022). In another study, DEMATEL and AHP methods were used to prioritize risks in risk management. In the study, the DEMATEL method was preferred for risk prioritization, and the AHP method was preferred for prioritization and ranking sub-risks (Yazo-Cabuya et al., 2024).

The social acceptance factor is multidimensional and includes environmental, economic and social aspects. Therefore, the evaluation criteria have a conflicting and interactive structure. For this purpose, the advantage of integrating the DEMATEL and AHP methods is that the interactions of the criterion weights can be included in the model, and regional differences can be better reflected. After obtaining the separate criterion weights for nine regions with the DEMATEL method, the AHP method was used to evaluate the alternatives on a criterion basis, and the weight of each alternative assessed for each region was determined.

DEMATEL Method

The DEMATEL method for determining the criteria weights is explained below in five steps.

Step 1: Creating a direct relationship matrix (X). A direct relationship matrix is made using the pairwise comparison scale in Table 1. Numerical values indicate the extent to which one criterion affects the other.

Table 1. DEMATEL evaluation scale

Numerical value	Definition
0	Ineffective
1	Low impact
2	Moderate effect
3	High degree of impact
4	Very high degree of impact

Step 2: Determining the normalized direct relationship matrix. The normalized direct relationship matrix (C) is obtained by using equations (1) and (2).

$$s = \max(\max \sum_{j=1}^n x_{ij}, \max \sum_{i=1}^n x_{ij}) \quad (1)$$

$$C = \frac{X}{s} \quad (2)$$

Step 3: Creating the total relation matrix. Equations (3) and (4) are used to create the total relationship matrix (F).

$$\lim_{k \rightarrow \infty} C + C^2 + C^3 + \dots + C^k \quad (3)$$

$$F = C + C^2 + C^3 + \dots + C^k = C(I - C)^{-1} \quad (4)$$

Step 4: Determination of affected and affecting criteria groups. The row and column totals are found after determining the total relationship matrix (F). These values are obtained for each criterion.

Each row total (D_i) indicates the direct or indirect effect of the criterion on other criteria, and each column total (R_i) indicates the direct or indirect impact of the criterion on different criteria.

For each criterion, D_i+R_i shows the total impact value sent and received, and for each criterion, D_i-R_i shows the total impact of the criterion on the system.

D_i+R_i indicates the importance of the criterion within the system. If the D_i-R_i value is positive, it is considered as affecting, if negative, it is considered as affected.

Step 5: Calculating the weights; Weights are calculated using equations (5) and (6) with the help of $D+R$ and $D-R$ values.

$$w_i = \sqrt{[(D_i + R_i)]^2 + [(D_i - R_i)]^2} \quad (5)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

AHP Method

The AHP method is one of the most frequently used methods among multi-criteria decision-making methods. The technique developed by Saaty (1980) is based on the creation of pairwise comparison matrices. Since the evaluation criterion weights are obtained from the DEMATEL method, the AHP method will be used to evaluate the alternatives on a criterion basis. Thus, the relative weights of the alternatives will be established. The importance scale in Table 2 is used by the decision maker in evaluating the alternatives on a criterion basis.

Table 2. AHP importance scale

Numerical value	Definition
1	Equally important
3	Moderately important
5	Strongly important
7	Very strongly important
9	Definitely important
2,4,6,8	Intermediate values

The consistency ratio (CR) of the matrices that form the evaluation is calculated, and the ratio must be lower than 0.10. A ratio higher than 0.10 indicates inconsistency in the decision-maker's judgments. In this case, the judgments must be reviewed again. To reach the CR value, it is necessary to calculate the largest eigenvector (λ_{max}) of the evaluation matrix (Equation 8).

$i=1,2,3,\dots,n$ and $j=1,2,3,\dots,n$

$$D = [a_{ij}]_{n \times n} * [w_i]_{n \times 1} = [d_i]_{n \times 1} \quad (7)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{w_i}}{n} \quad (8)$$

Another value needed in calculating the consistency ratio is the randomness index (RI). The data containing the RI values, which consist of constant numbers and are determined according to the n value, are given in Table 3. In line with this information, the calculation of the CR value is shown in equation (9).

$$CR = \frac{\lambda - n}{(n-1) * RI} \quad (9)$$

Table 3. AHP importance scale

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

The decision matrix (DW) of mxn size is created by combining the mx1 dominance column vectors created by each n variable. The R result vector is obtained by multiplying the matrix with the W dominance vector between the criteria obtained from the DEMATEL method (equation 11).

$i=1,2,3,\dots,m$ and $j=1,2,3,\dots,n$

$$DW = [w_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

$$R = DW * W \quad (11)$$

APPLICATION

In this study, which was conducted to reveal the social acceptance factor regionally, one of the most fundamental elements of energy investment planning in Türkiye, which differs regionally in terms of industrialization and its cultural richness, the DEMATEL-AHP integrated approach is used.

The Turkish electricity system is divided into generation, transmission and distribution. Turkish Electricity Transmission Inc., responsible for the generated electricity's transmission, has nine different load distribution centers depending on the electricity transmission lines and geographical structure. These regions and centers are shown in Figure 1. Figure 1 shows the (1) Thrace, (2) Western Anatolia, (3) Northwestern Anatolia, (4) Central Anatolia, (5) Central Black Sea, (6) Eastern Anatolia, (7) Southeastern Anatolia, (8) Eastern Mediterranean and (9) Western Mediterranean regions.

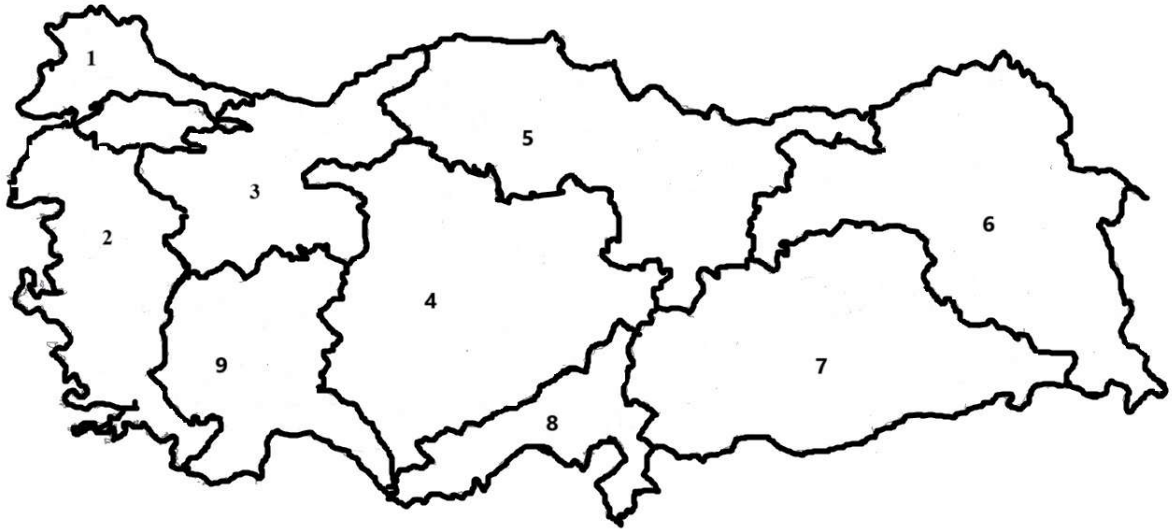


Figure 1. Load Distribution Centers of Türkiye Electricity Transmission Inc.

The assessment for nine regions was carried out by an academic working on energy in each region. The model evaluates six different alternatives according to five main criteria. The alternatives are solar (A_1), wind (A_2), hydroelectric (A_3), geothermal (A_4), biomass (A_5) and nuclear (A_6). Apart from the Akkuyu nuclear power plant, which will be operational soon, there is no installed capacity for nuclear energy in the country. A perspective against nuclear energy will also be obtained by including nuclear energy in the analysis. Due to the formation structure of geothermal energy, there is only installed capacity in the Western Mediterranean and Western Anatolia regions. Therefore, geothermal energy is only included in the analysis in these regions. The evaluation criteria used in the study and their explanations are given in Table 4.

Table 4. Evaluation criteria and explanations

Criteria	Explanations	References
Visual Pollution (C_1)	It is about the appearance of power plants.	Ervural et al., 2018; Özcan and Erol, 2014; Zhang et al., 2022; Giamalaki and Tsoutsos, 2019
Noise Pollution (C_2)	It is explained as the noise that occurs at every stage of power plants.	Ervural et al., 2018; Zhang et al., 2022; Chang, 2015
Regional Contribution (C_3)	It is explained as the contribution of power plants to the region.	Sward et al., 2021; Ervural et al., 2018; Zhang et al., 2022; Oluoch et al., 2021; Özcan and Erol, 2014;
Environmental Impact (C_4)	Environmental negative impact at every stage of power plants	Özcan and Erol, 2014; Ervural et al., 2018; Bilgili et al., 2022; Büyüközkan and Güleriyüz, 2016; Ertay et al., 2013
Affordability (C_5)	Ability to pay for electricity from energy alternatives	Zhang et al., 2022; de Wildt et al., 2021; Daim et al., 2010; Ediger et al., 2018

The DEMATEL method was applied to determine the weights of the evaluation criteria for nine regions. Then, the alternatives of each region were evaluated on a criterion basis via the AHP method. Finally, the social acceptance factor weights of the alternatives for each region were calculated. The analysis steps for the Western Anatolia region are given below as an example. The results of the study of the other regions are collectively shown in the conclusion section.

Table 5 shows the direct relationship matrix resulting from the evaluation of the decision maker.

Table 5. Direct relation matrix for Western Anatolia region

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0	1	2	4	1
C ₂	3	0	2	1	2
C ₃	1	2	0	3	4
C ₄	3	2	1	0	1
C ₅	2	3	1	2	0

Then, the sum of the rows and columns of the direct relationship matrix was calculated. It was divided by the sum of the highest row or column of all values in this matrix. In this way, the normalized matrix was obtained. The details of the normalized matrix are given in Table 6.

Table 6. Normalized relation matrix for Western Anatolia region

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0	0,1	0,2	0,4	0,1
C ₂	0,3	0	0,2	0,1	0,2
C ₃	0,1	0,2	0	0,3	0,4
C ₄	0,3	0,2	0,1	0	0,1
C ₅	0,2	0,3	0,1	0,2	0

The total relationship matrix was calculated in the following analysis stage. The details of this matrix are shown in Table 7.

Table 7. Total relation matrix for Western Anatolia region

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0,789	0,766	0,698	1,147	0,726
C ₂	1,034	0,690	0,724	0,966	0,828
C ₃	1,054	1,007	0,645	1,233	1,088
C ₄	0,945	0,760	0,582	0,760	0,655
C ₅	0,963	0,913	0,638	0,994	0,633

Determination of the weights of the criteria was carried out in the next step and the results are given in Table 8.

Table 8. Criterion weights for the Western Anatolia region

Criteria	D	R	D-R	D+R	Weights
Visual Pollution (C ₁)	4,125	4,785	-0,660	8,910	0,209
Noise Pollution (C ₂)	4,241	4,135	0,106	8,376	0,196
Regional Contribution (C ₃)	5,028	3,287	1,741	8,315	0,199
Environmental Impact (C ₄)	3,703	5,100	-1,397	8,803	0,208
Affordability (C ₅)	4,141	3,930	0,211	8,071	0,189

After finding the criterion weights for Western Anatolia, the criterion weights for other regions were found with the same method and are given in Table 9.

Table 9. Final results for the other region

	Trakya	Western Anatolia	Northwest Anatolia	Central Anatolia	Middle Black Sea	Eastern Anatolia	Southeastern Anatolia	Eastern Mediterranean	Western Mediterranean
Visual Pollution	0,229	0,209	0,235	0,220	0,212	0,211	0,200	0,231	0,144
Noise Pollution	0,190	0,196	0,145	0,163	0,185	0,200	0,188	0,186	0,180
Regional Contribution	0,184	0,199	0,219	0,207	0,211	0,205	0,211	0,190	0,251
Environmental Impact	0,214	0,208	0,225	0,219	0,207	0,224	0,200	0,210	0,205
Affordability	0,183	0,189	0,176	0,191	0,185	0,160	0,201	0,182	0,219

After obtaining the weights of the evaluation criteria with the DEMATEL method, the AHP method was used to evaluate the alternatives based on the criteria. The consistency rates of the evaluations and pairwise comparison matrices are given in Tables 10-14, respectively.

Table 10. Evaluation of visual pollution criteria in the Western Anatolia region

C ₁	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	Weights
A ₁	1	5	1	0,142	1	3	0,131
A ₂	0,200	1	0,200	0,111	0,333	1	0,040
A ₃	1	5	1	0,333	0,333	5	0,142
A ₄	7	9	3	1	3	9	0,463
A ₅	1	3	3	0,333	1	5	0,187
A ₆	0,333	1	0,200	0,111	0,200	1	0,038
CR = 0,0573							

Table 11. Evaluation of noise pollution criteria in the Western Anatolia region

C ₂	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	Weights
A ₁	1	9	5	1	3	5	0,338
A ₂	0,111	1	0,200	0,142	0,200	0,333	0,030
A ₃	0,200	5	1	0,333	0,333	0,200	0,077
A ₄	1	7	3	1	3	5	0,307
A ₅	0,333	5	3	0,333	1	1	0,128
A ₆	0,200	3	5	0,200	1	1	0,121
CR = 0,0971							

Table 12. Evaluation of regional contribution criteria in the Western Anatolia region

C ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	Weights
A ₁	1	0,200	0,142	0,333	0,200	0,111	0,028
A ₂	5	1	1	5	3	0,200	0,180
A ₃	7	1	1	7	5	1	0,278
A ₄	3	0,200	0,142	1	0,333	0,142	0,048
A ₅	5	0,333	0,200	3	1	0,200	0,090
A ₆	9	5	1	7	5	1	0,376
CR = 0,0734							

Table 13. Evaluation of environmental impact criteria in the Western Anatolia region

C ₄	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	Weights
A ₁	1	7	9	3	5	9	0,461
A ₂	0,142	1	3	0,333	0,200	3	0,076
A ₃	0,111	0,333	1	0,142	0,200	1	0,034
A ₄	0,333	3	7	1	3	7	0,235
A ₅	0,200	5	5	0,333	1	5	0,160
A ₆	0,111	0,333	1	0,142	0,200	1	0,034
CR = 0,0628							

Table 14. Evaluation of affordability criteria in the Western Anatolia region

C ₅	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	Weights
A ₁	1	0,200	0,333	0,111	0,142	0,111	0,026
A ₂	5	1	1	0,142	0,200	0,142	0,064
A ₃	3	1	1	0,200	0,333	0,200	0,063
A ₄	9	7	5	1	5	1	0,351
A ₅	7	5	3	0,200	1	0,200	0,146
A ₆	9	7	5	1	5	1	0,351
CR = 0,0783							

The social acceptance factor weights and ranking of energy types for the Western Anatolia Region are given in Table 15. Energy weights resulting from calculations for other regions are also given in Table 16.

Table 15. Final results for the Western Anatolia region

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	W	Ranking (R)
w	0,209	0,196	0,199	0,208	0,189		
A ₁	0,131	0,338	0,028	0,461	0,026	0,200	2
A ₂	0,040	0,030	0,180	0,076	0,064	0,078	6
A ₃	0,142	0,077	0,278	0,034	0,063	0,119	5
A ₄	0,463	0,307	0,048	0,235	0,351	0,282	1
A ₅	0,187	0,128	0,090	0,160	0,146	0,143	4
A ₆	0,038	0,121	0,376	0,034	0,351	0,180	3

Table 16. Final results for the other region

	Trakya		Northwest Anatolia		Central Anatolia		Middle Black Sea		Eastern Anatolia		Southeastern Anatolia		Eastern Mediterranean		Western Mediterranean	
	W	R	W	R	W	R	W	R	W	R	W	R	W	R	W	R
A ₁	0,245	2	0,304	1	0,233	2	0,218	3	0,214	2	0,198	3	0,227	2	0,179	3
A ₂	0,159	4	0,147	4	0,166	4	0,132	5	0,084	5	0,104	5	0,097	5	0,084	6
A ₃	0,280	1	0,163	3	0,286	1	0,256	1	0,303	1	0,389	1	0,289	1	0,176	4
A ₄	---	-	---	-	---	-	---	-	---	-	---	-	---	-	0,216	2
A ₅	0,109	5	0,145	5	0,135	5	0,160	4	0,187	4	0,126	4	0,165	4	0,120	5
A ₆	0,208	3	0,241	2	0,180	3	0,233	2	0,213	3	0,193	2	0,220	3	0,224	1

When Tables 15 and 16 are examined, it is seen that the same energy ranking is obtained in the Thrace and Central Anatolia regions. Still, different rankings are formed for all other regions. Geothermal energy is included in the analysis and weighted only in two regions. The energy ranking for all regions is given in general in Figure 2.

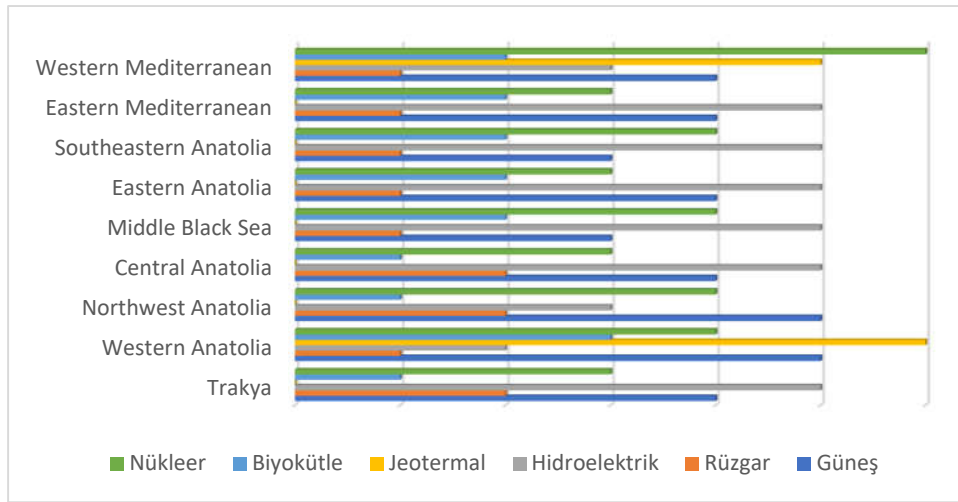


Figure 2. Overall view of all regions

Many factors affect regional rankings, as shown in Figure 2. The most important of these is the regional weights of the evaluation criteria. The regional weights of the evaluation criteria in Table 9 are graphically in Figure 3.

When Figure 3 is examined, visual pollution and environmental impact criteria generally have high weights. In general, noise pollution is not considered as much as visual pollution. The affordability criterion is typically in the last place or close to the last place. The regional contribution criterion is in the first place in the Western Mediterranean and Southeastern Anatolia regions, but its weight is not very low in other regions. The weights given to regional evaluation criteria can be seen collectively through the graph given in Figure 3.

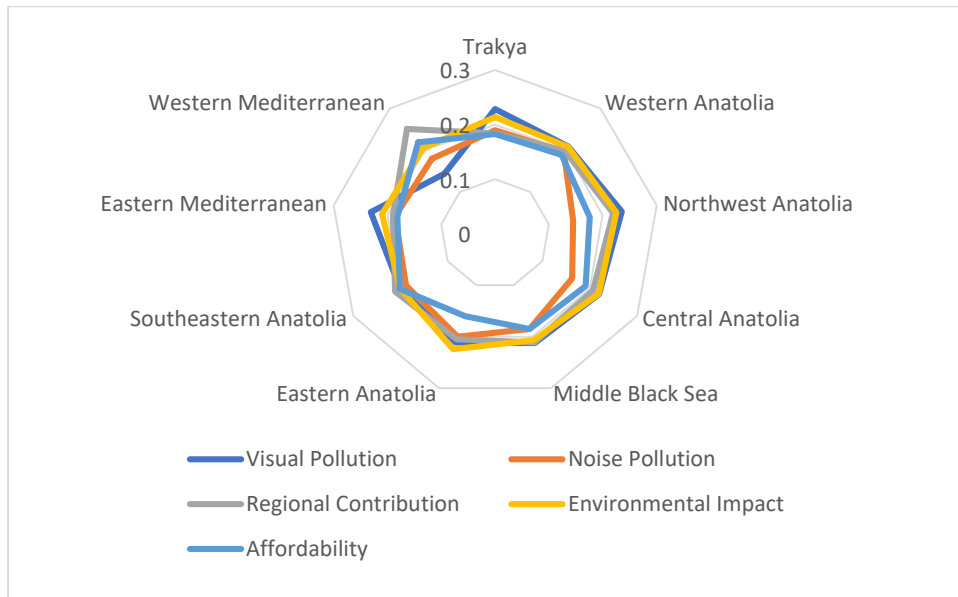


Figure 3. Overall view of all regions

RESULTS AND CONCLUSION

The sound implementation of investment plans in the energy field is possible by correctly determining the regional support for social energy types. Therefore, this study aims to weight the social acceptance factor of nine regions used by Türkiye Transmission Inc. for the appropriate energy types of the relevant region and to compare the energy types in the region among themselves. Five criteria, mostly used in literature, and five

energy types in seven regions and six energy types in two regions were analyzed with DEMATEL and AHP hybrid approach.

Geothermal energy ranks first in the Western Anatolian region and, ranks second with a slight difference in the Western Mediterranean region. There is high social support for this type of energy in these two regions because of the environmental impact of the geothermal energy. If there is a potential for this type of energy in other regions, researching the use of this potential can be effective in terms of social acceptance.

Wind energy is last rank for Western Anatolia, Central Black Sea, Eastern Anatolia, Southeastern Anatolia, Eastern Mediterranean and Western Mediterranean regions. It has been preferred in penultimate places in the other three regions, Thrace, Northwestern Anatolia, and Central Anatolia. Geographical constraints are also an essential determinant for energy investments. Energy potential should also be considered. The potential is an important criterion, especially for wind and hydroelectric power plants. Wind potential is relatively high, especially in the western part of Türkiye, in the Western Anatolia and Thrace regions. However, in these regions, the social acceptance of wind energy is low compared to other types of energy. Therefore, wind power plants should be built geographically farther from living areas and in a way that does not create visual and noise pollution.

There are no active nuclear power plants in Türkiye. A specific section of the Akkuyu nuclear power plant will be put into operation soon. When the analysis results are examined, there is no opposition to nuclear energy in general. Nuclear energy has only ranked first in the Western Mediterranean region. In other regions, it has been preferred as either second or third. It may be beneficial to plan future nuclear energy investments in this direction.

Hydroelectric power plants ranked first for six regions (Thrace, Central Anatolia, Central Black Sea, Eastern Anatolia, Southeastern Anatolia and Eastern Mediterranean). This situation can be explained by the high number of hydroelectric power plants, especially dam power plants, in the relevant regions.

Among renewable energy types, the lowest installed power is found in biomass energy. Although the social acceptance factor for this type of energy is generally low, the installed power of biomass energy can be increased.

Solar energy has always been in the top three in every region. Although solar energy is behind other types of energy in terms of efficiency, it is preferred in our country because of its high potential and shorter construction period. It would be beneficial and significantly increase of solar energy to provide more appropriate solar power incentives for roof applications and solar plant.

For future studies, other clean energy types like wave energy, which does not have an installed capacity but has been studied on its potential, can also be included in the analysis. Similar studies can be carried out using fuzzy numbers and linguistic variables for future studies.

Thanks and Information Note

This work was supported by Eskişehir Technical University Scientific Research Projects under project number 23DRP179.

References

- Assefa, G. and Frostell, B. (2007). Social sustainability and social acceptance in technology assessment: A case study of energy technologies, *Technology in Society*, 29, 63-78.
- Bhowmik, C., Bhowmik, S. and Ray, A. (2018). Social acceptance of green energy determinants using principal component analysis, *Energy*, 160, 1030-1046.
- Bilgili, F., Zarali, F., Ilgün, M.F., Dumrul, C., Dumrul Y. (2022). The evaluation of renewable energy alternatives for sustainable development in Turkey using intuitionistic fuzzy-TOPSIS method, *Renewable Energy*, 189, 1443-1458.
- Büyüközkan, G., Güleryüz, S. (2016). An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey, *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448.

- Chang, C-T. (2015). Multi-choice goal programming model for the optimal location of renewable energy facilities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 379-389.
- Dagoumas, A.S. and Koltsaklis, N.E. (2019). Review of models for integrating renewable energy in the generation expansion planning, *Applied Energy*, 242, 1573-1587.
- Daim, T.U., Kayakutlu, G., Cowan, K. (2010). Developing Oregon's renewable energy portfolio using fuzzy goal programming model, *Computers & Industrial Engineering*, 59, 786-793.
- de Wildt, T.E., Boijmans, A.R., Chappin, E.J.L., Herder, P.M. (2021). An ex ante assessment of value conflicts and social acceptance of sustainable heating systems: An agent-based modelling approach, *Energy Policy*, 153, 112265.
- Ediger, V.Ş., Kirkil, G., Çelebi, E., Ucal, m., Kentmen-Çin, Ç. (2018). Turkish public preferences for energy, *Energy Policy*, 120, 492-502.
- Ekşi, A., Kantarlı, İ.C., Yalçın, F.A. and Kirazlı, G. (2019). Enerji yatırımlarında sosyal kabulü etkileyen faktörlerin değerlendirilmesi, *Strategic Public Management Journal*, 5(10), 63-77.
- Eriksen, K. and Mikkelsen. (2024). What affects the level of local acceptance of salmon farming in Norway, *Aquaculture*, 588, 740926.
- Ernst, A. and Shamon, H. (2020). Public participation in the German energy transformation: Examining empirically relevant factors of participation decision, *Energy Policy*, 145, 111680.
- Ertay, T., Kahraman, C., Kaya, İ. (2013). Evaluation of renewable energy alternatives using macbeth and fuzzy AHP multicriteria methods: The case of Turkey, *Technological and Economic Development of Economy*, 19(1), 38-62.
- Ervural, B.C., Evren, R. and Delen D., (2018). A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning, *Renewable Energy*, 126, 387-402.
- Giamalaki, M., Tsoutsos, T. (2019). Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach, *Renewable Energy*, 141, 64-75.
- Gökler, S.H. and Boran, S. (2023). A novel resilient and sustainable supplier selection model based on D-AHP and DEMATEL methods, *Journal of Engineering Research*, In Press.
- Gölcük, İ. and Baykasoğlu, A. (2016). An analysis of DEMATEL approaches for criteria interaction handling within ANP, *Expert Systems with Applications*, 46, 346-366.
- Guo, y., Ru, P., Su, J. and Anadon, L.D. (2015). Not in my backyard, but not far away from me: Local acceptance of wind power in China, *Energy*, 82, 722-733.
- Kılıç, Ç., Yılmaz, M. and Sarı, R. (2017). Rüzgar enerji sistemlerinin sosyal Kabul dinamiklerini anlamak, *Coğrafi bilimler Dergisi*, 15(2), 135-156.
- Marzouk, M.A., Fischer, L.K. and Salheen, M.A. (2024). Factors affecting the social acceptance of agricultural and solar energy systems: The case of new cities in Egypt, *Ain Shams Engineering Journal*, 15, 102741.
- Oluoch, S., Lal, P., Susaeta, A., Wolde, B. (2021). Public preferences for renewable energy options: A choice experiment in Kenya, *Energy Economics*, 98, 105256.
- Özcan, E.C. and Erol, S. (2014). A Multi-Objective mixed integer linear programming model for energy resource allocation problem: The case of Turkey, *Gazi University Journal of Science*, 27(4), 1157-1168.
- Paravantis, J.A., Stigka, E., Mihalakakou, G., Michalena, E., Hills, J.M. and Dourmas, V. (2018). Social acceptance of renewable energy projects: A contingent valuation investigation in Western Greece, *Renewable Energy*, 123, 639-651.
- Park, E. (2021). Social acceptance of renewable energy technologies in the post-fukushima era, *Frontiers in Psychology*, 11, 612090.
- Riberiro, F., Ferreira, P., Araujo, M. and Braga, A.C. (2014). Public opinion on renewable energy technologies in Portugal, *Energy*, 69, 39-50.
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning priority setting*, New York: McGraw Hill.

- Sward, J.A., Nilson, R.S., Katkar, V.V., Stedman, R.C., Kay, D.L., Ifft, J.E., Zhang, K.M. (2021). Integrating social considerations in multicriteria decision analysis for utility-scale solar photovoltaic siting, *Applied Energy*, 288, 116543.
- Trevino-Mattinez, S., Sawhney, R. and Sims, C. (2022). Energy-carbon neutrality optimization in production scheduling via solar net metering, *Journal of Cleaner Production*, 380, 134627.
- Tunçbilek, Ö.F. and Yılmaz, M. (2022). Jeotermal enerjinin çevresel etkileri ve sosyal kabul: Efeler ilçesi örneği, *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(2), 154-169.
- Wu, H-H. and Tsai, Y-N. (2011). An integrated approach of AHP and DEMATEL methods in evaluating the criteria of auto spare parts industry, *International Journal of Systems Science*, 43(11), 2114-2124.
- Yakan, Ö.O. and Özer, Y.E. (2023). Yenilenebilir enerji yatırımları ve uygulamalarının sosyal boyutu: İzmir analizi, *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(2), 108-121.
- Yazo-Cabuya, E.J., Herrera, J.A. and Ibeas, A. (2024). Organizational risk prioritization using DEMATEL and AHP towards sustainability, *Sustainability*, 16, 1080.
- You, Y. and Yi, L. (2022). Energy industry carbon neutrality transition path: Corpus-based AHP-DEMATEL system modelling, *Energy Reports*, 8, 25-39.
- Zhang, Z., Liao, H. and Tang, A. (2022). Renewable energy portfolio optimization with public participation under uncertainty: A hybrid multi-attribute multi-objective decision-making methods, *Applied Energy*, 307, 118267.
- Zheng, Q., Shen, S-L., Zhou, A. and Lyu, H-M. (2022). Inundation risk assessment based on G-DEMATEL-AHP and its application to Zhengzhou flooding disaster, *Sustainable Cities and Society*, 86, 104138.



SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİNDEN DEĞER ESASINA DAYALI ARAZİ VE ARSA DÜZENLEME UYGULAMALARININ ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Vuslat SALALI

Öğr. Gör. Dr. Vuslat SALALI, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Isparta- Türkiye, ORCID: 0000-0003-2501-6335

ÖZET

Kentleşme ve hızlı nüfus artışı enerji kaynakları üzerindeki baskıyı artırarak enerji verimliliğini kentsel planlamada kritik bir odak noktası haline getirmiştir. Şehirler büyümeye devam ettikçe, yalnızca konut ve altyapı taleplerini karşılamakla kalmayıp aynı zamanda çevrenin korunmasını da teşvik eden sürdürülebilir kalkınma uygulamalarının hayata geçirilmesine acil ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, ekonomik, sosyal ve çevresel hususları bütünleştiren “değer esaslı” arazi ve arsa düzenlemesi (AAD) uygulamaları, kentsel alanlarda enerji verimliliğinin sağlanması için temel araçlardan biri olarak ortaya çıkmaktadır. AAD uygulamaları, arazi kullanım planlamasının sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumunu vurgulayarak kalkınmanın sadece ekonomik açıdan faydalı değil aynı zamanda enerji açısından verimli ve çevresel açıdan sorumlu olmasını sağlamaktadır.

Değer esasına dayalı AAD uygulamalarında odak noktası, ekonomik büyümeyi enerji verimli tasarım ve çevresel koruma ile dengeleyen kentsel ortamlar yaratmaktır. Karma kullanımlı bölgeleme, kompakt kentsel düzenler ve iyi planlanmış toplu taşıma sistemleri gibi stratejilerin uygulanması, enerji taleplerinin azaltılması için esastır. Ekonomik büyümenin yanı sıra enerji verimliliğine de öncelik veren AAD uygulaması, kentsel gelişime daha bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma, sürdürülebilir kalkınma kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve verimli altyapı sistemlerinin entegrasyonuna odaklanarak, değer esasına dayalı AAD uygulamalarının enerji verimliliğini artırmadaki rolünü araştırmaktadır. Doğru planlama ile hem çevresel hem de sosyo-ekonomik faktörlerin göz önünde bulundurulması yoluyla, değere dayalı AAD uygulamaları, enerji açısından verimli, dayanıklı ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu kentsel alanların yaratılmasına yardımcı olabilir.

Çalışma değer esasına dayalı AAD uygulamalarının sürdürülebilir kalkınma hedeflerine uygun şekilde kentsel formu destekleyen, enerji verimliliğini sağlamak için etkin bir imar uygulama yöntemi olduğunu ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji çözümlerinin (güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji gibi) AAD uygulamalarına dahil edilmesi, kentsel alanların karbon ayak izini önemli ölçüde azaltarak küresel sürdürülebilirlik çabalarına katkıda bulunabilir.

Keywords: Değer Esaslı Dağıtım (Eşdeğerlilik), Arazi ve Arsa Düzenlemeleri (AAD), Sürdürülebilirlik, Enerji Verimliliği, İmar Uygulamaları.

GİRİŞ

Kentlerdeki nüfus yoğunluğunun artışı, ekonomik ve kültürel faaliyetlerin çeşitlenmesi ve sanayileşme süreçlerinin hızlanmasıyla enerji talebi hızla yükselmiştir (İşiler vd., 2022). 21. yüzyılda, gelişmiş ülkelerin ekonomik büyümesini sürdürebilmesi ve gelişmekte olan ülkelerin kalkınma hedeflerine ulaşabilmesi için enerji ihtiyacı küresel ölçekte önemli bir sorun haline gelmiştir (Demirsoy, 2021). OECD'nin 2012 tarihli raporuna göre, 2050 yılına kadar küresel ekonominin dört kat büyümesi ve bu durum enerji ihtiyacını mevcut seviyenin %80 üzerinde artıracığı beklenmektedir. Bu durum hem çevresel sorunlara hem de ekonomik istikrarsızlığa yol açabilecek ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (İşiler vd., 2022; Altan ve Sağbaşı, 2020). Kentleşmenin getirdiği bu enerji sorununa çözüm olarak arazi kullanım verimliliğini artırarak sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak önemlidir. Özellikle enerji kullanımı açısından kentlere bakıldığında, kentsel alanların bir mekân olarak sadece kentsel enerji kullanımına doğrudan katılımcı olmakla birlikte aslında kentsel ekonominin vazgeçilmez kaynaklarından biridir. Ayrıca yerel yönetimler tarafından hızlı ekonomik büyümeyi teşvik etmek için kullanılan önemli bir güç ve garanti kaynağıdır. Bu nedenle kentsel ekonomik büyüme ve enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Zhang vd., 2024).

Doğru bir planlama ve planların uygun bir yöntem ile mekâna uygulanması sonrası oluşan kentsel alanlara yapılacak olan enerji verimli binalar, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayarak iklim değişikliği ve benzeri çevresel sorunların etkilerini azaltır. Aynı zamanda, enerji maliyetlerini düşürerek hem bireyler hem de toplum için ekonomik avantajlar sağlar. Bu bağlamda, çevre dostu ve yaşanabilir kentler ile enerji verimli yapılaşma arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. İmar planları, bu ilişkiyi şekillendiren en önemli araçlardan biridir. Arazi kullanım kararları, yapı ruhsatlandırma süreçleri ve binaların mevcut kullanım durumları gibi faktörler, binaların enerji performansını doğrudan etkilemektedir. Enerji verimliliği, sadece bina kabuğunun değil, aynı zamanda arazi yönetimi, enerji üretimi ve tüketimi gibi daha geniş bir perspektifle ele alınması gereken bütüncül bir konudur (İşiler, 2024).

Değer esasına dayalı arazi ve arsa düzenlemeleri (AAD), taşınmaz sahiplerinin haklarının korunması ve adil bir dağıtımın sağlanması için önemli bir yöntemdir. Bu yöntemde imar düzenlemesi yapılan bir alandaki parsellerin, düzenleme sonucu ortaya çıkan değer artışına göre yeniden dağıtılmasıdır. Bu sayede, düzenlemeden etkilenen tüm mülk sahipleri, bu artıştan adil bir şekilde pay alır. Uygulama ile taşınmazın konumu, alanı ve şekli değişse bile değeri aynı kalmalıdır. Bu nedenle yöntem “eşdeğerlik” ya da “eşdeğerlilik” yöntemi olarak da adlandırılır. Değer esasına bağlı dağıtımın yapılması ile imar planlarına uygun esnek ve verimli projelerin yapılmasına imkân sağlar. Taşınmazın mevcut ve gelecekteki değeri belli kriterler (konumu, sosyal ve kamu donatı erişebilirliği, ulaşım erişebilirliği, imar hakkı, cephesi, alanı, vb.) dikkate alınarak kaynakların etkin kullanımı sağlanır. Bu kapsamda mülkiyet hakkını koruyan ve toplumsal adaleti sağlayan bir uygulama olarak görülmektedir (Salalı ve İnam, 2024).

AAD çalışmalarının değer esasına göre yapılması bu bağlamda imar planlarının enerji verimliliğine olan etkisini önemli ölçüde artıran bir yaklaşımdır. Yöntem, arazinin doğal ve kültürel özelliklerinin yanı sıra enerji potansiyelinin de değerlendirilmesini içerir. Arazinin jeomorfolojik özellikleri, güneşlenme durumu, rüzgâr rejimi gibi faktörler, yapıların yerleşimini ve yönelimini belirlemede önemli rol oynar. Bu sayede, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine uygun doğal kaynaklardan maksimum fayda sağlanırken, enerji tüketiminin minimum seviyeye gelmesi konusunda fayda sağlar.

MATERYAL VE METOD

Sonlu yani yenilenemeyen bir kaynak olarak arazinin yönetimi, sosyal ve kültürel ihtiyaçlar, çevresel etkileşimler ve sağlanacak ekonomik katkıların bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerektirmektedir (GRPUI). Bu kapsamda, sürdürülebilir kalkınma prensipleri doğrultusunda gerçekleştirilecek faaliyetler için enerji kritik bir bileşendir. Enerjinin sürdürülebilir kaynaklardan sağlanması ve çevresel etkilerinin en aza indirilmesi, bu tür faaliyetlerin başarıyla yürütülmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

1992 yılında Brezilya'nın Rio de Janeiro kentinde gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı (UNCED), bilinen adıyla Gündem 21, doğal kaynakların kullanımı ve yönetiminde sürdürülebilirlik ilkesinin temel bir gereklilik olduğunu vurgulamıştır (Yomralıoğlu, 2011). Uluslararası Haritacılar Federasyonu (FIG), arazi yönetimi kavramını, “*arazi kaynaklarının kullanım ve gelişiminin planlandığı, yönetildiği ve denetlendiği süreç*” olarak tanımlamaktadır (FIG, 1995). Bu sürecin etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilebilmesi için, arazi yönetim politikalarının doğru, güvenilir ve güncel bilgiye dayanması gereklidir. Sağlıklı arazi politikaları ancak kapsamlı ve güncel arazi verileriyle mümkün hale gelmektedir (FIG ve UN, 1999).

AAD uygulamalarının değer esaslı dağıtım kriteri baz alınarak yapılması ile enerji verimliliğinin sağlanmasına yönelik teorik değerlendirmelerin yapılması çalışmanın temel amacıdır. Bu kapsamda uluslararası sertifikalar ve literatür taraması ile karşılaştırmalı değerlendirmeler çalışmanın yöntemini oluşturmaktadır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Dünya, hızla artan nüfus ve ekonomik büyümeyle birlikte enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevresel bozulma gibi ciddi sorunlarla karşı karşıyadır (Shahbaz vd., 2013; Shan vd., 2021; Tao vd., 2022). Enerji tüketiminin fazlaşması, bu sorunların başlıca nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir (Tian vd., 2022). Dünyada enerji verimliliği hem enerji kıtlığına hem de çevre kirliliğine karşı etkili bir çözüm olarak önemli bir etkiye sahiptir (Fu vd., 2022; Wan vd., 2021). Bu kapsamda kentleşme nedeni ile ortaya çıkan çevre, enerji, iklim sorunları

yanında zemin şartlarına uygun olmayan yapılar nedeni ile yaşanan mekâna bağlı sorunlar hızla artmaktadır. Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin tamamı bu kapsamda oluşturulmuştur.

Sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda AAD uygulamalarının enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıktır. Bu konuda Türkiye'de enerji verimliliğini artırmak amacıyla yürürlüğe konulan Enerji Kimlik Belgesi (EKB) uygulamasının, tek bir bina ölçeğinde değil, tüm bir yerleşim alanı bazında ele alınmasının önemi vurgulanmaktadır. Bu sayede, arazi mülkiyeti, arazi kullanımı gibi faktörler ile değerlendirilerek daha kapsamlı bir enerji verimliliği stratejisi geliştirilebileceği belirtilmektedir (İşiler vd., 2022).

Zhou ve arkadaşları tarafından 2022 yılında yayınlanan bir çalışma özellikle kentsel alan düzenlemelerinde, yanlış taşınmaz tahsisinden kaynaklanan karbon emisyonunun verimliliğini Çin genelinde incelemişlerdir. Yapılan çalışma özellikle kentsel alanlarda bulunan ticari ve endüstri alanlarının tahsisinde yapılan hatalara, uygulanan yanlış politikalara ışık tutmuştur. Karbon emisyonunun bölgelere göre değişim gösterdiğini vurgulayan çalışma, AAD ve benzeri uygulamaların değer esaslı bir anlayışla yapılması ile sürdürülebilir kalkınmanın teşvik edileceğini savunmaktadır.

Benzer bir çalışma Ali ve Nitivattananon (2012) tarafından Pakistan odağında yapılmıştır. Çalışma, özellikle Pakistan'da yaşanan kentleşme sonrası tarım alanlarının azalmasına dikkat çekmiştir. Özellikle kent içi yeşil alan ya da rekreasyon alanlarının neredeyse bulunmaması ile artan CO₂ kaynaklarına, doğru bir arazi yönetim politikasına sahip olunmamasının neden olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda uygun arazi yönetimi politikaları ile şehirdeki enerji kullanımı ve CO₂ emisyonlarının mevcut artan eğilimini engellemenin mümkün olacağı ortaya konulmuştur.

Sınırlı arazi kaynaklarının etkin kullanımı, kentlerin iklim değişikliğine uyum sağlamasına ve doğal afetlere karşı daha dirençli hale gelmesine de katkı sağlar. Ma ve arkadaşlarının (2024) çalışması, bu konuda önemli bir dönüm noktası olmuştur. Yayınlanan çalışmada, sınırlı arazi kaynaklarının etkin kullanımı sayesinde kentlerin sürdürülebilir bir geleceğe kavuşabileceğini belirtmişlerdir. Bu yaklaşım, arazi kullanımı planlamasında optimizasyon tekniklerinin kullanılması, yeşil altyapı yatırımlarının artırılması ve enerji verimliliği standartlarının yükseltilmesi gibi stratejileri içermektedir.

İncelenen literatür kapsamında AAD uygulamaları, sadece enerji verimliliği değil, aynı zamanda su yönetimi, hava kalitesi, biyolojik çeşitlilik gibi birçok çevresel faktörü de etkilemektedir. Her bölgenin iklim, topografya ve doğal kaynakları farklı olduğu için, AAD uygulamaları da yerel koşullara göre belirlenmelidir. AAD ve enerji verimliliği arasındaki ilişkiyi güçlendirmek için, yerel yönetimler ve planlamacılar tarafından uygun politikalar ve düzenlemeler geliştirilmelidir. Bu kapsamda dünya çapında pek çok sertifikasyon sistemleri arazi yönetimi ve enerji verimliliği konusunda önemli kıstaslar içermektedir.

LEED (ABD) (Roderic ve ark., 2009; Alyami ve Rezgui, 2012; Yılmaz ve Balyemez, 2020; Ürük ve İslamoğlu, 2019; Mutlu ve ark., 2019; Karademir ve Dağ, 2021), BREEAM (İngiltere) (Roderic ve ark., 2009; Alyami ve Rezgui, 2012; Yılmaz ve Balyemez, 2020; Ürük ve İslamoğlu, 2019; Mutlu ve ark., 2019), Greenstar (Avustralya) (Roderic ve ark., 2009; URL.1), CASBEE (Japonya) (Alyami ve Rezgui, 2012), SBTool (Kanada) (Alyami ve Rezgui, 2012; Mutlu ve ark., 2019), DGNB (Almanya) (Ürük ve İslamoğlu, 2019), HQE (Fransa) (URL.2), Green Star SA (Güney Afrika) (URL.3), Green Mark (Singapur) (URL.4), B.E.S.T. (Türkiye) (Yılmaz ve Balyemez, 2020; URL.5) sertifikasyon sistemleri çalışma kapsamında, özellikle sürdürülebilirlik perspektifinden değer esasına göre yapılan AAD uygulamalarını kapsayıcı şekilde incelenerek mekâna dayalı kriterler tablo.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Mekâna dayalı yeşil bina sertifikasyon kriterlerinin karşılaştırılması.

Sertifikasyon Sistemi	Odak Alanları	Önemli Kriterler
LEED (ABD)	Sürdürülebilir arazi, yerel ekosistemlerin korunması, toplu taşıma erişimi, bisiklet yolları, su tutma alanları	Yerel ekosistemlerin korunması, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, toplu taşıma teşviki, yeşil altyapı
BREEAM (İngiltere)	Ekoloji, arazi kullanımı, biyoçeşitlilik, su kaynaklarının korunması, toprak kirliliği	Ekoloji, biyoçeşitlilik, doğal kaynakların korunması, toprak kirliliğinin önlenmesi
Greenstar (Avustralya)	Yerel ekoloji, yeşil altyapı, su yönetimi, toprağın korunması	Yerel ekolojiye uyum, yeşil altyapı uygulamaları, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi
CASBEE (Japonya)	Deprem güvenliği, enerji verimliliği	Mekânsal olarak daha çok yapısal güvenlik ve enerji verimliliğine odaklanır, ancak çevresel kriterleri de içerir.
SBTool (Kanada)	Enerji, su, malzeme, iç hava kalitesi, sürdürülebilir arazi	Sürdürülebilir site kavramını benimser, yerel ekosistemlerin korunmasına ve yeşil altyapı uygulamalarına önem verir.
DGNB (Almanya)	Ekoloji, ekonomik kalite, sosyokültürel kalite	Ekoloji, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik arasında denge kurar. Arazinin ve çevrenin korunmasına önem verir.
HQE (Fransa)	Enerji, su, atık, biyoçeşitlilik, sağlık ve konfor	Biyoçeşitliliğin korunması, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, atık yönetimi ve sağlıklı yaşam koşulları gibi konulara odaklanır.
Green Star SA (Güney Afrika)	Yerel ekoloji, yeşil altyapı, su yönetimi, toprağın korunması	Güney Afrika'nın özel koşullarına uygun olarak geliştirilmiştir. Kuraklık, biyoçeşitlilik kaybı gibi bölgesel sorunlara çözümler sunar.
Green Mark (Singapur)	Tropikal iklime uygunluk, sürdürülebilirlik	Tropikal iklim koşullarına uygun çözümler sunar. Enerji verimliliği, su tasarrufu ve doğal havalandırma gibi konulara odaklanır.
B.E.S.T. (Türkiye)	Yerel koşullara uyum, sürdürülebilirlik	Türkiye'nin iklim ve coğrafi koşullarına uygun olarak geliştirilmiştir. Yerel malzeme kullanımı, su tasarrufu ve enerji verimliliği gibi konulara odaklanır.

Karşılaştırma sonucunda tüm sistemlerin, yerel koşullara uyumun önemini vurguladığı görülmektedir. Ancak Green Star, Green Mark ve B.E.S.T gibi sistemler bu konuya daha fazla odaklanmaktadır. BREEAM, DGNB ve HQE gibi sistemler, ekolojik etkileri değerlendirmede daha kapsamlı bir yaklaşım benimsemişlerdir. LEED, sürdürülebilir arazi kavramını geniş kapsamlı bir şekilde ele alarak, binaların çevreleriyle olan etkileşimini değerlendirmektedir. Tüm sistemler su kaynaklarının korunması ve enerjinin verimli kullanımı konusunda önemli kriterler belirlemiştir.

Söz konusu sertifikasyon sistemleri, arazi, toprak, arsa ve kentsel alan gibi mekânsal faktörleri farklı ağırlıklarda değerlendirerek, sürdürülebilir binaların inşa edilmesini teşvik etmektedir. Değer esaslı AAD uygulamaları ise bu süreçte katılımı sağlayarak, daha adil ve sürdürülebilir bir kentsel alan oluşumu için olanak sağlar. Her sertifikasyon sisteminin puanlama sistemi, projenin büyüklüğüne, yerine ve diğer değişkenlere göre farklılık gösterebilir. Bu nedenle, aşağıdaki tablo.2, sistemin özellikle arazi kullanımı konusunda değer esaslı AAD uygulamaları ile ilişkisini genel bir kıyaslama ile sunmaktadır.

Tablo 2. Sertifikasyon sistemlerinde arazi kullanım kriterlerinin puanaj tabanlı karşılaştırması ve değer esaslı AAD ile ilişkisi.

Sertifikasyon Sistemi	Arazi Kullanım Kriterleri	Puanlama Ağırlığı (Yaklaşık)	Değer Esaslı AAD ile İlişkisi
LEED (ABD)	Sürdürülebilir arazi, yerel ekosistemlerin korunması, toplu taşıma erişimi, yeşil altyapı	Yüksek	Sürdürülebilir arazi kavramı ile doğrudan ilişkilidir.
BREEAM (İngiltere)	Ekoloji, arazi kullanımı, biyoçeşitlilik, su kaynaklarının korunması	Orta-Yüksek	Ekoloji ve arazi kullanımı kriterleri, değer esaslı AAD ile uyumlu bir şekilde değerlendirilir.
Greenstar (Avustralya)	Yerel ekoloji, yeşil altyapı, su yönetimi	Orta-Yüksek	Yerel ekolojiye odaklanması, yerel özelliklere uyum sağlamasına yardımcı olur.
CASBEE (Japonya)	Deprem güvenliği, enerji verimliliği	Düşük (Çevresel kriterler daha az ağırlıklı)	Daha çok yapısal güvenlik ve enerji verimliliğine odaklandığından, doğrudan ilişkisi sınırlıdır.
SBTool (Kanada)	Sürdürülebilir arazi, yeşil altyapı	Orta	Sürdürülebilir arazi kavramı ile doğrudan ilişkilidir.
DGNB (Almanya)	Ekoloji, ekonomik kalite, sosyokültürel kalite	Yüksek	Ekoloji ve sosyal boyutları, değer esasına dayalı AAD'nin toplumsal fayda boyutunu destekler.
HQE (Fransa)	Biyoçeşitlilik, doğal kaynakların korunması	Orta-Yüksek	Biyoçeşitlilik ve doğal kaynakların korunması, değer esaslı yapılan AAD'nin çevresel hedefleriyle uyumludur.
Green Star SA (Güney Afrika)	Yerel ekoloji, yeşil altyapı, su yönetimi	Orta-Yüksek	Yerel koşullara uyum sağlaması, yerel özelliklere uygun katkı sağlar.
Green Mark (Singapur)	Tropikal iklime uygunluk, sürdürülebilirlik	Orta-Yüksek	Tropikal iklime uygun çözümler, yerel özelliklere uyum sağlamasına yardımcı olur.
B.E.S.T. (Türkiye)	Yerel koşullara uyum, sürdürülebilirlik	Orta-Yüksek	Yerel koşullara uyum, <i>değer esaslı</i> yapılan AAD'nin yerel özelliklere uygun uygulanmasına katkı sağlayabilir.

Değer esasına dayalı bir dağıtım kriteri ile yapılan AAD uygulamaları, yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin mekânsal kriterleriyle doğrudan ilişkilidir. Taşınmazın ekonomik değeri ile fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, arazi kullanımının optimize edilmesini sağlar. Bu yaklaşım, adil bir değer dağılımı sağlayarak yeşil bina yatırımlarını teşvik eder ve sürdürülebilir kentsel dönüşümü destekler. Ayrıca, imar planlama süreçlerinde karar alma mekanizmalarını güçlendirerek daha sürdürülebilir kararlar alınmasını sağlar. Dünya genelinde birçok ülke (Almanya, Avusturya, Avustralya, Brezilya, Çin, Hindistan, Hollanda, İspanya, İsveç, İsviçre, Japonya, Kolombiya, Kore, Tayland, Tayvan), bu yaklaşımı benimseyerek yeşil binalar aracılığıyla sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı amaçlamaktadır.

Hızlı kentleşme, enerji tüketimini artırarak çevre sorunlarına yol açmaktadır. Düzenli ve düzensiz yerleşim alanlarındaki enerji tüketimi farklılıkları, sürdürülebilir kentsel planlamanın önemini göstermektedir. Değer esasına dayalı arazi düzenleme uygulamaları, enerji verimliliğini artırmak için umut vadeden bir çözümdür. Bu kapsamda 2010 yılında Glaeser ve Kahn tarafından yapılan çalışma ile özellikle ABD özelinde düzenli kentlerin enerji kullanımında %20'ye kadar daha verimli olduğu gösterilmiştir. Çalışma özellikle toplu taşıma uygulamalarının önemine değinmiştir.

Kentsel alanlar, küresel sera gazı emisyonlarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu durum, enerji verimliliği odaklı kentsel planlama uygulamalarının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Kentsel form ve yoğunluk gibi faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkileri, sürdürülebilir şehirlerin inşası için kritik bir araştırma alanıdır (Abar vd., 2023). Bu kapsamda değer esasına dayalı AAD uygulamaları, sadece çevresel değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik faydalar da sağlar. Bu yaklaşım, kentsel planlama kararlarının enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirilmesine önemli katkı sağlar.

SONUÇ

Uygulama imar planlarının hazırlanmasında ve parselasyon planlarının yapılmasında yerleşimlerin enerji tüketimini azaltıcı şekilde kurgulanması gerekir (Sımmaz, 2015). İmar parsellerinin üretiminde ve imar adalarındaki yapı nizamalarının belirlenmesinde düzenleme bölgesinin topoğrafik ve iklim koşullarına dikkat edilmeli, binaların güneş ışığından ve yararlı rüzgârlardan verimli bir şekilde yararlanmaları sağlanmalıdır (Demircan ve Gültekin, 2017). Yerel yönetimler ayrıca yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik edici bir planlama sürecini etkin kılacak yöntemler geliştirmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını destekleyecek şekilde arazi kullanım kararları alınmalıdır (İşiler, 2024).

Bu kapsamda **Değer esaslı AAD uygulamaları**, bir bölgedeki imar planı değişikliğinden doğan artan değer, bu bölgedeki tüm mülk sahipleri arasında adil bir şekilde paylaşılmasını amaçlar. Bu uygulamalar, yeşil bina yatırımlarını teşvik ederek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine önemli katkılar sağlar. Özellikle Yeşil binaların yapılması, mülk değerlerini artırır. Bu durum, yatırımcıları yeşil bina projelerine yönlendirir ve yatırımı teşvik eder. Değer artışının adil paylaşımı, yatırımcıların risk algısını azaltarak finansman bulmayı kolaylaştırır. İnşaat sektöründe sürdürülebilir kalınma sağlanarak ekonomik gelişim desteklenir.

Sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında ise düzenleme sınırları içerisinde enerji verimliliği, su tasarrufu ve atık yönetimi gibi altyapı konularında, ulaşım arterlerinin planlanması ve uygulanması ile toplu ulaşım sistemlerinde önemli iyileşmeler sağlanacağından çevresel kirliliğin önüne geçilir. Yapılacak yatırımlar yeni iş imkânları sağlayarak yerel ekonomiyi canlandırır. Mekânda yaşayan kentliye sağlıklı ve konforlu yaşam alanları sunulması yaşam kalitesini yükseltir. AAD uygulamalarının değer esasına dayalı olarak yapılması, toplumsal bilinç ve katılımı artırarak daha sürdürülebilir toplulukların oluşmasına katkı sağlar.

KAYNAKLAR

- Abar, S.N., Schulwitz, M., Faulstich, M. (2023). The Impact of Urban Form and Density on Residential Energy Use: A Systematic Review, 15, 15685.
- Ali G., Nitivattananon V. (2012). Exercising multidisciplinary approach to assess interrelationship between energy use, carbon emission and land use change in a metropolitan city of Pakistan, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, pp. 775-786.
- Altan, D, A., ve Sağbaş, A. (2020). Türkiye'nin enerji verimliliği ve iklim değişikliği performansı: mevcut durum ve gelecek projeksiyonu, Verimlilik Dergisi, 1, 7-26
- Alyami, S.H., Rezgui, Y. (2012). Sustainable building assessment tool development approach, Sustainable Cities and Society, Volume 5, pp. 52-67.
- Çillioğlu Karademir, A., Dağ, A., (2021). Sürdürülebilirlik Uygulaması Olarak Yeşil Bina ve LEED Sertifikasyonu Üzerine Türkiye İnşaat Sektöründe Bir Çalışma, Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi, 7(1), 63-83.
- Demircan, R.K., ve Gültekin, A. B. (2017) Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 10 (1), 36-51.
- Demirsoy, G. (2021). Binalarda enerji verimliliğinin etkinlik analizi. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- FIG Statement on the Cadastre, Publication No. 11, Fédération Internationale des Géomètres, 1995.
- Glaeser, E. L., Kahn, M.E. (2010). The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development, Journal of Urban Economics, Volume 67, pp. 404-418.
- Guidelines on Real Property Units and Identifiers, United Nations Economic Commission for Europe. United Nations, New York and Geneva, 2004.
- İşiler, M., Yanalak, M., & Selbesoğlu, M.O. (2022). Arazi yönetimi paradigması çerçevesinde Türkiye'de binalar için enerji kimlik belgesi uygulamasının değerlendirilmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mh. Bil.Dergisi, 11 (3), 689-705.
- İşiler, M., 2024. Türkiye'de Mülkiyet Ve Mülkiyet Yönetiminin Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, 203 s, İstanbul.

- Kavas, A. ve Başoğlu, A. D. (2019) Yerel yönetim politikalarında yenilenebilir enerji. İDEALKENT, 10 (27),410-446.
- Köse-Mutlu, B., Arslanoğlu, Z. O., Günaçtı, B., Say, B., Şahin F., Yılmaz, C., Yardımcı Tiryakioğlu, N., (2019), Uluslararası Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin İncelenmesi ve Tasarlanan Ulusal Sertifika Sisteminin Kullanımı: Bir Kampüs Binası ile Vaka Çalışması, İklim Değişikliği ve Çevre, 4, (2) 32–41.
- OECD Multilingual Summaries Development Co-operation Report 2012.
- Roderick, Y., McEwan, D., Wheatley, C., Alonso, C., (2009). Comparison of energy performance assessment between leed, breem and green star, Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30, Glasgow, Scotland, 1167-1176.
- Salalı, V., İnam, Ş., (2024). Sürdürülebilir akıllı kentler için değer esasına dayalı imar uygulama yönteminin gerekliliği, 10. International European Congress On Advanced Studies In Basic Sciences, 26-28 July, s. 943-952, Amsterdam, Netherlands.
- Shahbaz, M., Tiwari, A.K., Nasir, M., (2013). The effects of financial development, economic growth, coal consumption and trade openness on CO₂ emissions in South Africa, Energy Pol., 61, pp. 1452-1459.
- Shan, Y., Ou, J., Wang, D., Zeng, Z., Zhang, S., Guan, D., Hubacek, K. (2021). Impacts of COVID-19 and fiscal stimuli on global emissions and the Paris Agreement, Nature Climate Change, 11 (3), pp. 200-206.
- Sınmaz, S. (2015). Enerji verimliliği temasının Türkiye şehir planlama sistemine entegrasyonu: Lâpseki kenti için bir yaklaşım. Planlama, 15(2), 195-204.
- T. Yomraloğlu, Dünya’da arazi yönetimi. Arazi Yönetimi Çalıştayı, Okan Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- Tao, H., Zhuang, S., Xue, R., Cao, W., Tian, J., Shan Y. (2022). Environmental finance: an interdisciplinary review, Technological Forecasting and Social Change, 179, 121639.
- The Bathurst Declaration, United Nations Interregional Meeting of Experts on the Cadastre, Fédération Internationale des Géomètres (FIG) and Unedit Nations (UN), Publication No:21, Copenhagen, Denmark ,1999.
- Tian, J., Yu, L., Xue R., Zhuang, S., Shan Y. (2022). Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era, Applied Energy, Volume 307, 118205.
- Ürük, Z. F., Külünkoğlu İslamoğlu, A. K. (2019). Breeam, Leed ve DGNB Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerinin Standart Bir Konutta Karşılaştırılması, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 15, S. 143-154.
- Wan, D., Xue, R., Linnenluecke, M., Tian, J., Shan Y. (2021). The impact of investor attention during COVID-19 on investment in clean energy versus fossil fuel firms, Finance Research Letters, Volume 43, 101955.
- Yılmaz, E., Balyemez, S. (2020). Türkiye’de yeşil bina sertifikasyon sistemleri, ABMYO Dergisi, Sayı 57, 1-18.
- Zhang, H., Song, Y., Zhang, M., Duan, Y. (2024). Land use efficiency and energy transition in Chinese cities: A cluster-frontier super-efficiency SBM-based analytical approach, Energy, Volume 304, 132049.
- Zhou, D., Huang, Q., Chong, Z. (2022). Analysis on the effect and mechanism of land misallocation on carbon emissions efficiency: Evidence from China, Land Use Policy, Volume 121, 106336.
- Zitian, F., Zhou, Y., Li, W., Zheng, K. (2022). Impact of digital finance on energy efficiency: empirical findings from China, Environmental Science and Pollution Research, 30, pp. 2813–2835.
- URL.1 <https://new.gbca.org.au/>
- URL.2 <https://www.hqegbc.org/>
- URL.3 <https://www.gbcsa.org.za/>
- URL.4 <https://www1.bca.gov.sg/>
- URL.5 <https://www.cedbik.org/>

**AVRUPA BİRLİĞİ'NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ POLİTİKASINDA GÜNEŞ'İN PAYI:
ALMANYA-TÜRKİYE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ¹****Seyran DUMAN**

İstanbul Üniversitesi, Avrupa Birliği Anabilim Dalı, Avrupa Birliği Bölümü, Doktora Öğrencisi, İstanbul-Türkiye,
ORCID: 0000-0002-9896-7070

Özet

Fosil yakıtların hızla tükenmesinden dolayı dünyadaki çoğu ülke yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek yenilenebilir enerji politikaları oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre dostu olup sürdürülebilirliği sağladığından ve dışa bağımlılığı azalttığından dolayı önemi gün geçtikçe artmaktadır. Avrupa Birliği (AB) enerji tüketiminde dünyada ikinci sırada yer almakta ve enerji ithalatında da birinci sıradadır. Dolayısıyla AB üyesi ülkeler son yıllarda yenilenebilir enerji alanında araştırmalarını arttırmaktadır. Güneş enerjisi tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının kökeni olup tükenmeyen bir enerji kaynağı olduğu için diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha üstün özelliklere sahiptir. Almanya güneş enerjisinde dünyada lider ülkeler arasındadır. Ayrıca 2050 yılında elektriğin %100' ünü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamayı hedeflemektedir. Almanya yenilenebilir enerji alanında sağladığı başarılarla beraber en çok kurulu güneş paneline sahip bir ülkedir. Avrupa'nın en temiz ve sürdürülebilir enerji pazarı da buradadır. Üyelik sürecinde olan Türkiye için AB'nin enerji politikalarını, kaynaklarını ve hedeflerini bilmek önemlidir. Ekonomik dengeyi kurmak ve olası üyelik durumunda enerji alanında yapılan antlaşmalar Türkiye için önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada, Türkiye iklim özellikleri açısından Almanya'dan daha fazla güneşli gün sayısına sahip olmasına rağmen güneş enerji kullanımını önleyen gerçeklerin ne olduğu incelenmiştir. Avrupa karanlık bir bölge olup güneş enerjisini kullanabiliyorken Türkiye'nin aydınlık bir bölgede yer alıp neden güneş enerjisini kullanamadığı ve Türkiye'nin güneş enerjisini etkin kullanamamasının bürokratik, hukuki, teknik, ekonomik ve politik nedenlerinin ne olduğu araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: AB Yenilenebilir Enerji Politikası, AB Güneş Enerjisi, Almanya ve Türkiye Güneş Enerjisi.

SUN'S SHARE IN THE EUROPEAN UNION'S RENEWABLE ENERGY POLICY: GERMANY-TURKEY COMPARATIVE ANALYSIS²**ABSTRACT**

Most countries in the world are going towards to renewable energy sources and creating renewable energy policies due to the rapid depletion of fossil fuels. The importance of renewable energy sources is getting increase day by day due to be environmental friend and ensuring sustainability and reduce foreign dependency. EU ranks second on consuming energy in the world and ranks first in importing energy. Therefore, EU member countries are increasing their research in the field of renewable energy in recent years. Since solar energy is the source of all renewable energy sources and non-depletable source of energy, it has superior characteristics features when compared to other renewable energy sources. Germany is one of the leading countries in the world in solar energy producing and her target is to provide 100% of the electricity from renewable energy sources in 2050. Germany has the most established solar panels with achievements in renewable energy, Europe's cleanest and most sustainable energy market is also here. It is important for Turkey, which is in membership process, to know the EU's energy policies, resources and objectives. In potential membership

¹ İstanbul Üniversitesi Avrupa Birliği Anabilim Dalı, Avrupa Birliği Bölümü'nde 2019 yılında savunulan "AB'nin Yenilenebilir Enerji Politikasında Güneş'in Payı: Almanya-Türkiye Karşılaştırmalı Analiz" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

² This study is derived from the master's thesis titled 'The Role of Solar Energy in the EU's Renewable Energy Policy: A Comparative Analysis of Germany and Turkey,' defended in 2019 in the Department of European Union, Department of European Union, at Istanbul University.

status, it will be important for Turkey to establish economic stability and for agreements in the field of energy. In this study, it is examined the facts that prevent the use of solar energy in Turkey though Turkey has sunnier days than Germany in terms of climatic characteristics. It is investigated the reasons why Turkey cannot use the solar energy even though it is located in a bright region in comparison with Europe which is located in a dark area and how can use solar energy. It is also investigated Turkey's administrative, bureaucratic, technical, economic and political reasons why cannot use solar energy efficiently.

Keywords: EU Renewable Energy Policy, EU Solar Energy, Solar Energy of Germany and Turkey.

GİRİŞ

Günümüzde enerji politikalarının değerlendirilmesinde, enerjinin sanayileşme ve kalkınmanın temel unsuru olması sebebiyle kritik bir faktör olduğu vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde temin edilmesi ve üretim politikalarının sürekli olarak geliştirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Aslında enerji meselesinin, kaynakların dağılımı, hangi güçlerin kontrolünde olduğu ve planlamadan yatırımlara kadar uzanan ekonomik ve teknik yönleriyle ele alınarak tartışılması gerekmektedir. Dolayısıyla enerji meselesini sadece gelişmişlik ve kalkınma dinamiği içerisinde almak yanıltıcı olacaktır. Buna en büyük eleştiri küresel kapitalizmin liderlerine ve doğal kaynakları sömürülen gelişmemiş olan ülkelere doğrudan doğruya doğadan gelmektedir. 21.yüzyılda enerji kaynaklarının yönetimi uluslararası sermayenin isteklerine göre şekillendirilmiş ülke politikaları tarafından belirlenmektedir. Bu süreçte yaşanan krizlere, savaşlara ve işgallere müdahale edilerek arzın belirlenmesinde etkin rol oynanmaktadır. Ancak bu yönlendirmelerin etkileri ve enerji gereksiniminin sınırsız olup olmadığı gibi konular sorgulanmaktadır. Ayrıca enerjinin eşitsiz kullanımından sorumlu olanların neden olduğu aşırı tüketim gezegeni nasıl etkilediği de dikkate alınmalıdır. Kesin olan bir şey var ki, 21. yüzyılın ilk çeyreğinde küresel kapitalizm dünyayı ekolojik bir felaketin eşiğine getirmektedir. İnsanlık, şimdi tarihsel bir kavşakta bulunmaktadır.

İçinde bulunduğumuz dönemde ekolojik krizlerin derinleşmesiyle birlikte, AB iklim kriziyle mücadelede liderlik rolü üstlenmekte ve bu doğrultuda yenilikçi politikalar geliştirmektedir. İklim krizinin temelinde fosil yakıtların yoğun kullanımı yer almakta olup, AB'nin bu krize yönelik stratejileri, enerji arz güvenliğini sağlama ve dışa bağımlılığı azaltma hedefleriyle birlikte yenilenebilir enerji politikalarına olan ilgiyi artırmaktadır. Coğrafi konum itibarıyla güneş enerjisi potansiyeli sınırlı olan AB, özellikle Almanya örneğinde görüldüğü gibi, güneş enerjisinin etkin kullanımında dünya genelinde öncü konumda bulunmaktadır. Buna karşın, güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan Türkiye'nin bu kaynağı yeterince değerlendirememesi dikkat çekici bir durumdur. Bu çalışma, AB yenilenebilir enerji politikaları çerçevesinde güneş enerjisinin rolünü inceleyecek ve Almanya ile Türkiye'nin bu konudaki politikalarını karşılaştırmalı bir analizle değerlendirecektir. Bu bağlamda, çalışma ayrıca Türkiye'de güneş enerjisinin etkin bir şekilde kullanılmamasının temel nedenlerini araştırmayı da amaçlamaktadır.

Çalışmanın temel sorusu, “Avrupa, karanlık bir kıtada yer almasına rağmen neden güneş enerjisini Türkiye gibi aydınlık bir bölgede yer alan bir ülkeden daha etkin kullanmaktadır?” şeklindedir.

Altı sorular:

1. Türkiye, Almanya'dan daha fazla güneşli gün sayısına sahip olmasına rağmen güneş enerjisini neden daha etkin kullanmamaktadır?
2. Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanımını önleyen bürokratik, hukuki, teknik, ekonomik ve politik gerçekler nelerdir?

Çalışmanın konu, amaç ve soruları doğrultusunda oluşturan hipotezler; AB ve Almanya'nın iklim kriziyle mücadelede, enerji arz güvenliğini sağlamada ve dışa bağımlılığı azaltma hedefleri doğrultusunda güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını birer araç olarak kullanmaktadır. AB'nin yenilenebilir enerji politikalarının, yenilenebilir enerji kaynaklarının bilhassa güneş enerjisinin etkin kullanımının artışı ile uzun vadeli stratejilerin uygulanabilirliği arasında anlamlı bir ilişki kurulmuştur. Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanımını önleyen ekonomik, bürokratik, teknik, hukuksal ve politik nedenler bulunmaktadır.

Araştırmada nitel yöntem kullanılarak derinlemesine mülakatlar yapılmıştır. Mülakatlarda katılımcılar, rastlantısal örneklem yöntemiyle belirlenmiştir. Bu mülakatlar, Ankara, İzmir ve İstanbul'da gerçekleştirilmiş olup, on bürokrat, dokuz akademisyen, altı Sivil Toplum Kuruluşu (STK), iki büyük enerji şirketi ve beş Hükümet Dışı Örgüt (HDÖ) temsilcisi ile yapılmıştır. Ayrıca verilerin toplanmasında kullanılan kaynaklar

arasında, AB'nin resmi gazetesi Official Journal - EUR-Lex, AB istatistik kurumu Eurostat, yerli ve yabancı literatür taraması ve uluslararası ajansların istatistiksel verileri bulunmaktadır.

ARAŞTIRMA

İkinci Dünya Savaşı sonrasında bir araya gelen Avrupalı liderler, barışın sürdürülebilirliği açısından 1951 yılında Paris Antlaşması'nı imzalayarak Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu'nu kurup Birleşik Avrupa için ilk adımı atmışlardır. 1957 yılında ise Çelik sektörünün yanında o dönem için önemli olan enerji kaynaklarından kömür ve nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılmasının sağlanması adına Avrupa Atom Enerji Topluluğu'nun (EURATOM) kurulması gayesiyle bir araya gelmişlerdir. 1950'lerde kömür arzı boldu ve enerjinin %65'ini karşılamaktaydı, 1960'lı yıllarda ise petrol Avrupa pazarına girmişti. Petrolün ucuz olduğu ve dolayısıyla enerji arz güvenliğinin sağlandığı dönemde ulusal enerji politikasına gerek duyulmamaktaydı. Ancak, 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri arz güvenliği algısını ortadan kaldırmış, Avrupa Birliği alternatif enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek bu yönde politika geliştirmiştir (Moussis, 2004).

AB yenilenebilir enerji politikalarına 1997 yılında yayımlanan "Gelecek için Enerji: Enerjinin Yenilenebilir Kaynakları" başlıklı Beyaz Kitap ile başlamıştır. Bu belge, 1996 tarihli Yeşil Kitap'ı tamamlar nitelikte olup, o dönemde yenilenebilir kaynakların toplam enerji tüketimindeki payının yalnızca %6 olduğu tespit edilmiştir. Beyaz Kitap, karbon salımını ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasının önemini vurgulamış, 2010 yılı için spesifik hedefler belirlemiştir. Bu kapsamda 1 milyon fotovoltaik panelin yaygınlaştırılması ve güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin teşvik edilmesi gibi alt hedefler öne çıkmıştır (Euro-lex a, 1997). 1997 sonrası süreçte, yenilenebilir enerji kullanımı ve destekleme politikalarında önemli ilerlemeler sağlanmıştır. 2001/77/EC, 2003/96/EC ve 2009/28/EC sayılı Direktiflerle sürdürülebilir kalkınma, çevresel koruma, biyoyakıt kullanımının teşviki ve üye ülkelerin yenilenebilir enerji politikası oluşturma zorunluluğu gibi hedefler benimsenmiştir. Özellikle 2009 direktifi ile güneş enerjisine yönelik çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirilmiş ve bu mekanizmalar üye ülkelerin farklı potansiyellerine göre çeşitlendirilmiştir. 2003/96/EC sayılı Direktif, ulaşım sektöründe dizel ve benzin yerine biyoyakıtlar ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi, iklim değişikliğiyle ilgili yükümlülüklerin yerine getirilmesini ve çevrenin korunmasını amaçlamaktadır (Euro-lex b, 2003). 2009/28/EC sayılı Direktif ile üye ülkeler, ulusal yenilenebilir enerji eylem planı oluşturması zorunlu tutulmuştur. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji eylem planı çerçevesinde güneş enerjisi teşvik mekanizmaları geliştirilmiş ve bu düzenlemelerle yasal bağlayıcılık sağlanmıştır. Direktif, iklim değişikliği sözleşmesinde yer alan sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çerçevede, 2020 yılına kadar sera gazı emisyonlarının 1990 yılına kıyasla %20 oranında azaltılması, enerji verimliliğinin %20 artırılması ve biyoyakıtlar için en az %10'luk zorunlu hedeflerin belirlenmesi hedeflenmiştir (Euro-lex c, 2009). Dolayısıyla 2009 direktifinin etkisiyle üye ülkeler, ulusal yenilenebilir enerji planları doğrultusunda çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirmiştir.

AB, iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında 2011 yılında 2050 Yol Haritası'nı oluşturmuş ve 1990 seviyelerine kıyasla sera gazı emisyonlarını %80-95 oranında azaltmayı hedeflemiştir. Bu hedeflere ulaşmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerji verimliliğinin sağlanması öngörülmüştür. 2050 yılı itibarıyla yenilenebilir enerjinin nihai enerji tüketimindeki payının %55-75 arasında olması beklenmektedir (Euro-Lex d, 2012).

Ekim 2014'te Avrupa Konseyi, 2050 hedeflerine ulaşmak için ara hedefler belirlemiş; 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarının %40 azaltılması, yenilenebilir enerji oranının en az %27'ye çıkarılması, enerji tüketiminin %27 düşürülmesi ve elektrik bağlantı oranının %10'dan %15'e yükseltilmesi kararlaştırılmıştır (European Council a, 2014). 2015 Paris Anlaşması ile AB, 2020 sonrası küresel iklim değişikliği mücadelesi ve 2030 iklim ve enerji politikaları doğrultusunda bir iklim eylem planı hazırlamış, yenilenebilir enerji kaynaklarının bu mücadelede önemli katkı sağlayacağı vurgulanmıştır (Euro-Lex e, 2016).

2018 yılında Avrupa Komisyonu tarafından kabul edilen Yenilenebilir Enerji Direktifi ile 2030 yılına kadar AB genelinde enerji tüketiminin en az %32'sinin yenilenebilir kaynaklardan karşılanmasını hedeflemektedir. Aynı zamanda ulaşım sektöründe kullanılan yakıtların %14'ünün yenilenebilir kaynaklardan sağlanması öngörülmektedir. Direktif, biyoyakıt kullanımını artırırken sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler konusunda daha katı düzenlemeler getirmekte, yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımları ve teknolojik yenilikleri teşvik etmektedir. Altyapı yatırımları, enerji verimliliği ve inovasyon, güneş ve rüzgar enerjisi gibi kaynaklardan elde

edilen enerjinin etkin kullanımını hedeflerken, yenilenebilir enerji sertifikaları ve piyasaların iyileştirilmesi ile bu hedeflerin gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Direktif, AB'nin enerji güvenliğini artırmayı ve sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan stratejik bir adımdır (Euro- Lex g. 2018).

AB, 2019 yılında Paris Anlaşması'nın getirdiği yeşil dönüşüm sürecine yönelik olarak Avrupa Yeşil Mutabakatı'nı hayata geçirmiştir. AB bu stratejiyle enerji, ulaşım, tarım, ticaret ve daha birçok alanda köklü dönüşümü amaçlamaktadır. Aynı zamanda iklim kriziyle mücadelede küresel bir lider olmak isteyen AB, bu stratejiyle 2050 yılına kadar karbon nötr olmayı ve 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %55 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde enerji alanında temiz, ekonomik ve güvenli enerjiye erişim sağlamak gayesiyle hedefler belirlenmiştir. AB, enerji alanında temiz, ekonomik ve güvenli enerjiye erişim sağlama çerçevesinde 2030 ve 2050 iklim hedeflerine ulaşmak için enerji sisteminin karbonsuzlaştırılmasını önceliklendirmektedir. Enerji üretimi ve tüketimi, AB'nin sera gazı emisyonlarının %75'inden fazlasını oluşturduğundan, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliğinin artırılması kritik öneme sahiptir. Kömürün hızlı bir şekilde devreden çıkarılması, doğal gazın karbonsuzlaştırılması ve yenilenebilir kaynakların akıllı entegrasyonu hedeflenmektedir (Euro- Lex f, 2019). 2023 itibarıyla üye ülkelerin enerji ve iklim planlarını güncellemeleri beklenmektedir. Bu planlar, yeni iklim hedeflerini içermeli ve AB çapındaki enerji pazarının entegrasyonunu desteklemelidir. Yenilenebilir enerji maliyetlerinin düşüşü ve destek politikalarının etkili tasarımıyla, hane halkı üzerindeki ekonomik yük azaltılmıştır. Bölgesel iş birliği, açık deniz rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların yaygınlaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Enerji yoksulluğu ile mücadele kapsamında, hanelere yönelik finansman programlarıyla enerji maliyetlerinin azaltılması öngörülebilir. Ayrıca, enerji altyapısının akıllı şebekeler, hidrojen ağları ve karbon yakalama gibi teknolojilere uyumlu hale getirilmesi ve sınır ötesi iş birliğinin güçlendirilmesi öngörülmektedir. AB, temiz enerji dönüşümünü hızlandırarak güvenli, sürdürülebilir ve uygun fiyatlı enerji teminini sağlamayı amaçlamaktadır (Euro- Lex f, 2019).

2021 yılında AB, iklim kriziyle mücadele kapsamında Fit for 55 iklim eylem paketini hazırlamıştır. Paket AB'nin 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %55 oranında azaltmayı amaçlayan bir dizi politika ve önlem kapsamaktadır. Aynı zamanda paket, çevre dostu ve sürdürülebilir bir ekonomiye geçişi simgeleyen bir strateji olarak, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kaynakları, ulaşım, endüstri ve diğer sektörlerdeki reformları içermektedir. Bilhassa yenilenebilir enerji alanında AB, 2030 yılına kadar toplam enerji tüketiminin %40'ını yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda enerji dönüşümünü hızlandırarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmayı amaçlamaktadır. Öte taraftan, güneş enerjisi kullanımının artırılması da bu hedefler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinin elektrik üretimindeki payının artırılması ve özellikle binalarda yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca Fit for 55 paketi, bu hedeflere ulaşılmasını destekleyecek düzenlemeler, finansal destekler ve teşvikler de sunmaktadır. Bu şekilde, Avrupa'nın daha sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişinin sağlandığı söylenebilir (European Council b., 2024).

Avrupa Komisyonu, 2022 yılında REPowerEU planını sunmuştur. Bu plan, Rusya'nın Ukrayna'yı işgal etmesinin ardından Avrupa'nın enerji tedarikini çeşitlendirmeyi ve enerji bağımsızlığını arttırmayı amaçlamaktadır. REPowerEU, Avrupa'nın enerji dönüşümünü hızlandırmayı ve fosil yakıtlardan bağımsız bir enerji sistemi kurmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, plan ile 2030 yılı için yenilenebilir enerji hedefi %45 olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda güneş fotovoltaik kapasitesinin 2025 yılına kadar iki katına çıkarılmasını ve 2030 yılına kadar 600 GW'lık kapasiteye ulaşılmasını hedeflemektedir. Bunun yanı sıra, güneş enerjisinin kullanımını teşvik etmek için yeni binalara yönelik yasal düzenlemeler öngörülmektedir. Emisyon azaltımı konusunda ise, REPowerEU, Avrupa'nın 2030 yılına kadar net sera gazı emisyonlarını %55 oranında azaltma amacına hizmet eden Avrupa Yeşil Mutabakatı stratejilerini destekleyerek, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmayı planlamaktadır (European Commission, 2022).

AB 2022 yılında kabul ettiği Güneş Enerji Stratejisi ile güneş enerjisinin potansiyelini en verimli şekilde kullanmayı hedeflemektedir. Güneş enerji stratejisi, AB'nin enerji dönüşümünü hızlandırarak fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmayı ve enerji güvenliğini güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu strateji, özellikle güneş enerjisinin elektrik üretimindeki payını yükseltmeyi ve 2030 yılına kadar toplam kurulu kapasitesini iki katına çıkarmayı öngörmektedir. Öte yandan, binalarda ve çatılarda güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılması teşvik edilmekte, yeni binalarda güneş enerjisi sistemlerinin zorunlu hale getirilmesi planlanmaktadır. Güneş enerjisi projelerine yönelik finansal teşviklerin artırılması ve sanayi kapasitesinin güçlendirilmesi, stratejinin bir diğer önemli hedefidir. Teknolojik yeniliklerin teşvik edilmesi ve güneş enerjisi altyapısının geliştirilmesi için AB, güneş enerjisi alanındaki rekabetçiliğini artırmayı ve dışa bağımlılığını azaltmayı amaçlamaktadır.

Ayrıca, enerji depolama çözümleri ve entegre enerji sistemleri gibi alanlarda da yatırımlar yapılması gerektiği belirtilmektedir. Güneş enerji stratejisi, Avrupa'nın güneş enerjisini merkezi bir kaynak olarak kullanarak, iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamayı ve sürdürülebilir enerji sistemleri oluşturmayı hedeflemektedir (Euro- Lex ğ, 2022).

Almanya'da güneş enerjisi teknolojisinin gelişimi 1960'lı yıllarda başlamış, ancak 1986 Çernobil felaketi sonrasında çevre bilincinin artması ve nükleer enerjiye karşı muhalefetle ivme kazanmıştır. Sosyal Demokrat Parti ve Yeşiller'in öncülüğünde nükleer enerjiyi azaltma kararı alınmış, aynı zamanda fotovoltaik (PV) enerji sistemlerini teşvik etmek amacıyla dernekler kurulmuştur. 1991'de çıkarılan Yenilenebilir Enerji Kanunu ile yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin satın alınması zorunlu hale getirilmiştir. PV pazarını geliştirmek için 1989-1993 yılları arasında "1000 Çatı Programı," 1998-2003 döneminde ise federal düzeyde "100.000 Çatı Programı" uygulanmıştır. Eyalet yönetimleri de yenilenebilir enerjiye yönelik kendi teşvik programlarını geliştirmiştir (Dunford M. Vd, 2013).

Almanya'da yenilenebilir enerji kanunu Sosyal Demokratlar ve Yeşiller tarafından 2000'de yürürlüğe girmiştir (Ouitzow vd, 2016). Kanun, enerji arzını ekonomik, çevre dostu ve verimli hale getirmeyi hedeflemektedir. Uzun vadeli hedefler arasında, brüt elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji payının 2025'te %40-45'e, 2050'de ise %100'e yükseltilmesi yer almaktadır (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2017). Kanunun yürürlüğe girmesiyle birlikte güneş enerjisi başta olmak üzere diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik destek mekanizmaları devreye alınmıştır. Bu destekler, güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli ve yaygın bir şekilde kullanılmasını sağladığı, enerji üretiminde bu kaynakların rolünü arttırdığı şeklinde değerlendirilebilir.

2020'li yıllarda Almanya, Avrupa Birliği'nin Fit for 55 ve REPowerEU hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji yatırımlarını hızlandırmıştır. 2030'a kadar elektriğin %80'inin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması hedeflenmektedir. Rusya-Ukrayna savaşı sonrasında enerji güvenliği gündeme gelmiş ve güneş enerjisi yatırımlarına yönelik teşvikler artırılmıştır.

Türkiye, 2000 öncesinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik politikaları daha çok hidroelektrik kaynaklarla sınırlıyken güneş enerjisinin sınırlı araştırma ve pilot projelerle gündeme yer aldığı değerlendirilebilir. 2000'li yıllarda enerji sektöründeki liberalleşmeden kaynaklı Türkiye'de 2001 yılında Enerji Piyasası Denetim Kurulu (EPDK) kurulmuştur (EPDK, 2021). 2005 yılında yenilenebilir enerji kanunu yürürlüğe girmiştir. Kanunda teşvik mekanizması geliştirilmiş olup bütün yenilenebilir enerji kaynakları için 5-5,5 euro/cent eşit sabit fiyat garantisi verilmiştir. Ancak 2010 yılında yapılan düzenleme ile güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına daha yüksek sabit fiyat garantisi belirlenmiştir. Bu revizyon ile güneş enerjisine 13,3 \$/CENT sabit fiyat garantisi uygulanmıştır (Mevzuat Bilgi Sistemi, 2005). 2005 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kanunu ile güneş enerjisi yatırımları teşvik edilmiştir. Ancak, o dönemde güneş enerjisi ekipmanlarının yüksek maliyeti nedeniyle sağlanan teşvikler yeterli olmamış ve sektörde beklenen büyüme sağlanamamıştır. 2010 yılında yapılan yasal düzenlemeler ve teşvik mekanizmalarındaki revizyonlar sayesinde güneş enerjisi yatırımlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

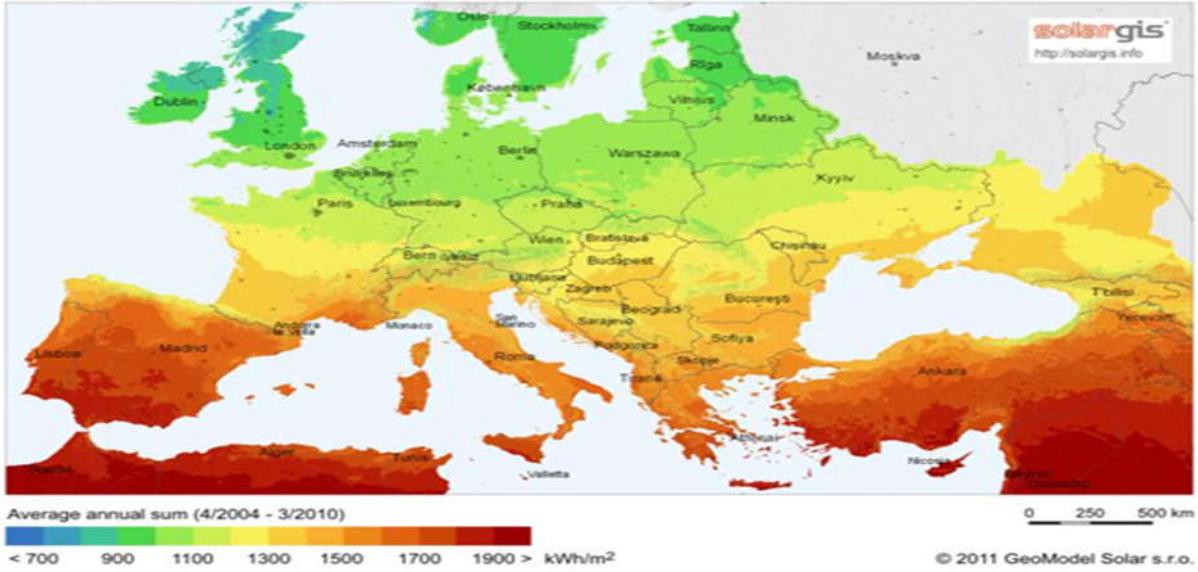
2021 yılında YEK belgeli yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar ve süreler ile fiyatların güncellenmesine ilişkin önemi düzenlemeler yapılmıştır. Bu doğrultuda yerli üretimin desteklenmesi, izin süreçlerinin kolaylaştırılması, yerli ve yenilenebilir enerji üretim kapasitesini artırmak için yenilenebilir enerji kaynak alanları ihalelerinin yeniden düzenlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleme mekanizması fiyatlarında döviz bazlı değil TL olarak teşviklerin verilmesi yapılan önemli düzenlemeler arasındadır. Bu bağlamda YEK destekleme mekanizması güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesisi 32,00 kuruş/kWh şeklinde düzenlenmiştir (Resmi Gazete, 2021).

Avrupa Birliği, Almanya ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları, özellikle güneş enerjisi politikaları ele alındıktan sonra, bu bölgelerin güneş enerjisi potansiyelleri harita üzerinde detaylı olarak incelenecektir. Sonrasında, durumu daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın güncel verileri ışığında, AB, Almanya ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji kapasitesi ve üretimi, özellikle güneş enerjisi verileri üzerinde bir analiz yapılacaktır.

Dünya Güneş Enerji Potansiyeli

Global horizontal irradiation

Europe



Kaynak: Dünyanın güneş enerji potansiyeli, www.google.com, 10.12.2024.

Dünya enerji potansiyeline bakıldığı zaman AB’de genelde m² başına düşen kWh 900-1500 arasında değiştiği görülmektedir. Haritada güneş enerji potansiyeli açısından Almanya’nın m² başına düşen kWh 900-1100 arasında değiştiği incelenmektedir. Türkiye’nin güneş enerji politikasına bakıldığında ise m² başına düşen kWh 1700-1900 arasında değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla Türkiye’nin hem AB hem de Almanya’dan daha fazla güneşli gün sayısına sahip olduğu haritadan anlaşılmaktadır.

Tablo:1 Toplam Yenilenebilir ve Güneş Enerji Kapasitesi

Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi										
CAP(MW)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Türkiye	27 940	31 516	34 446	38 746	42 230	44 389	49 195	53 175	55 946	58 462
Almanya	90 325	97 851	104 436	112 514	118 905	125 068	131 686	139 077	149 143	166 939
AB	352 718	371 257	388 080	405 786	423 435	451 019	479 820	516 882	575 557	640 449
Dünya	1 698 295	1 852 496	2 015 003	2 185 712	2 360 957	2 548 686	2 819 247	3 083 431	3 391 349	3 864 522
Toplam Güneş Enerji Kapasitesi										
Türkiye	41	250	834	3 422	5 064	5 996	6 668	7 817	9 426	11 293
Almanya	37 900	39 224	40 679	42 293	45 158	48 914	53 671	60 038	67 479	81 739
AB	83 982	88 090	91 901	96 644	104 442	120 615	138 868	165 145	206 075	257 190
Dünya	179 639	228 081	300 146	395 854	491 988	595 027	726 229	870 643	1 070 851	1 418 016

Kaynak: IRENA, “Renewable Energy Capacity Statistics 2024”, raporundan yararlanılarak araştırmacı tarafından hazırlanmıştır, (Çevrimiçi), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf, 5.12.2024.

Tablo 1’de, 2014 ile 2023 yılları arasında dünya, AB, Almanya ve Türkiye’ye ait toplam yenilenebilir ve güneş enerji kapasitesi verileri megavat (MW) cinsinden sunulmaktadır. Bu veriler doğrultusunda, incelenen her dört bölgede de 2014 ile 2023 yılları arasında hem yenilenebilir enerji kaynakları hem de güneş enerjisi kaynaklarındaki kapasite artışı gözlemlenmiştir. Oransal açıdan değerlendirildiğinde, 2023 yılı itibarıyla AB, dünya genelindeki toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin %16,57’sine sahiptir. Almanya, AB içindeki toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin %26’sını oluştururken, Türkiye, AB’nin yenilenebilir enerji kapasitesinin %9,1’ine katkıda bulunmaktadır. 2023 yılı itibarıyla güneş enerjisi kapasitesi bakımından, AB, dünya genelindeki toplam güneş enerjisi kapasitesinin %18’ini temsil etmektedir. AB içinde Almanya, toplam güneş enerjisi kapasitesinin %31,7’sine sahipken, Türkiye’nin, AB’nin güneş enerjisi kapasitesine %4,3 oranında sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2: Toplam Yenilenebilir ve Güneş Enerji Üretimi

Toplam Yenilenebilir Enerji Üretimi										
CAP(MW)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Türkiye	52 632	83 661	90 248	87 239	97 771	132 264	128 348	118 555	137 830	-
Almanya	162 526	188 785	189 672	216 323	222 075	240 332	251 481	233 638	251 087	-
AB	839 691	858 718	873 789	877 604	942 373	980 264	1 062 088	1 080 505	1 083 107	-
Dünya	5 304 340	5 512 471	5 869 293	6 237 087	6 633 769	6 994 086	7 458 042	7 872 657	7 872 657	-
Toplam Güneş Enerji Üretimi										
Türkiye	20	197	1 046	2 892	7 803	9 253	10 953	13 946	16 891	-
Almanya	36 056	38 726	38 098	39 401	43 459	44 383	49 496	50 472	60 304	-
AB	94 680	101 374	101 554	108 440	113 460	124 232	145 341	164 840	211 247	-
Dünya	192 602	252 269	324 797	437 515	560 039	689 902	835 685	1 030 571	1 293 481	-

Kaynak: IRENA, “Renewable Energy Capacity Statistics 2024”, raporundan yararlanılarak araştırmacı tarafından hazırlanmıştır, (Çevrimiçi), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf, 5.12.2024.

Tablo 2’de, 2014 ile 2022 yılları arasında dünya, AB, Almanya ve Türkiye’ye ait toplam yenilenebilir ve güneş enerji üretimi verileri megavat (MW) cinsinden sunulmaktadır. Bu veriler doğrultusunda, incelenen her dört bölgede de 2014 ile 2022 yılları arasında hem yenilenebilir enerji kaynakları hem de güneş enerjisi kaynaklarındaki üretim artışı gözlemlenmiştir. 2022 yılı verilerine göre, Avrupa Birliği (AB), dünya genelindeki toplam yenilenebilir enerji üretiminin %13,75’ini gerçekleştirmiştir. AB içerisinde Almanya, toplam yenilenebilir enerji üretiminin %23,18’ine katkı sağlarken, Türkiye bu oranın %12,8’ini karşılamaktadır. Güneş enerjisi üretimi açısından incelendiğinde ise AB, dünya genelindeki toplam güneş enerjisi üretiminin %16,3’ünü temsil etmektedir. Bu bağlamda Almanya, AB’nin toplam güneş enerjisi üretiminin %28,5’ine sahipken, Türkiye’nin %7,9’luk bir katkı sunmakta olduğu görülmektedir.

BULGULAR

Türkiye’nin hem Avrupa Birliği hem de Almanya’dan daha yüksek güneş enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen, toplam yenilenebilir enerji ve güneş enerjisi kapasite ve üretiminde etkin olmaması, üzerinde durulması gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanımına dair engellerin belirlenmesi amacıyla derinlemesine mülakatlar gerçekleştirilmiştir. Mülakatlar, Ankara, İstanbul ve İzmir gibi farklı bölgelerde yapılmış olup, bürokratlar, akademisyenler, Türkiye’nin iki büyük enerji şirketinin uzmanları, STK ve HDÖ temsilcileri olmak üzere toplamda 32 kişiyle yapılmıştır. Bu

görüşmeler neticesinde, Türkiye'nin güneş enerjisinden yeterince faydalanamamasının ardında bürokratik, hukuksal, teknik, ekonomik ve politik nedenlerin olduğu tespit edilmiştir.

Bürokratik nedenlere bakıldığında AB Bakanlığı enerji uzmanına göre, bir güneş enerji santralinin kurulumu esnasında birçok farklı kurumdan izin alınması ve her ilde farklı belgelerin istenilmesi güneş enerjisinin yaygınlaşmasını engellemektedir. Ayrıca, her kurum yenilenebilir enerji ve güneş enerjisi alanında farklı girişimlerde bulunmakta ancak yenilenebilir enerji ve güneş enerjisi alanında ulusal bir enerji birliği ajansının olmamasından dolayı kurumlarda gerçekleşen gelişimler yansıtılamamaktadır (AB Bakanlığı Enerji Uzmanı, 2018). Dolayısıyla sektördeki gelişmelerin bütünsel bir şekilde izlenmesi ve yönetilmesi açısından ulusal bir ajansın varlığı önemlidir.

EPDK'den, rüzgar ve güneş enerjisinde lisans işlemleri konusunda uzman bir bürokrat ile yapılan görüşmede, rüzgar ve güneş dayalı lisanslı projelerde yeterli kapasitenin açılmaması nedeniyle güneş enerjisi santrallerinin kurulamadığına dair bilgilere ulaşılmıştır. Ayrıca, Türkiye'nin en büyük arbulucu³ şirketlerinden birinin, ihaleleri kazanmasına rağmen projeleri gerçekleştirmemesi veya satması, sürecin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır. Bu durum, ilgili şirketlerin projeleri yapmamakta ve sadece satmakta olmalarından kaynaklanmaktadır. Görüşmenin devamında, genel olarak bürokrasinin lisanslı projelerdeki yavaşlık sebebinin, süreç hakkında yeterli bilgiye sahip olmamaları olduğu tespit edilmiştir. Bu eksiklik, bürokrasinin süreci bilmemesi ve bazen sürecin yavaşlamasına ya da bürokratik engellerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Lisanssız projelerde ise bürokratik engellerin, şirketlerden kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, "Regulatory Capture Theory" çerçevesinde, düzenlemelerin genellikle büyük şirketlerin veya belirli şirketlerin lehine yapıldığı ifade edilmiştir (EPDK Güneş enerji Uzmanı, 2018).

Yenilenebilir enerji genel müdürlüğünde görev yapan güneş enerji uzmanıyla yapılan görüşmede "yatırım sürecinde: kişilerin nereden hangi belgeleri alacağını taşıdığı belirsizlik, gereksiz belgelerin iptal edilmesi durumu, kurumlarda kişiye özel belge taleplerinin olması, ildeki belediyenin kurulum için izin verip, ilçedeki belediyenin izin vermemesi gibi sorunlar süreci dört ya da beş yıl uzatmaktadır. Diğer taraftan, süreci uzatmak adına kendi projelerine ÇED davası açan kişiler de bulunmaktadır. Dolayısıyla bahsedilen proje ile yatırım sürecinde yeknesaklığın sağlanması, sürecin net bir şekilde ortaya konulması ve bir yatırımın en fazla iki yıl sonra işletmeye girmesi hedeflenmeli, proje ile güneş enerjisine yatırım yapacak kişilerin evraklarının otomasyon⁴ şeklinde bir sisteme yüklenmesi, başvuruların bu sistem üzerinden yapılması güneş enerjisi yatırımlarının herkes için görülebilir kılacaktır" bilgisine ulaşılmıştır (YEGM A, 2018).

Güneş enerji alanında uzman bir bürokrat ile yapılan görüşmede, güneş enerjisinde bürokratik engellerin çok olmadığı ifade edilmiştir. Görüşmenin devamında henüz başlamayan ancak danışman firmalarla görüşmelerin yapıldığı "Yatırım Süreçlerinin İyileştirilmesi" projesinin bulunduğu bilgisi elde edilmiştir. Bu proje ile yenilenebilir kaynakların süreç analizinin yapılması amaçlanmaktadır. Böyle bir projenin olmasının bile aslında bürokratik engellerin var olduğu gerçeğini ortaya çıkardığı söylenebilir. Görüşmenin devamında, lisanslı projelerin yapılmamasındaki en büyük etkenin ekonomik olduğu belirtilmiştir. Lisanslı güneş enerji işletmelerinde ihalenin ilk defa yapılması birçok sıkıntı ortaya çıkarmıştır. Yarışmada MW başına katkı payı ödenmesi taahhüt edilmiştir ve çok yüksek fiyatlar ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla proje maliyetleri iki katına çıkmıştır. Devlete MW başına 3 milyon TL teklif eden projelerin çoğu mevcut durumda ön lisanstan da vazgeçmiştir. Bundan dolayı projeler fizibil değildir. Edinilen bilgiye göre projelerin yarısının iptal edilme ihtimalinin olduğu belirtilmiştir. Daha sonra yarışmanın şekil değiştirmesi ile kilovat saat başına azaltım verilmesine karar verilmiştir. Belirlenen tavan fiyat üzerinden en çok düşen kişiler yarışmayı kazanmaktadır (YEGM A, 2018).

A grubu enerji şirketinde yenilenebilir enerji alanında yönetici olarak görev yapan bir yetkili ile gerçekleştirilen görüşmede; güneş enerjisinin Türkiye'de etkin kullanılamamasının başlıca bürokratik nedeni olarak, kamu reel sektörünün teknolojinin hızlı gelişimine ayak uyduramaması olarak ifade edilmiştir. Görüşmede, Türkiye'de YEKA kapsamında 1000 MW kapasiteli ihalelerin gerçekleştirildiği, ancak lisanslı güneş enerjisi santralleri için 600 MW'lık ihale sonrası yeni bir yarışma yapılmadığı belirtilmiştir. Bu durumun, yatırımcıların lisanslı projelere yönelme isteğine rağmen, kamu tarafından yeterli kapasite açılmamasından kaynaklandığı ve yatırımları engellediği dile getirilmiştir. Ayrıca, güneş enerjisinin yaygınlaşmasının önündeki önemli

³ Görüşmede "çantacı" tabiri kullanıldı ancak ekonomik üsluba göre bu kavram kullanılamayacağı için "arbulucu" kelimesi kullanılmıştır. Çantacı: Devlet ile olan işlerin kolaylaştırılıp, ihalelerin nasıl yapıldığı konusunda uzmanlaşmış ve arbuluculuk yapan kişi ya da kuruluşlardır.

⁴ Otomasyon: E-devlet gibi bir sistem hatta daha sonra e-devlete entegre edilebilecek bir yapı amaçlanmaktadır.

engellerden birinin çatı mevzuatındaki eksiklikler olduğu vurgulanmıştır. Dünya genelinde güneş enerjisi projelerinin genellikle çatı uygulamalarıyla başladığı, ancak Türkiye’de bu alanda yeterli düzenlemenin bulunmadığı ve süreçlerin saha projeleriyle sınırlı kaldığı belirtilmiştir. Çatılarda büyük bir potansiyele rağmen, mevzuatın bu alanı tam anlamıyla desteklememesi, gelişimi olumsuz etkilemektedir. Bu durum, güneş enerjisi sektörünün Ar-Ge, ekonomik ve diğer alanlardaki ilerleme hızının, bürokrasiyi geride bırakmasından kaynaklanmaktadır. Kamu kurumlarının sektöre ayak uyduracak şekilde düzenlemeleri hızla gerçekleştirmesi gerektiği ifade edilmiştir. Görüşmede, Türkiye’nin güneş enerjisi alanına geç dahil olmasına rağmen, teknolojik ilerlemeyi avantaja çevirdiği de vurgulanmıştır. Örneğin, Almanya’da yenilenebilir enerji yasasının çıktığı dönemde, güneş panellerinin 1 vatlık maliyetinin 5 Euro olduğu, ancak günümüzde bu maliyetin onda birine düştüğü ve verimlilik oranlarının arttığı ifade edilmiştir. Avrupa ve Almanya, güneş enerji teknolojisinin Ar-Ge çalışmalarını yaparak ve finansman sağlayarak teknolojinin gelişimine katkıda bulunmuştur. Bu gelişmeler sayesinde, güneş enerji maliyetlerinde önemli düşüşler yaşanmıştır ve Türkiye, teknolojinin bu olgun dönemini yakalayarak süreçte yer almıştır. Son olarak görüşmede, reel sektörün güneş enerjisini teknolojik anlamda ciddi şekilde geliştirmiş olmasına rağmen, Türkiye’de 10 yıl önce düzenlenen kanunların mevcut sektör ihtiyaçlarıyla örtüşmediği vurgulanmıştır. Kamunun, teknolojik gelişmeleri dikkate alarak güncel düzenlemeler yapması ve güneş enerjisine katkıda bulunması gerektiği sonucuna varılmıştır (A Grubu Enerji Şirketi, 2018).

B Grubu Enerji Şirketi yöneticisi ile yapılan görüşmede, güneş enerji yatırımlarının izin süreçlerinde bürokratik sorunlarla karşılaştığı bilgisi alınmıştır. Güneş enerjisinde yeni teknolojik gelişmeler olduğundan mevzuat arkadan gelmektedir. Devlet bürokrasisi yaşanan gelişmelere tam uyum sağlayamamaktadır. Dolayısıyla bürokrasi güneş enerji yatırım süreçlerini uzatmaktadır. Görüşmede Türkiye’de güneş enerjisinin yaygın kullanılmamasının temel sıkıntısının kapasite arzı olduğu vurgulandı. Ne kadar çok kapasite arz edilirse o kadar güneş enerjisi kullanımı olacaktır. İkincisi, lisanslı olarak tahsis edilmiş projelerin tamamlanmamasından kaynaklanmaktadır. Bürokratik sorunlardan dolayı projeler bitmemektedir. Bir projenin inşaata başlaması için imar sürecinde otuzdan fazla kurumdan görüş alınmaktadır. Ayrıca, yatırım sürecinde bazı izinlerin alınmaması ya da belli şartlar dahilinde alınması bürokratik nedenlerdir. Diğer taraftan projelerin arabulucular tarafından alınıp elden ele gezdirilmesi, satılması ve gerçekleştirilememesi sebebiyle projeler nihai yatırımcıya ulaşamadığı ya da geç ulaştığı için yatırım geç yapılmaktadır (B Grubu Enerji Şirketi, 2018).

Enerji ve kimya alanında uzman bir akademisyene göre, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanılmaması devlet mekanizmasının yavaş ve ağır ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Kurumların birbirleriyle iletişimi zayıftır ve kurumlar takım halinde hareket etmemektedir. Türkiye’de inşaat kooperatifleri haricinde teknolojik ve sanayi kooperatiflerinin oluşması mümkün değildir. Firmalar ayrı ayrı çalışarak kazanç elde etmektedirler. Hâlbuki güneş enerjisinde de kooperatifler oluşturulup o yönde strateji geliştirilmiş olsaydı yaygınlaşması daha kolay olacaktı. Yatırım ortaklığı modelinin geliştirilmesi ile güneş enerjinin daha etkin kullanılabileceği ifade edilmektedir (Akademisyen A, 2018).

Güneş enerji enstitüsünde yenilenebilir enerji sistemleri alanında teknolojik çalışmalar yapan bir akademisyene göre, YEK kanununun ilk çıktığı 2005-2008 dönemlerinde lobiler bürokrasiye bazı rakamları kabul ettirmek istemiştir. Kamu yararı açısından bakıldığında güneş enerjisini ve diğer YEK’leri teşvik etmek için çıkan rakamlar, doların o dönemki pozisyonuna göre teşvik edici değildi. YEK Kanunu tek başına yeterli değildi, aynı zamanda alt yapının da güneş enerjisini desteklemesi gerekmekteydi. Dolayısıyla ekonomik ve politik engellerin yanında bürokratik engellerin daha az olduğu ifade edilmiştir (Akademisyen B, 2018).

PV kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalar yapan bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanılmamasının bürokratik engellerinden birinin ilgili yasal mevzuatın geç çıkması olduğu ifade edilmiştir. Mevzuat oluştuktan sonra da özellikle lisanssız santrallerin kurulumu aşamasında bürokrasinin daha da hafiflemesi gerekmektedir. Bürokrasi fazlalığının yanında teknik olarak kapasitenin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bilhassa çatı uygulamalarının kullanımının kolaylaştırılması gerekmektedir. Dağıtım şirketleri, lisanslı ve lisanssız güneş enerji santrali kurulumunda lisanslıya göre lisanssız kurulum daha kolay olmasına rağmen trafo potansiyelinden kaynaklı izin vermemektedir. Genel olarak kapasiteler dolduğundan dolayı kurulum ya gecikmekte ya da yapılamamaktadır. Dolayısıyla kapasitelerin güçlendirilip sürecin kolaylaştırılması gerekmektedir. Üçüncü büyük handikap ise fotovoltaik özelinde yani yurt dışında üretilen modüllerin gümrük süreçlerinin zor olmasından kaynaklanmaktadır. Yurtdışından Türkiye’ye getirilen modüller için alınan vergilerin yüksek olması süreci olumsuz etkilemektedir. Bu durum uluslararası rekabeti bozduğundan dolayı yerli üretim desteklenmemektedir. Yerli üretim yapanlara ya da yurtdışındaki büyük

firmalara Türkiye'ye yatırım yapacak şekilde teşvikler verilmelidir. Ayrıca yerli üretimde bazı testler sonucu birtakım sıkıntılar ortaya çıktığından dolayı genel kalitenin düşme riski bulunmaktadır. (Akademisyen C, 2018).

Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanımı için devlet bilincinin oluşması ve daha sonra da bu yönde kanun düzenlemelerinin yapılması gerekmektedir. Almanya'da güneş enerjisinin devlete satılmasından kâr elde ediliyorken Türkiye'de bu mümkün değildir. Dolayısıyla güneş enerjisi etkin kullanılamamaktadır. Ayrıca, Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanımı açısından kanun düzenlemeleri ile bürokrasinin ortadan kaldırılması gerektiği vurgulanmıştır. Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanıma yöntemlerinden bir başkası da binaların enerji kimliği uygulamasının başlatılmasıdır. Mevcut durumda, enerji kimliğine uygun olmayan birçok bina olduğundan dolayı kentsel dönüşümün sağlanması gerekecektir. Yurt dışında enerji kimliği uygulaması bulunmayan evlere; kiraya verilememesi, elektriği bağlatamama ve yüksek düzeyde vergilendirmeye maruz bırakılma gibi yaptırımlar uygulanmaktadır. Bu faktörler Türkiye'de kanuni düzenlemeler ile teşvikler verilerek geliştirilmelidir. Enerji kimliği uygulaması ve güneş enerjisinin etkin kullanılabilmesi için bunlar devlet politikası haline getirilmelidir (Akademisyen D, 2018).

Güneş ısı sistemlerinde uzman bir başka akademisyen ile yapılan görüşmede, bürokratik engelin olmadığı ifade edilmiştir. Güneş enerjisi konusunda teşvik sistemi farklı çıkar gruplarının hâkimiyetinde bulunmaktadır. Dolayısıyla teşvik doğru kişilere verilmemektedir. Yatırım yapmak isteyen sanayici problemler karşısında geçici çözümler bulmaktadır. Ayrıca, Türkiye dünyada ısı güneş enerji sistemleri konusunda ilk sıralarda yer almasına rağmen kişi başına tüketimde ilk on sırada yer alamamaktadır. Bu da bürokrasiyi yanılttığı için aslında ısı güneş enerjisi tarafına da teşvikin verilmesi gerektiği belirtilmiştir (Akademisyen E, 2018).

GENSED temsilcisi ile yapılan görüşmede, güneş enerjisinin etkin kullanılamamasının nedeni mevzuattaki eksikliklerle açıklanmıştır. Mevzuata göre çatıya kurulacak 2-3 kilovatlık bir panelin kurulumu 4 buçuk ya da 5 ayı almaktadır. Bunun kolaylaştırılması için gelir vergisinden muafiyet ve proje çizimlerinde kolaylık gibi düzenlemeler yapılmış ancak başvuru süreci hala 2-3 aylık bir süreci aldığı açıklanmıştır. Ayrıca çatılardaki gelişimin hızlanabilmesi için YEK kanununda değişikliğe ihtiyaç vardır. Kanun değişikliği ile tek bir A4 kâğıdıyla başvuru yapıp 3-5 gün içinde kurulumun gerçekleşmesi mümkün olmalıdır. Ayrıca, kişilere mikro krediler verilmelidir. Çatıya kurulan sistem elektrik faturası öder gibi her ay 100-200 TL elektrik faturası ödeyerek 10 yılda tamamlanacak şekilde planlanırsa güneş enerjisi tüm çatılara yaygınlaştırılabilir. Mikro kredi için hem hazinenin hem de ilgili bankaların ortak bir portföy hazırlaması gerekmektedir. Çatı haricinde arazide lisanslı ve lisanssız kurulum uygulanmaktadır. Ancak arazilerde lisanssız kurulum artık izin verilmemektedir. Çünkü onaylanan 6500 MW'lık projenin 4000'i devreye girebilmiş, 2000-2500 MW'ı ise hala yapılamamıştır. Lisanslı sektörün gelişmesi için ilgili bakanlığın ve EPDK'nın trafo kapasitelerini güçlendirmesi gerekmektedir. Lisanslı taraf için minimum 2-3 GW yeni kapasite ilaveleri yapılmalıdır. Ayrıca güneş enerjisinin yatırım maliyetleri değiştiğinden dolayı verilen teşviklerde de değişikliklere gidilmelidir. Teşvikler öz tüketim modeli şeklinde olmalıdır. YEKDEM'e fazla yük oluşturulmadan, yatırımcıların hızlı ve aynı zamanda kolay şekilde yatırım yapmasının önünü açacak düzenlemelere ihtiyaç vardır. Türkiye her yıl 2 GW iş potansiyeline ihtiyaç duyduğundan bu öz tüketim modeli sektördeki yatırımcıların önünü görmesi açısından da önemlidir. YEKA yarışmalarında finans, mevcut şebeke yapısı, teknik gereklilikler ve mevcut kanunlar çerçevesinde yapılan düzenlemeler yapılmıştır. Ancak bu düzeltmelere rağmen bürokratik işlemlerin fazla olmasından dolayı yarışmanın yapılması 2, 2 buçuk yılı almıştır. Lisans başvurusundan önce ön lisansın alımında imarı çıkartma işlemi için 20-25 kurumdan izin alınmaktadır. İzinleri tamamlamak 1,5 yıl sürmektedir. Ayrıca güneş enerjisi su ısıtma sistemlerinin yaygınlaşmasındaki en büyük etken hiçbir mevzuat ya da kanuna bağlı kalmadan her isteyen kurabilmesi olmuştur. Diğer taraftan, yurtdışında internette doldurulan formlarla sorumluluk, kuran firma ya da yatırım yapan kişiye verilmektedir. Bürokrasi bu şekilde ortadan kaldırılmaktadır. Herhangi bir soruna karşı sistemi kuran sorumluluğu almaktadır. Türkiye'de de buna benzer bir sistem kurulmalıdır. Sonuç olarak Türkiye'de güneş enerjisi kurulumu açısından mevcut şebeke yapısı, finans, teknik gereklilikler ve kanunlar çerçevesinde yapılan yarışma da dahi 2-2,5 yıl geçmektedir. Bu sürecin hızlandırılması güneş enerjisinin etkin kullanımını arttıracaktır (STK A, 2018).

GÜNDER temsilcisi ile yapılan görüşmede, "bürokratik süreçlerin fazla olmasından dolayı güneş santralinin 1 ila 1 buçuk yılda kurulduğu bilgisi alınmıştır. Diğer taraftan, çatıya kurulacak bir panel kurulum maliyeti kadar başvuru ücreti yatırılmaktadır. Bu maliyet kendini 12-13 yılda amorti ettiğinden dolayı çok fazladır. Burada ya alış fiyatları arttırılarak ya da başvuru ücretleri alınmayarak amorti süresi 5-6 yıla indirilmelidir. Araziye 1 milyon dolar değerinde 1 MW'lık kurulum yapan kişi ile çatısına 1 KW kurulum yapan kişi aynı prosedüre tabi tutulmaktadır. Bakanlık bu noktada çalışmalar yapmaktadır. Çıkan torba yasa ile başlangıçtaki

evrakların azaltılması, sadece nüfus cüzdanı ile başvurunun yapılması, KDV ve gelir vergisinin kalkması aynı zamanda beyanname verme yükümlülüğünün olmaması gibi olumlu gelişmeler yaşandı ancak daha da yapılması gereken düzenlemeler bulunmaktadır.” Yapılan görüşmenin devamında, “Avrupa ile karşılaştırıldığında Türkiye’de güneş enerjisinin kurulumunda geç kalmıştır. Avrupa’da güneş enerji kurulumunun yüksek olmasının sebebi verilen desteklerin yüksek olmasıdır. Almanya güneş enerji kurulumuna ilk başladığında FIT 50 Euro/Cent iken Türkiye’de günümüzde 10 Euro/Cent miktarındadır. Verilen teşviklerin Türkiye’den fazla olması sonucu Avrupa’da ve Almanya’da kurulu güç daha fazladır. Türkiye’nin kurulu gücünün fazla olabilmesi için daha fazla teşvik verilmesi gerekmektedir. Türkiye’nin Avrupa’dan Almanya’dan yedi sekiz yıl geç gelmesinin sebebi mevzuatın olmamasıdır. Mevzuatın yayınlanması tek başına yetmemektedir. Çünkü Avrupa’daki sistem daha gelişmiş akıllı şebeke iletim hatlarına sahiptir. Türkiye’de de 2023 yılına kadar bütün hatlar yenilenebilir enerjiyi kaldırabilecek akıllı şebeke haline alması gerektiği vurgulanmıştır (STK B, 2018).

YDD yönetim kurulu üyesi ile yapılan görüşmede: “Türkiye’de çatıya kurulacak bir güneş enerjisi tesisi için birçok kurumdan izin alma gerekliliğinin olması hem süreci uzatmakta hem de maliyeti arttırmaktadır. Dolayısı ile insanlar böyle bir süreci yaşamak istememektedir. (Bu süreci yaşamak istemeyen yatırımcılar, güneş enerjisi yatırımlarından kaçınmaktadır.) Türkiye’de güneş enerji kurulumu bakımından hem büyük yatırımcı hem küçük yatırımcı hem de çatısına kurulum yapacak kişiler bürokratik olarak izleyecekleri belli bir yol haritasının olmaması sebebiyle sektöre girmemektedir. Ayrıca, Türkiye’de insanların güneş enerjisini örgütlü yani kooperatif gibi tabandan talep etmesi gerekmektedir. Öte taraftan kamu çalışanlarının da güneş enerjisi hakkında eğitilmesi gerekmektedir. Güneş enerji teknolojisi çok hızlı geliştiğinden dolayı kamu buna ayak uyduramamaktadır. Bürokraside bilinçsiz olarak koyulan engellerin yanında bilinçli olarak koyulan engeller de bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse, güneş enerji santralinin kurulumu için şirketler Türkiye’nin güneş enerji atlası olmasına rağmen tekrardan ölçüm yapmak durumundadır” (STK E, 2019).

Türkiye’de 2005 yılında verilen teşvik güneş enerji maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı yeterli değildi ve etkin bir şekilde kullanılmadı. O dönemde teknolojinin gelişmemesinden kaynaklı ekipman verimliliğinin az olması, maliyetlerin yüksek olması, nereye nasıl başvuru yapılacağına bilinmemesi ve mevzuatın olmaması gibi etkenler güneş enerjisinin etkin kullanımını engellemiştir. Lisanslı tarafta EPDK’nın kapasite açması gerekmektedir. Lisanssız elektrik üretim kapasitesi ise ilk defa enerji verimliliği kanunda 200 kW olarak geçmektedir. Ancak alt mevzuatın net olmamasından dolayı gelişim sağlanamamıştır. 2011 yılında çıkan lisanssız kurulumla yönelik Yönetmelik ile ilk başlarda 500 Kw daha sonra 1 MW kapasitesinde üretimlere izin verilmiştir. Lisanssız tarafta yönetmelik arkasından tebliğ çıkmış, başvurular alınmış ancak birçok sıkıntı da oluşmuştur. Bilhassa 2013-2014 döneminde güneş enerji yatırımcısının sahada imar sürecinde, ÇED sürecinde ve Tarım Bakanlığında alınan marjinal belgeler sürecinde; EPDK yönetmeliğinde yazılan belgeler hakkında bilgisi bulunmamaktadır. Güneş enerjisi yatırımcıları kurumlarda çalışan kişilere belgeler hakkında bilgi vermek zorunda kalmıştır. Ayrıca dağıtım şirketleri de bu konu hakkında o dönemde bilgi sahibi değildi. 2016 yılında süreç biraz daha iyileşmişken günümüzde trafo merkezlerinde kapasiteler genel olarak dolmuş durumdadır (HDÖ A, 2018).

2020 yılından sonra Türkiye’de YEKDEM üzerine çalışmalar yapan ve YEK konusunda yatırımcılara danışmanlık yapan bir Avukat ile yapılan görüşmede, Türkiye’de bürokrasinin YEK’ler konusunda daha cesaretli olması gerektiği vurgulanmıştır. “Günümüzde bürokrasi hükümetin istekleri doğrultusunda şekil aldığından dolayı farklı bir noktaya dikkat çekmek çok mümkün olmamaktadır. Hükümet, yenilenebilir enerjide çok yatırımcı olmasına rağmen kömür yatırımcısı gibi daha güçlü yatırımcıyı desteklemektedir” (HDÖ B, 2018).

Hukuksal nedenlere birçok farklı görüş elde edilmişti. Bürokratlardan genel olarak hukuki nedenler hakkında bilgi elde edilememiştir. Ancak yapılan doğal gaz antlaşmaları hakkında çeşitli düşüncelere ulaşılmıştır.

Enerji alanında uzman bürokratla yapılan görüşmede, doğalgaz antlaşmalarının güneş enerjisine geçişte engel oluşturma ihtimali üzerine konuşulmuştur. Uzmanlar “yenilenebilir enerji ne kadar arttırılmak istense de doğalgaz kullanımı devam edecektir. YEK artarak ilerlese de doğalgazın tükeneceği öngörüsünde bulunulamaz” ifadelerini kullandı. Ayrıca, “yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’nin enerji arz güvenliği açısından da önemli olduğu” belirtilmiştir. (AB Bakanlığı Enerji Uzmanı, 2018).

Bir bürokrat ile gerçekleştirilen görüşmede, doğal gaz antlaşmalarının Türkiye’de güneş enerjisine geçiş sürecinde engel teşkil etmediği ifade edilmiştir. Özellikle sanayi elektriği üretiminde kullanılan doğal gaz, enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından stratejik bir öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte,

elektrik üretiminde güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, fosil yakıtlara yönelik bir baskı oluşturmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının büyümesiyle birlikte yeni doğal gaz ve petrol anlaşmalarının yapılmasını kısıtlayabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artışı, fosil kaynakların kullanımını azaltarak bu alanda dönüşümü teşvik etmektedir. Görüşmede, yenilenebilir enerji ve doğal gaz kullanım oranlarının aşamalı olarak değişeceği belirtilmiştir. İlk aşamada, enerji üretiminde %60 doğal gaz ve %40 yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması öngörülmektedir. Zamanla bu oranların %50'ye %50 olacak şekilde dengeleneceği ifade edilmiştir. Bu süreç, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payı ile birlikte fosil yakıt bağımlılığının kademeli olarak azaltılmasını hedeflemektedir (YEGM B, 2018).

Güneş enerjisi konusunda uzman bir bürokratla yapılan görüşmede, geçmişte doğal gaz ve petrol anlaşmalarının güneş enerjisine geçişte bir engel teşkil ettiği, ancak günümüzde bu durumun ortadan kalktığı belirtilmiştir. Küresel düzeyde yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaştığı, yeni ikili anlaşmalarda yenilenebilir enerji alanında iş birliği maddelerinin yer aldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, büyük petrol şirketlerinin giderek rüzgâr ve güneş enerjisi projelerine yöneldiği vurgulanmıştır (YEGM A, 2018).

Enerji uzmanına göre Türkiye'de güneş yatırımcısının en çok zorluk yaşadığı nokta regülasyonların ve yönetmeliklerin çok sık değişmesidir. Bu değişikliklerden dolayı yabancı yatırımcının ilgisi önceki yıllara göre azalmıştır (A Grubu Enerji Şirketi, 2018). Bir başka şirket yöneticisi ile yapılan görüşmede, "Türkiye'de mevzuat ihtiyaca göre şekil aldığından dolayı güneş enerjisinin etkin kullanımını önleyen hukuksal neden yoktur. Ayrıca, Türkiye'de doğalgaz ve petrol antlaşmaları güneş enerjisine geçişi geciktirebilir ama engel oluşturmamaktadır. Güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjiler global olarak geliştiğinden Türkiye'nin antlaşmaları güneş sektörünü olumsuz etkilememektedir" (B Grubu Enerji Şirketi, 2018).

Enerji ve kimya alanında uzman akademisyen ile yapılan görüşmeye göre, Türkiye enerjisinin %78-80'nini dışardan sağladığından dolayı enerji güvenliği bakımından uzun vadeli antlaşmalar yapılmalıdır. Bundan dolayı doğal gaz ve petrol antlaşmaları güneş enerjisine geçişte engel oluşturmamaktadır. Türkiye'de yenilenebilir enerjiler ve fosil enerji kaynakları birbirinin alternatifi olamaz. Ancak enerji güvenliği bakımından enerji çeşitliliğinin olması gerekmektedir. Türkiye elektriğini doğalgazdan ürettiği için enerji antlaşmaları yapmak zorundadır. Enerji çeşitliliğinin artırılabilmesi bakımından güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjiler önem arz etmektedir (Akademisyen A, 2018).

Güneş enerji enstitüsünden bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye'de hukuki, siyasi ve ekonomik güvenliğin olmaması sebebiyle güneş enerji sektöründe yatırımcının yatırım yapmaktan çekindiği hususu bir kez daha dile getirilmiştir. "Türkiye güneş enerji sektöründe liberal ekonomi içerisinde yer alıp uluslararası yatırımcılar için hukuki güven ortamı sağlar ise büyüme ona bağlı olarak stabil bir şekilde gerçekleşecektir. Aksi takdirde ikili ilişkilere dönen işler güneş enerji sektörünün önünde engel oluşturacaktır" (Akademisyen B, 2018).

Güneş enerjisinde uzaman bir akademisyene göre hukuki açıdan, yenilenebilir enerji kanununun ardından yönetmeliklerin geç çıkarılması ve TEDAŞ gibi kurumlarda bürokratik süreçlerin yavaş işlemesi, güneş enerjisinin etkin kullanımını sınırlamıştır. Ayrıca, enerji arz güvenliğinde doğal gazın öncelikli konumda olması güneş enerjisinin gelişimini gölgede bırakmaktadır. Uluslararası uzun vadeli anlaşmaların, yenilenebilir enerji politikalarının gelişimini sınırlandırdığı; güneş enerjisi teknolojisinin yerelleştirilmesi ve elektrik üretiminde ticarileştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Enerji çeşitliliği sağlanmalı ve güneş enerjisinin daha etkin kullanımı için hukuki, ekonomik ve stratejik düzenlemelere ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir (Akademisyen C, 2018).

İstanbul Politikalar Merkezinde kıdemli uzman olarak çalışan aynı zamanda iklim değişikliği alanında çalışmalar yapan bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye'nin doğalgaz antlaşmaları ve Rusya ile yapılan nükleer antlaşmaların güneş enerjisine geçişte engel oluşturduğu ifade edilmiştir. Diğer taraftan, Paris Antlaşması ve Kyoto Protokolü güneş enerjisine ve diğer yenilenebilir enerjilere geçişte engel oluşturmamakta, aksine bunları desteklediği vurgulanmıştır (Akademisyen F, 2018).

Yenilenebilir enerji alanında uzman bir akademisyen ile yapılan görüşmede milletlerarası antlaşmaların kömür, nükleer, petrol kaynaklı yapılmasının güneş enerjisine ve diğer yenilenebilir enerjilere geçişte engel oluşturduğu ve geçiş sürecinin sürekli ertelenmesine sebep olduğu ifade edilmiştir. Başka bir ifadeyle, Türkiye'nin imzaladığı fosil kaynaklı antlaşmalar güneş enerjisine geçişte engel oluşturmaktadır. Diğer yandan, Kyoto ve Paris antlaşması güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjilerle işbirliği yaptığından dolayı engel oluşturmamaktadır (Akademisyen G, 2018).

STK yöneticisi ile yapılan görüşmeye göre Türkiye'nin imzaladığı doğalgaz antlaşmaları, alım-satım antlaşmaları olduğundan dolayı güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjilere geçişte engel oluşturmaktadır. “Uzun vadeli antlaşmalar yerine kısa vadeli enerji antlaşmaları imzalamak gerekir. Güneş enerjisi doğalgaz antlaşmalarının yapıldığı dönemde maliyet olarak pahalıydı ancak günümüzde maliyetler azaldığından dolayı rahatlıkla yapılabilir. Gelecek 5 yıl içinde bilhassa güneş ve rüzgârda teknolojinin ilerlemesi ile depolama maliyetlerinde azalma olacağından dolayı doğal gaz ve petrol lobisi güneşe engel olamayacaktır. BP, SHELL gibi büyük fosil enerji şirketleri de yavaş yavaş yenilenebilir enerji kaynaklarına dönecektir. Çünkü petrol gittikçe azalacak ve depolamadaki gelişmelerle elektrikli araçlar çok hızlı yaygınlaşacaktır. Türkiye’de şebekenin yetersiz olmasından dolayı bütün arabaların sadece yarısı elektrikli olsa dahi maalesef bunlar aynı anda şarj edilemez” (STK A, 2018).

Bir başka STK temsilcisi ile yapılan görüşmede “Türkiye’de her ne kadar doğal gaz antlaşmalarında alım garantisi bulunsa da sürdürülebilir olmadığından dolayı güneş enerjisine ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişte engel oluşturmayacaktır. Türkiye’de güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının payı arttığından dolayı fosil kaynaklı antlaşmalara gerek kalmayacaktır” (STK B, 2018).

EUROSOLAR Türkiye temsilcisi ile yapılan görüşmede, “Türkiye’de doğalgaz ve petrol antlaşmalarında alım zorunluluğu bulunduğundan dolayı güneş enerjisine geçişte engel oluşturduğu ifade edilmiştir. Günümüzde doğal gaz şirketlerinin bir kısmı kapanmakta bir kısmı emre amade şeklinde bekletilmekte bir kısmı da Afrika’ya taşınmaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmelerle beraber güneş enerjisi doğal gazdan daha ucuza elektrik üretmektedir. Dolayısı ile güneş enerjisinin fosil enerji kaynakları ile rekabet edebilir durumun da ötesine geçtiği görülmektedir” (STK F, 2019).

Hükümet dışı örgüt temsilcisiyle yapılan görüşmede Türkiye’de güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımının önündeki en büyük engelin hukuk güvenliği eksikliği olduğu belirtilmiştir. Özellikle yabancı yatırımcıların öngörülebilir bir hukuk düzenine ihtiyaç duyduğu, ancak yönetmeliklerin ve teşviklerin sürekli değişmesi ile ihalelerdeki şeffaflık eksikliği nedeniyle bu yatırımların yeterince çekilemediği ifade edilmektedir. Sermaye Piyasası Kurumu’nun hukuki düzenlemelerle yenilenebilir enerji yatırımlarında ortaklık modelleri geliştirmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, öz tüketime yönelik teşviklerin, bölgesel teşviklerden daha etkili olduğu belirtilmiştir. Doğalgaz anlaşmalarındaki "al ya da öde" şartının enerji dönüşümünü zorlaştırdığı ifade edilirken, önümüzdeki yıllarda bu piyasanın liberalleşmesiyle bu engelin ortadan kalkacağı öngörülmektedir. Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması’nın yenilenebilir enerjiye geçişi desteklediği ve gelecek dönemde güneş enerjisinin yaygınlaşmasının mümkün olduğu değerlendirilmiştir (Hükümet Dışı Örgütler D, 2019).

Teknik nedenler açısından bakıldığında birçok nedenin farklı kişiler tarafından değerlendirildiği görülmektedir. Bu bağlamda AB Bakanlığı enerji uzmanları ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanımını engelleyen teknik neden; trafolarda kapasitenin artırılması açısından TEİAŞ’ın elektrik üretim sistemini modernize etmesi olarak açıklanmıştır (AB Bakanlığı Enerji Uzmanı, 2018).

YEGM’ den bir bürokrat ile yapılan görüşmede elde edilen bilgilere göre, “Türkiye’de güneş enerjisi son üç senedir etkin olarak kullanılmaya başlamıştır. Türkiye’de güneş enerjisi toplam kurulu gücün %5’ini oluşturmaktadır. Almanya 30 yıldır PV ürettiğinden dolayı güneş enerjisinde küresel güçlerden bir tanesi olmuştur. Güneş enerjisinde, teknolojinin çok hızlı değişmesinden dolayı Türkiye’nin avantajlı durumda olduğunu söylemek mümkündür. Çünkü 10 sene önce üretilen PV’ lerde %10 oranında verim sağlanıyor iken günümüzde bu oran %21’e yükselmiştir. Bu bağlamda Türkiye’de güneş enerjisi yatırımlarının şimdiden sonra yapılacak olması bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Türkiye ekonomisinde son 10 yılda gerçekleşen gelişmelerin ardından günümüzde yurt içinde PV üreten firmalar da bulunmaktadır.608 Teknolojinin gelişmesi ile güneş enerji ekipman maliyetlerinde azalma yaşanmasının yanında PV verimlilik oranlarında da artış yaşanmıştır. Bu bağlamda Türkiye’de daha önce güneş enerjisini etkin kullanılmaması avantaja çevrilebilir” (YEGM B, 2018).

Yenilenebilir enerji alanında şirket yöneticiliği yapan enerji uzmanı ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisinin gelişimini engelleyecek teknik engel olmadığı ifade edilmiştir. Türkiye’de TEİAŞ’ın altyapısında da önemli bir sıkıntı bulunmamaktadır. Ayrıca, Türkiye YEKA ihaleleri ile PV hücre üretimini gerçekleştirerek teknolojik gelişmelerini ilerletecektir. Ayrıca Türkiye’de güneş enerji sektörünün pazarı açılırsa yerli üreticinin yatırım miktarları da artacaktır. Görüşmede Türkiye’nin güneş enerjisinde ARGE çalışmalarına birden fazla alanda teşvik verdiği vurgulanmıştır. Ancak verilen ARGE desteklerinin denetlenmesi konusunda bazı problemler yaşanmaktadır. Güneş enerji sektörü çok yeni olduğu için devletin neyin hangi kapsama girdiğini

neyin girmediğini iyi denetlemesi gerektiği ifade edilmiştir. Avrupa’da, Amerika’da veya Japonya’da üretilen bir ürünün Türkiye’de üretilmesi bir ARGE değil teknoloji transferidir. Ancak dünyada olmayan veya dünyada var olup Türkiye’de yerleştirilerek patent alan çalışmalara teşvik verilmesi gerektiği belirtilmiştir. Teknoloji transferinin ve olmayan ürünün üretimi arasında denetim yapıp ona göre teşvik verilmelidir. Görüşmenin devamında, Türkiye’nin güneş enerji teknolojisi açısından entegratör ve kullanıcı konumunda bulunduğu ifade edilmiştir. Yani, bugüne kadar Türkiye hammaddeyi dışardan alıp ürettikten sonra pazara sunan konumunda kalıp herhangi bir ürünü patentlenememiştir. Türkiye’nin teknolojik olarak Almanya gibi ülkeleri yakalayabilmesi için ARGE’ye patent oluşturacak şekilde destek vermesi gerektiği vurgulanmıştır. Görüşmeye göre Türkiye’de yapılan projelerin çoğu ARGE değildir ve projelere herhangi bir denetim yapılamamaktadır. İlerleme kaydedilmesi için farklı bir metodun uygulanması gerektiği belirtilmiştir (A Grubu Enerji Şirketi, 2018).

B grubu enerji şirketi yenilenebilir enerji alanında yöneticilik yapan enerji uzmanı ile yapılan görüşmede, Türkiye’nin güneş enerji sektöründe dünyada en çok teşvik veren ülkelerinden bir tanesi olduğu ifade edilmiştir. Türkiye’de sorun verilen teşviklerin ürüne çevrilip çevrildiğinin denetlenememesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Görüşmenin devamına göre Türkiye’de ekonomik kaynaklar kısıtlı olduğundan kaynağın doğru bir şekilde kullanılması kritik önem taşımaktadır. Sadece güneş enerji sektöründe değil diğer farklı alanlarda da destek ihtiyacı bulunmaktadır. Bundan dolayı Türkiye’de stratejik yatırım önceliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Türkiye güneş enerjisinde ARGE’ye kısmen destek vermekte, geçmişe göre ayrılan kaynak miktarı her geçen gün artırılmaktadır. Görüşmede Türkiye’nin güneş enerjisinde teknolojik olarak öncü ülkeleri yakalaması mümkün olmakla birlikte bunun pek çok ön şartı olduğu vurgulanmıştır. Öncelikle güneş enerjisinin odak noktası olarak belirlenmesi ve bu yönde stratejik yatırım alanının belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda devletin ARGE, insan kaynağı ve yatırımları geliştirmesi için bürokrasiyi kaldırıp doğrudan ya da dolaylı olarak destek mekanizmaları ile teşvik etmesi gerekmektedir. Ayrıca, Türkiye’de otuzdan fazla güneş paneli üreticisi bulunmakta ve üretim lisansıyla yapılmaktadır. ARGE faaliyeti çok yoğun olmadığı için yoğun bir patent üretiminin de olmaması belirtilmiştir (B Grubu Enerji Şirketi, 2018).

Enerji ve kimya alanında uzman bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanımını engelleyen teknik nedenlerin hem ısı sistemlerinde hem de PV sistemlerinde teknolojik araştırma, sistem ve servis (3 S)⁵ eksikliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Almanya’da güneşlenme süresinin kısalığına rağmen 3 S’nin varlığı sayesinde ülke, güneş enerjisinde küresel güçlerden bir tanesi olabilmektedir. Kaynaktan ihtiyaca gidebilmek için teknolojinin olması gerekmektedir. Bu bağlamda Türkiye’nin de teknolojisini geliştirmek üzerine yoğunlaşması gerekmektedir. Bu da insan kaynağının yetiştirilmesi, altyapı imkânlarının geliştirilmesi ve eğitim programlarının düzenlenmesi ile gerçekleşecektir. Ayrıca, Türkiye’nin yenilenebilir enerji teknolojileri hamlesi yapması gerekmektedir. Devletin bütçe vermesi yeterli olmayıp bütün bunların aynı anda değerlendirilmesi gerekmektedir. Görüşmenin devamında, Türkiye’nin enerji eşitliği denklemini kurup bu denklemi çözmesi gerektiği ifade edilmiştir. Denklemde fosil enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılıp aynı zamanda karbondioksit salınımı çıkarmayan teknolojik kabiliyetin geliştirilmesi hususları yer almaktadır. Türkiye’nin araştırmaya ayırdığı fon %05’ten %1,002’ye çıkmış ancak teknolojik olarak bir sıçrama yaşanmamıştır. Üniversitelerin ve devlet kurumlarının çalışması ve evrimleşmesi gerektiği vurgulanmıştır (Akademisyen A, 2018).

Güneş enerjisi alanında uzaman bir akademisyenle yapılan görüşmede Türkiye’nin eğitim sistemi insan kaynağını yanlış yönlendirdiğinden dolayı ARGE teknolojisi sadece ticari boyutta kaldığı belirtilmiştir. ARGE ile yeniden bir ürün elde edilememekte yalnızca dışarıdan alınan ham madde dizayn edilip ticarileştirilmeye çalışılmaktadır. Görüşmenin devamında insan kaynağı yönetiminin doğru yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, enerji ve doğal kaynakların da doğru yönlendirilmesi açısından her alanda ayrı uzmanların çalışması gerektiği belirtilmiştir (Akademisyen H, 2018).

Güneş enerji enstitüsünde görev yapan ve enerji teknolojilerinde uzmanlaşmış bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanılmamasının birçok nedeninin olduğu belirtilmiştir. “Ekonomik, politik ve diğerlerine göre bürokratik engeller daha az bulunmaktadır. Yabancı yatırımcının güneş sektörüne destek vermemesi ve finansal kurumlardan alınan kredi faizlerinin yüksek olmasından dolayı yatırım yapılamamaktadır. Bunlara ek olarak günümüzde güneş enerjisinin en önemli ayaklarından bir tanesi teknoloji olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda güneş enerjisi teknolojik gelişiminin çok hızlı olduğundan dolayı kolay

⁵ Görüşme esnasında 3 S (Source, Sistem ve Servis) olarak ifade edilmiştir.

yatırım yapılabilir kaynaklar değildir. Güneş piyasasında yer alanların büyük çoğunluğu beş yıl sonra nasıl bir teknolojinin geleceğini bilmemektedir. Dolayısı ile teknolojiye yatırım yapmak riskli olduğundan güneş enerjisini etkin kullanımını da etkilemektedir. Almanya’da araştırmaları destekleyen kuruluşlar yarı özerk yapıda olduklarından dolayı hem araştırmadan hem de devletten alınan teşvikler kullanılarak araştırma yapılmaktadır. Türkiye’de böyle kurumlar desteklenmelidir. Ayrıca Türkiye’nin araştırmaya GSMH’ dan ayırdığı pay %1 iken Almanya’da bu oran %3 civarındadır. Dolayısı ile Türkiye’nin teknolojik olarak Almanya’yı yakalayabilmesi için GSMH’ dan araştırmaya ayırdığı payı 3-4 katına çıkarması gerekmektedir” (Akademisyen A, 2018).

Güneş enerji enstitüsünde görev yapmış aynı zamanda fotovoltaik sistemlerin kalitesini arttırmak için çalışmalar yapan bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisine ARGE çalışmalarını geliştirme konusunda devlet tarafından verilen teşviklerin planlı olmadığı ifade edilmiştir. “Birbirinden kopuk net hedefleri olmayan ARGE çalışmaları yapılmaktadır. Sanayici hızlı bir sonuç almak için sadece montaj yapıp ARGE çalışmalarına odaklanmamaktadır. Dolayısıyla Türkiye’nin teknoloji yol haritasından bahsetmek söz konusu değildir. Her sektörde olduğu gibi devlet güneş enerji sektöründe de 5 ya da 10 yıllık kısa, orta ve uzun vadede strateji geliştirmelidir. Ayrıca verilen desteklerin sürdürülebilirliği açısından denetimin de olması gerektiği belirtilmiştir. Görüşmenin devamında Türkiye güneş enerjisinde teknolojik olarak öncü ülkeleri yakalayabilecek potansiyele sahip olmasında rağmen planlı bir teknoloji yol haritası olmadığından dolayı bunu başaramadığı vurgulanmıştır. Türkiye’nin mevcut siyasi ve yönetim atmosferi teknoloji yol haritasını beraber oluşturabilecek bir yapıda olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca, dünya pazarında Almanya güneş enerjisinde küresel güçlerden bir tanesi olmak için teknolojik çalışmalara öncelik vermiştir. Bilhassa üretim sektöründe sanayideki üretim cihazlarının üretimine öncelik vermektedir. Günümüzde modül üreticileri Çinli ama kullandıkları üretim cihazları hala Almanya’da üretilmektedir. Değinen diğer önemli hususlar arasında Almanya’nın ağır sanayi üretim cihazlarını hala bünyesinde barındırdığı vurgulanmaktadır. Dolayısıyla Almanya’nın planlı bir teknolojik harita belirlediği belirtilmiştir. Genel olarak, Türkiye’de güneş enerji sistemlerinin geliştirilmesi için teknik çok engel yoktur. Bunların hepsi yapılabilir. Türkiye’de temel sorun yönetsel müdahaleler, bürokratik süreçlerin zorlukları, güven problemi kaynakların doğru yönetilmemesi olarak vurgulanmıştır (Akademisyen C, 2018).

Yenilenebilir enerji sistemleri ve ısı tekniklerinde uzman bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisi alanında ARGE faaliyetlerinin düzgün işlememesinin sebebi proje başvurularının uzman olmayan kişiler tarafından değerlendirip sonuçlandırılması olarak açıklanmıştır. Güneş alanında uzman bir akademisyene göre güneş enerji teknolojisi bakımından Türkiye belli bir potansiyele sahip olmakla birlikte sürdürülebilir bir üretim bulunmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca, Türkiye sanayi devrimi içinde yer almadığından dolayı ARGE kültürü bulunmamaktadır. Bu bağlamda öncelikle bir altyapının oluşturulması için aynı zamanda dışarıdan alınan birçok patentin üretime geçmesi gerektiği vurgulanmıştır (Akademisyen D, 2018).

Doktor kimliğinin yanında 1990’ların başından itibaren iklim, ekoloji ve çevre hareketlerinin içinde bulunan bir akademisyen ile yapılan görüşmede, Türkiye sanayisi ve ekonomisine göre güneş enerji çalışmalarında ARGE’ye verilen teşviklerin düşük olduğu ifade edilmiştir. Türkiye’de, Avrupa’dan sağlanan fonlar TÜBİTAK eliyle ARGE faaliyetlerine destek olarak verilmekte ancak devletin doğrudan verdiği bir destek bulunmadığı belirtilmiştir. Görüşmenin devamında Türkiye enerji arz güvenliğini sağlamak adına bir an önce güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji ekipmanlarının yanında pil depolama ve baraj depolama gibi teknolojileri geliştirmesi gerektiği vurgulanmıştır. Türkiye’de birçok HES olmasına rağmen daha hiç pompaj depolamalı HES bulunmadığı ifade edilmiştir (Akademisyen F, 2018).

Türkiye’de güneş enerjisi ARGE çalışmaları üzerine uzmanlaşmış bir akademisyenle yapılan görüşmede, güneş enerjisi teknolojilerinin ilerlemesi için TÜBİTAK ve Kalkınma Bakanlığı tarafından sağlanan teşviklerin artırılması gerektiği vurgulanmıştır. GSMH içinde güneş enerjisi teknolojilerine ayrılacak payın yükseltilmesi durumunda, Türkiye’nin önümüzdeki 10-20 yıl içinde bu sektörde küresel bir güç haline gelebileceği ifade edilmiştir. Bu hedefe ulaşmak için üniversitelerin ve endüstrilerin ciddi ARGE teşviklerine ihtiyaç duyduğu, verilen teşviklerin ise doğru şekilde planlanıp denetlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Akademisyene göre Türkiye, termal sistemlerde ve düzlemsel kolektörlerde sıcak su üretiminde Avrupa’yı geçmiş olmasına rağmen, bu başarıyı ileri düzey teknolojilere dönüştürememiştir. Yüksek verimlilik sağlayan parabolik sistemlerin geliştirilmesi için yeni politikalar ve ARGE çalışmalarına ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Güneş panelleri üretiminde henüz güneş gözesi üretimi yapılmamış, geçmişte patent engelleriyle karşılaşılacak kristal silisyum üretiminde ise bu engellerin kalkmasıyla bilgi transferi mümkün hale geldiği belirtilmiştir. Güneş enerjisi sektörünün istihdam ve gelir sağlaması nedeniyle Türkiye’de bir devlet politikası haline geldiği,

bundan sonra depolama gibi yeni teknolojilere yatırım yapılması ve teknik altyapının geliştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Akademisyen D, 2018).

GÜYAD ile yapılan görüşmede, Türkiye sadece güneş için değil tüm teknolojik alanlarda ARGE çalışmalarına gerekli önemi vermediği vurgulanmıştır. Türkiye'nin güneş enerjisinde teknolojik olarak öncü ülkeleri yakalayabilmesi için başta üniversiteler olmak üzere ARGE çalışmalarına gereken önemin verilmesi gerektiği belirtilmiştir. Dışarıdan elektromekanik teçhizatın ithal ikamesi kolaylık olup, ülke ekonomisine katkısı yok denecek kadar azdır. Paneller Türkiye'de daha ekonomik olarak üretebilirse özellikle güney ve doğu komşu ülkelerle büyük bir pazar yakalamak mümkün olduğu belirtilmiştir. Görüşmenin devamında Türkiye güneş enerjisinde teknolojik olarak dünyada çok yetersiz durumda olduğu belirtilmiştir. STK temsilcisine göre ülkede yeni yeni kurulan panel üretim tesisleri diğer ülkelerden patent alarak veya onların üretim üssü olarak imalat yapmaktadırlar. Ayrıca Almanya güneş enerjisinin ne denli büyük ve ucuz bir enerji kaynağı olduğunun farkında olduğundan dünya pazarında küresel güçlerden bir tanesidir. Bu konuda AR-GE çalışmalarına hız vererek bu enerjiyi daha ucuza mal etmede gayret göstermektedir. Gelecekte çok küçük panellerle ve pil teknolojileri ile herkesin kolayca elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak istemektedir. Bununla birlikte gelecekte araçların tamamı elektrikli olacağı için önem verdiği bu AR-GE çalışmaları ile dünyada teknolojik olarak bir adım önde olmak istemektedir. Türkiye'nin de böyle bir hamleyi kendisine hedef alması gerektiği vurgulanmıştır (STK, 2018).

EUROSOLAR Türkiye temsilcisi ile yapılan görüşmede, "Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanılmasında teknolojik olarak bir engelin bulunmadığı ifade edilmiştir. Türkiye'de güneş enerji kaynağı bulunmakta aynı zamanda ucuza üretilmektedir. Ancak şebekeye bağlantı izinleri için dağıtım şirketlerinin kapasiteyi arttırması gerekmektedir. Ayrıca Türkiye'de güneş enerjisine YEKA' lar ile ARGE şartı arandı ancak ARGE desteğinin yanında araştırma yapabilecek kalitede insanlara da ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye'de aynı zamanda verilen teşvikin denetlenmesi de gerekmektedir. TÜBİTAK verdiği desteğin sonucu oluşan ürünü bilmesi gerektiği" vurgulanmıştır (STK F, 2019).

GİZ güneş enerji uzmanına göre, Almanya başlangıçta güneş teknolojileri bakımında bir pazar oluşturduğundan dolayı küresel güç olmuştur ancak bilhassa düşük maliyetli (yüksek kalitede ürünler) için Çin'e ayak uyduramamıştır. Dolayısıyla ARGE Çin'e kaymıştır. Almanya günümüzde çok az PV üreticisine sahip ve yen gelişmeleri ilerleten bir inovasyon merkezidir (Hükümet Dışı Örgütler E, 2018).

Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanılmamasının ekonomik nedenlerine bakıldığında AB Bakanlığı enerji uzmanı ile yapılan görüşmede, Türkiye'de güneş enerji teknolojisinin daha önce pahalı olmasından etkin bir şekilde kullanılmadığı vurgulanmıştır (AB Bakanlığı Enerji Uzmanı, 2018).

ÇŞB enerji verimliliği dairesi enerji uzmanı ile yapılan görüşmede, Türkiye'de güneş enerjisine verilen teşvikler yeterli olmadığından etkin bir şekilde kullanılmamaktadır. Uzmanına göre AB'de ESCO⁶ firmaları bulunmakta ve binaların enerji verimliliği hale getirilmesi konusunda taahhütlerde bulunmaktadır. Türkiye'de ESCO' ların karşılığı Enerji Verimliliği Danışmanlık (EVD) Şirketleri ama insanlar EVD şirketlerine ekstra maliyetler ödememek için bu şirketler işletilemedi. Türkiye'de teşvikler sadece banka kredilerinde indirim şeklinde verildiği belirtilmiştir. Devlet sıfır ya da düşük faizli kredilerin verilmesini sağlarsa enerji verimli binalar yaygınlaşacaktır. Ayrıca, insanların EVD ve ESCO şirketleri hakkında da bilinçlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir (ÇŞB A, 2018).

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğünden bir bürokrat ile yapılan görüşmede, Türkiye'de üç yıl öncesine kadar güneş enerjisinin etkin kullanılmadığı ancak son dönemde etkinliğinin artırıldığı ifade edilmiştir. Güneş enerjisinin daha önce kullanılmamasının nedeni çok pahalı olması olarak açıklanmıştır. Edinilen bilgiye göre, Türkiye'de güneş enerjisinden elektrik üretmek kömür ve doğalgazdan daha pahalı olduğu için etkin bir şekilde yaygınlaşmadığı belirtilmiştir. Görüşmenin devamında, Türkiye güneş enerjisini etkin kullanmada çok geç kalmış değildir; ayrıca çok fazla teşvik verilmesi de büyük yanlışlıklara sebebiyet vereceği belirtilmiştir. Güneşten üretilen elektrik fazlasının satımı noktasında sıkıntılar olduğundan dolayı güneş enerjisinde fizibil olmadığı ifade edilmiştir. Türkiye'de kömür ve doğalgazdan elektrik üretimi daha fizibil olmasına rağmen güneş ve rüzgâr enerjisi de piyasada bu kaynaklarla yarışabilecek durumda olduğu vurgulanmıştır. Türkiye, güneş enerjisini etkin kullanmaya geç kalmamasının yanında hesaplı bir şekilde geçmiştir. YEK kanunu 2005'te çıkmış ve 2010'da revize edilerek YEKDEM getirilmiştir. Dolayısıyla yaşanan gelişmelere uyum sağlanması açısından günümüzde bunun revize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (YEGM B, 2018).

⁶ ESCO: Enerji Servis Şirketleri demek.

Güneş enerjisi alanında kıdemli uzman bir bürokrat ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerji teknolojisi bulunmamakta, verilen krediler ve tesislere yüklenen çeklerin verilmediği vurgulanmıştır. Türkiye’de teknoloji ve kredinin olmamasının yanında 2017 yılındaki seri üretim büyük oranlı kurulumlar gerçekleştirilinceye kadar know how’ da bulunmadığından dolayı güneş enerjisine yatırım da yapılamadığı belirtilmiştir. Yatırımın yapılabilmesi için bir yaşam alanı olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu yaşam alanı bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Dolayısıyla kredilerin nereden geldiği, ülkenin kredi birikiminin ve potansiyelinin kim tarafından verildiği bu yaşam alanı içinde almaktadır. Bürokrata göre Türkiye’deki bankalar güneş enerji projelerine krediyi yurtdışı bankalarından edindikleri proje kredileri ile vermekte ve kredilerin çoğunluğu da kendi ülkesinden gelen ürünlere verilebilir şartı bulunmaktadır. Bu bağlamda, teknolojinin nereden sağlanacağına önemine vurgu yapılmıştır. Görüşmenin devamında, Türkiye’de güneş enerjisinin altın üretim yılının 2016 olduğu ifade edilmiş ve 1,3 ya da 1,6 GW düzeyinde bir kurulum gerçekleştirildiği söylenmiştir. Herhangi bir özel teşvik olmaksızın mevcut sistem içerisinde kendi deltasında gelişim devam ederken 1,3 GW kurulumun sağlanma nedeni doların geldiği nokta ve projelerin kendi kendini finanse edebilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Kurulum, 2016’da yurtdışından gelen kredi faizlerine, kredilerin faizlerine, teknolojinin yurtdışından gelmesine, know how ve ithalat vergilerine rağmen projelerin kendi kendilerini finanse edebildikleri ya da ödeyebildikleri görülmektedir. 2017’de 2 GW’lık bir kurulum tahmin edilmekteydi ancak kurul kararı ile tarife değiştirilince birçok proje son fırsat düşüncesinden hareketle kurulmuştur. Bu Türkiye açısından çok büyük bir yatırım olmuştur. Ancak, önümüzdeki yıllarda 3 GW’lık kurulum 3 milyar dolara denk gelmektedir ve bu faiziyle beraber düşünüldüğü zaman Türkiye ekonomisi açısından olumsuzluk yaratacağı belirtilmiştir. Elektrik parasını tüketiciler ödeyecek ve kazanan taraf Avrupalı ve Amerikalı kredi kuruluşları ya da Avrupalı ve Çinli teknoloji şirketleri olacağı vurgulanmıştır (EPDK, 2018).

A grubu enerji şirketi temsilcisi ile yapılan görüşmede, Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanılmamasının ekonomik nedeni finansmana ulaşma konusunda sıkıntılar ve zorluklar olduğu belirtilmiştir. “Türkiye’de 2 Mayıs 2018 tarihinde döviz borçlanma yasağının (teşvik belgeli yatırımlar bunun haricindedir) getirilmesi ile sektör olumsuz etkilenmiştir. Şöyle ki, büyük kapasiteli güneş santralleri yatırım teşvik belgesi aldığından dolayı bundan etkilenmese de çatı projeleri için bu bir engel oluşturmaktadır. Türkiye’de yatırımcı yurtdışından edindiği kaynağı tüketiciye kullanırmak istediği zaman böyle bir engelle karşılaşmaktadır. Şundan dolayı, 2 Mayıs 2018’den itibaren bireyler ve şirketler döviz gelirleri yoksa ve teşvik belgesi kapsamında değilse döviz kredisi kullanamayacaktır. Çatı yatırımları bu çerçeveye dâhil olmadığından dolayı da finansmana ulaşamayarak engel oluşturmaktadır. Güneş enerji sektörü için bu bir regülasyon değil ancak genel konulduğundan dolayı güneş de o kapsam içerisine girmektedir” (A Grubu Enerji Şirketi, 2018).

Görüşmenin devamında, Türkiye’de 2020’den sonra YEKDEM sistemine girişlerin olmaması hakkındadır. YEKDEM’in günümüzde ve geçmişte en büyük fonksiyonunun bir proje finanse edilirken bankaya bir gelir garantisi olduğunu göstermekle sağladığı ifade edilmiştir. Ancak, günümüzde güneş enerji şebeke maliyetlerinin düşmesiyle destek mekanizmasına gerek duyulmamaktadır. YEKDEM, Türkiye’de finansal koşullardan ve serbest piyasa ile reel sektör liberalize olmadığından dolayı sadece alım garantisi ile bankalara üretilen enerjinin satışını taahhüt eden bir mekanizmadır. Kanunun Elektrik Üretim Anonim Şirketini (EÜAŞ) özelleştirmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, 2020 sonrası YEKDEM’e girişlerin olmamasına karşı güneş enerji sektörü finansal problemi çözülür ise sektör çok negatif etkilenmeyeceği vurgulanmıştır. Devamında, güneş enerjisi hem kurulum hem de elektrik üretim maliyetleri açısından sürekli bir düşüş içinde bulunduğu belirtilmiştir. Uluslararası enerji ajansı tarafından da kabul edildiği gibi dünyada şu anda en ucuz elektrik üretim metodu güneş enerjisindedir. Türkiye’nin sadece regülasyon olarak organize olup enerji çeşitliliğini arttırması gerekmektedir. Almanya’nın güneş enerjisinde küresel güçlerden bir tanesi olmasında sanayileşmiş bir ülke olmasının büyük etkisi bulunmaktadır. Uzmana göre Almanya öncelikle güneş enerji yasasını çıkarmış ve ardından ticarileşmesine olanak sağlamıştır. Laboratuvarda üretilen ürün ticari olarak sahada yer alabilmesi için teşvikler verilmiştir. Dolayısı ile üretim hacmi oluştu ve maliyetlerde de düşüş gerçekleşmiştir. Öte taraftan PV üretim teknolojisinin gelişiminin yanında PV üreten makineler de üretmiştir. Sahada bunların montajını yapan konstrüksiyon dizaynlarının yapılmasını ve performansını sağlayan test enstitüleri oluşturulmuştur. Ayrıca akreditasyonunun yapıldığı şirketler de kurulmuştur. Dolayısı ile değer zinciri alım garantisi ile oluşturulmuştur. Türkiye’deki mevcut alım garantisi ile bu gelişmelerin yapılması mümkün değil modelin değiştirilmesi gerekmektedir. Türkiye güneş enerjisi ile ilgili ARGE çalışmaları yapmalıdır. Almanya günümüzde PV makinesi üretmekte ve sertifikasyon yapmakta ancak know how ve IPS üretimi Çin’e kaymıştır. Sonuç olarak güneş enerjisi küresel boyuta taşındı ve Çin büyük bir güç olduğu vurgulanmıştır (A Grubu Enerji Şirketi, 2018).

B Grubu Enerji Şirketi temsilcisine göre Türkiye'nin güneş enerjisinden etkin yararlanamamasının temelinde ekonomik yetersizlikler ve makroekonomik istikrarsızlıklar yer almaktadır. Almanya'nın 2000'li yıllarda sağladığı yüksek teşviklerle çatı sistemlerini yaygınlaştırıp ek gelir kaynağı yaratmasına karşın, Türkiye, sınırlı ekonomik kaynaklarını farklı önceliklere yöneltmek zorunda olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, TL'nin değer kaybı ve kur dalgalanmaları, yatırım maliyetlerini artırarak güneş enerjisine olan ilgiyi azalttığı ifade edilmiştir. Yatırımcıların mevzuat değişiklikleri ve düşük kârlılık nedeniyle ilgisinin azalması da bu alandaki gelişimi engellemiştir. Türkiye'nin, akıllı planlama ve düzenlemelerle güneş enerjisi sanayisini destekleyebileceği belirtilmektedir. Öte taraftan, Türkiye'de çatı pazarının gelişmesi için yatırım maliyetleri azaltılmalı, izin süreçleri kolaylaşmalı, kamu kurumlarına verilen harçlar ve ilgili bedeller azalmalı ve çeşitli durumları destekleyecek mekanizmalar geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, çatılarda KDV muafiyeti bulunmamakla beraber geri alınmamakta ama şirketler KDV'yi mahsuplaştırabildiği belirtilmiştir (B Grubu Enerji Şirketi, 2018).

Güneş enerjisinde uzaman bir akademisyene göre Türkiye'de güneş enerjisinin yeterince etkin kullanılmamasının temel nedenlerinden biri, yatırım ortamının istikrarsızlığıdır. 1990-2000 dönemindeki Asya Krizi, 2001 Türkiye Ekonomik Krizi, 11 Eylül saldırıları ve 2008 küresel ekonomik krizi gibi olaylar, güvenilir bir yatırım ikliminin oluşmasını engellemiştir. Bu belirsizlik, yatırımcıların güneş enerjisine yönelmesini zorlaştırmış, dolayısıyla bu alandaki gelişmeleri sınırlamıştır. Sektörün ilerlemesi için güvenilir ve istikrarlı bir yatırım ortamının oluşturulması gerektiği ifade edilmiştir (Akademisyen B, 2018).

GÜYAD ile yapılan görüşmede Türkiye'de özel sektörün GES projelerine ilgisi fazla olmakla birlikte ihale açılmadığından dolayı projeleri hayata geçirme şansı bulamadığı vurgulanmıştır. Ayrıca, piyasa ve sektöre güven yatırımcı için şarttır. Türkiye'de piyasa kurallarının sürekli değişiklik göstermemesi gerekir. Aksi takdirde yapılan fizibilite yatırımları geri dönüşleri ile uyum göstermeyecektir. Görüşmenin devamında teşvik sistemleri yatırım yapılan süre boyunca geçerli olması gerektiği belirtilmiştir. Türkiye'de bu sağlanmadığından piyasada güven ilkesinin zedelendiği ifade edilmiştir (STK C, 2018).

Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanılmamasının temel ekonomik nedeni, pazarın henüz yeterince gelişmemiş olmasıdır. Teknoloji üretiminin sınırlı olması nedeniyle, diğer ülkeler Türkiye pazarında hâkimiyet sağlamış, ancak son dönemde Türkiye'nin kendi teknoloji materyallerini geliştirmesi ve güneş enerjisi pazarının oluşmaya başlaması bu alanda ilerleme potansiyelini artırmıştır (STK D, 2018).

Son olarak politik nedenlere bakıldığında: Türkiye'de güneş enerjisinin etkin kullanılmamasının nedenlerinden biri, bütçe önceliklerinin savunma sanayisine yönelmesidir. Ülkenin dönemsel olarak değişen politik öncelikleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yeterli teşvik sağlanamamaktadır. Devletin teşvik politikaları, mevcut önceliklere ve seçici yaklaşıma bağlı olarak şekillenmektedir (AB Bakanlığı Enerji Uzmanı, 2018).

A grubu enerji şirketi temsilcisi ile yapılan görüşmede, Türkiye'nin enerji politikasında yerli ve milli kaynakların önemi vurgulanarak, güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları dışa bağımlılığı azaltma hedefiyle önceliklendirilmektedir. 2023 yılı güneş enerji hedeflerine ulaşan Türkiye, daha uzun vadeli stratejiler geliştirmelidir. Nükleer enerji, stratejik bir unsur olarak değerlendirilmekte olup, güneş enerjisi ile birbirinin alternatifi değildir. Petrol ve doğal gaz kaynaklarının yetersizliği, yenilenebilir enerjiye yönelimi artırmakta ve enerji arz güvenliğini desteklemektedir (A Grubu Enerji Şirketi, 2018).

Güneş enerjisi alanında uzman bir akademisyene göre: Türkiye'nin güneş enerjisi politikalarının etkinliği, devletin bu alanda belirlediği stratejilere bağlıdır. Güneş enerjisi, devlet politikası olarak ele alınmadığında bireylerin girişimleri sınırlı kalmakta ve enerji sektörüne yatırım yapılamamaktadır. Türkiye, yüksek güneş potansiyeline rağmen, geçmişte izlenen hatalı politikalar nedeniyle bu kaynağı etkin kullanamamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklendirilmesi ve devletin bu alanda politika üretmesi, güneş enerjisinin yaygınlaşması için kritik öneme sahiptir (Akademisyen B, 2018).

İklim kriziyle mücadelede uzman bir akademisyenin görüşüne göre: Almanya'da güneş enerjisinin yaygınlaşmasının temelinde, 1980'lerde başlayan nükleer karşıtı hareket ve çevre mücadelesi yer aldığı vurgulanmıştır. Yeşil Parti'nin 1980'lerde güçlü bir şekilde kurulmasıyla birlikte, enerji politikası halk arasında önemli bir siyasi konu haline gelmiştir. 1990'larda, Yeşillerin ve sosyal demokratların etkisiyle Almanya, nükleer santrallerin kapatılması ve yenilenebilir enerji yasalarının kabul edilmesiyle enerji dönüşümünü hızlandırmıştır. Görüşmenin devamında Almanya'da güneş enerjisi, devletin sağladığı politik destek, halkın bilinçlendirilmesi ve ekonomik teşviklerle etkin bir şekilde kullanılmış olması vurgulanmıştır. Öte yandan, Türkiye'nin güneş enerjisini etkin kullanabilmesi için iklim hedefleri belirlemesi gerektiği belirtilmiştir.

Günümüzde, Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye yönelik artan ilgisi, maliyetlerin düşmesinden kaynaklansa da güneş enerjisi teknolojilerinin ithalata bağımlılığı ve nükleer enerjiye verilen öncelik, etkin kullanımını engellediği ifade edilmiştir. Türkiye'nin iklim hedefi belirlemesi ve güneş enerjisi teknolojisini yerli üretimle desteklemesi, güneş enerjisinde küresel bir oyuncu olma yolunda önemli adımlar olacağı vurgulanmıştır (Akademisyen F, 2018).

GÜNDER temsilcisi ile yapılan görüşmede, Türkiye'de kamunun güneş enerjisinde ARGE'ye çok fazla destek vermediği belirtilmiştir. Devlet güneş enerji stratejisi geliştirmemektedir. Kamunun güneş enerjisini stratejik olarak benimseyip desteklemesi gerektiği vurgulanmıştır (STK B, 2018).

GENSED temsilcisiyle yapılan görüşmede, Türkiye'de güneş enerjisi sektörünün gelecekteki büyüme potansiyelinin kısa vadede sınırlı olduğu vurgulanmıştır. Bu durum, elektrik fazlasının devlete satılması için belirlenen fiyat farklarının, özellikle vergi yüküyle zayıflamasıyla ilişkilidir. 2018'de açıklanan iletim vergisi bu durumu örneklemektedir. Türkiye'nin enerji çeşitliliği zayıf olduğundan, enerji arzını sağlamak amacıyla dışa bağımlı olmak durumu belirtilmiştir. Bu da yatırımcıların termik santralleri sürekli çalışmalarını gerektirmektedir. Bu bağlamda, Türkiye'nin enerji politikasının, ekonomiye ve endüstriyel taleplere göre şekillendiği vurgulanmaktadır (STK A, 2018).

GÜYAD temsilcisi ile yapılan görüşmeye göre, Türkiye'de güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerjilerin etkin kullanımı için politika yapımcıların belirleyici bir rol oynaması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji santrallerinin etkinliğini artırmak için mevzuatın kategorik olarak düzenlenmesi ve her kategoriye özel çözümler üretilmesi gerektiği belirtilmektedir. Özellikle, GES santralleri ile endüstriyel çatı uygulamaları için farklı kuralların getirilmesi, bu sektörde daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bu yaklaşım, yenilenebilir enerji üretiminin ülke elektrik şebekesinde daha etkili bir şekilde yer almasına katkı sağlayacağı vurgulanmaktadır (STK C, 2018).

YDD yönetim kurulu üyesi ile yapılan görüşmede, "Türkiye'de enerji politikaları sürekli merkezden yönetilmektedir. Doğal gaz, petrol ve nükleer enerji merkezi politikaya uygunken güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları daha liberal ve daha serbest enerji kaynaklarıdır. Dolayısı ile güneş ve diğer yenilenebilirler merkez politikayı kırmaktadır" ifadelerine değinilmiştir. Görüşmenin devamında "Türkiye'de yerel yönetimler güneş enerjisini teşvik etmede çok geç kalmıştır. Çünkü daha önceden doğal gaz, nükleer ve baraj kurulumu gibi enerji kaynaklarının kurulumu sürekli devlet tarafından yapıldı. Güneş ve diğer yenilenebilir enerjiler yerel yönetimler için bir ilk olmuştur. Öte taraftan güneş enerjisinin etkin kullanımını için STK, kurumlar ve belediyeler arasında protokollerin yapılması gerekmektedir. Meclis'te güneş enerjisi talebinde bulunan herhangi bir vekilin olmaması da güneş enerjisinin yaygın kullanımını önlemektedir" ifadeleri yer almaktadır (STK E, 2019).

SONUÇ

Uluslararası konjonktür çerçevesinde enerji, satranç oyununun en önemli taşlarından birini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, AB gibi uluslararası bir kuruluş için enerji politikası uluslararası nitelikte olup Birlik enerjisi uluslararası enerji ticareti yoluyla sağlamaktadır. Bu sebeple AB enerji politikası dış faktörlere karşı kırılabilir bir yapıdadır. AB'nin, dış enerji kaynaklarına ihtiyacı, hem dışarıya karşı etkili bir enerji politikası oluşturmayı hem de içeride çok iyi organize olmuş, enerji krizleri ile baş edebilecek ve aynı zamanda rekabetçi bir enerji politikası geliştirilmesini gerektirmektedir. AB enerji politikası üç ana amaca dayanmaktadır: Enerji alanında rekabeti sağlamak, çevre odaklı sürdürülebilir kalkınma ve enerji güvenliğini sağlamak. Bu çerçevede; çevrenin korunması amacı ile enerji üretiminde ve tüketiminde güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, enerji alanında rekabetin sağlanması ve enerjinin etkin bir şekilde yönetilip sürdürülebilirliğinin sağlanması amaçlanmıştır.

AB'nin uyguladığı yenilenebilir ve güneş enerji politikaları, yenilenebilir ve güneş enerji kullanımının artışı sağlamış ve stratejik hedeflerin uzun vadede başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir. Özellikle AB ve Almanya, enerji arz güvenliğini sağlama, dışa bağımlılığı azaltma ve iklim değişikliği ile mücadele etme amacıyla güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını önemli bir araç olarak kullanmıştır. Bu politikalar, bölgenin enerji sistemlerini dönüştürürken, sürdürülebilir enerji çözümlerine olan ilgiyi artırmıştır.

Almanya'da güneş enerjisine olan ilgi esasında Alman halkının ve politikasının çevreci karakterinden ve aynı zamanda refah ve insan güvenliğine verilen önlemlerden kaynaklanmaktadır. Almanya, Yeşillerin de etkisiyle ARGE'ye güçlü destek verilmesi ve yatırımcılara sağlanan teşviklerle güneş enerjisinde küresel güçlerden bir

tanisi olmuştur. Öte taraftan Almanya’da halk çevre bilincinin yanında güneş enerjisinde kooperatif kurup kar elde etmiştir. Bu şekilde güneş enerjisinin kullanımı çatılarda yaygınlaşmıştır. Almanya’da güneş enerjisinden hem gelir elde edilip tabana yayılmış hem de halkın bilinçlendirilmesi ile politik bir dönüşüm sağlanmıştır.

Türkiye’de ekonominin enerji ihtiyacının karşılanması büyük oranda fosil yakıt ithalatına dayanmaktadır. Bu durum, gerek ülke bütçesi açısından ağır bir yük oluşturmakta gerekse de ekonominin yapısal cari açık sorununu daha da derinleştirmektedir. Güneş enerjisinin fosil kaynaklara alternatif oluşturacak şekilde desteklenmesi ülke ekonomisinin üzerindeki yükü hafifletmek için oluşturulacak uzun dönemli stratejinin temel unsurları arasında yer almalıdır.

Türkiye’nin güneş enerji potansiyeli Almanya’nın güneş enerji potansiyelinden yüzde altmış daha fazla olmakla birlikte güneş enerjisi etkin bir şekilde kullanılamamaktadır. Türkiye’nin güneş enerjisini etkin kullanamamasının bürokratik, hukuki, teknik, ekonomik ve politik nedenleri yapılan derinlemesine mülakatlarla belirlenmiştir. Bu bağlamda Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanımını engelleyen başlıca bürokratik nedenler, yasal izin süreçlerinin uzunluğu, bürokratik engeller ve kurumlar arası iletişim eksiklikleridir. Lisanslı projelerde kamu tarafından sürecin yeterince bilinmemesi ve kurum çalışanlarının bilgi eksiklikleri, güneş enerjisinin verimli kullanımını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, çatı mevzuatının eksikliği, bürokrasinin yavaş işlemesi ve yatırımcıların yanlış fizibilite çalışmaları gibi faktörler de bu durumu pekiştirmektedir. STK’lar, akademisyenler ve enerji şirketleri arasında yapılan görüşmelerde, devletin reel sektörle ve teknolojinin gelişim hızıyla uyumlu adımlar atmakta zorlandığı, ayrıca GES için regülasyonların büyük şirketlerin lehine düzenlendiği belirtilmiştir. Diğer yan etkenler arasında ulusal bir enerji ajansının eksikliği, yurtdışından gelen modüllerin gümrük süreçlerindeki zorluklar ve dağıtım şirketleri arasındaki farklı uygulamalar yer almaktadır. Bu unsurlar, güneş enerjisinin yaygınlaşmasını engellemektedir. Hukuksal nedenlere bakıldığında genel olarak hukuk güvenliğinin eksikliği çoğu görüşmede temel olarak vurgulandı. Akademisyenler, mevzuatın sık değişmesinin hukuki engel teşkil ettiğini belirtirken, HDÖ temsilcileri yasal düzenlemelerin geç çıkmasını bu konuda bir engel olarak görmektedir. Bürokratlar, doğalgaz antlaşmalarının güneş enerjisine geçişte engel oluşturabileceğini ifade ederken, enerji şirketi temsilcileri bu görüşe katılmamaktadır. Ancak, akademisyenler arasında doğalgaz antlaşmalarının engel olup olmadığı konusunda görüş ayrılıkları vardır; bazıları bu antlaşmaların geçişi engellediğini savunurken, diğerleri engel oluşturmadığını belirtmektedir. STK ve HDÖ temsilcilerinin çoğunluğu ise doğalgaz antlaşmalarının güneş enerjisine geçişte engel oluşturduğunu düşünmektedir. Ayrıca, yasal mevzuatın teknolojinin gelişimine katkı sağlamaması da hukuki bir engel olarak vurgulanmaktadır. Yapılan görüşmeler kapsamında güneş enerjisinin etkin kullanımını önleyen teknik engeller elektrik üretim sisteminin modernize edilmemesi ve güneş hücresinin üretilmemesi öne çıkanlar arasında yer aldı. Ayrıca, AR-GE faaliyetlerinin yetersiz denetlenmesi ve kaynakların azlığı, bu alandaki gelişimi sınırlamaktadır. Akademisyenlere göre, yeni ürünlerin üretilmemesi ve planlama eksiklikleri, AR-GE sürecinde karşılaşılan engeller arasında yer almaktadır. Enerji şirketi temsilcileri, güneş ekipmanlarının patentlenmemesi gibi sorunlara dikkat çekerken, STK temsilcileri, güneş enerjisi AR-GE’sine yapılan teşviklerin yetersiz olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca, teknolojinin ithal edilmesi, insan kaynağının yeterince eğitilmemesi ve depolama teknolojilerinin geliştirilmemesi de teknik engeller olarak belirlenmiştir. Bu faktörler, güneş enerjisinin potansiyelinden tam anlamıyla faydalanılmasını engellemektedir.

Derinlemesine mülakatlarla elde edilen bulgular kapsamında Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanımını önleyen ekonomik nedenler arasında yüksek ilk yatırım maliyetleri, yetersiz teşvikler ve yatırımcıların doğru fizibilite yapmaması yer almaktadır. Bürokratlar, akademisyenler, enerji şirketi temsilcileri ve HDÖ yetkilileri, lisanslı GES’lerde yatırımcıların yanlış değerlendirmelerinin bu engelleri pekiştirdiğini belirtmektedir. Ayrıca, Türkiye’deki kur hareketliliği ve finansmana erişim zorlukları, güneş enerjisi yatırımlarını olumsuz etkilemektedir. Diğer ekonomik engeller arasında döviz borçlanma yasağı, KDV muafiyetinin olmaması, düşük gelir düzeyi, vergi kolaylıklarının eksikliği ve mahsuplaştırma uygulamalarının bulunmaması sayılmaktadır. Ayrıca, ekonomik krizler, istikrarsız yatırım ortamı ve AR-GE desteğinin dışarıdan fonlanması gibi faktörler de engel oluşturmaktadır.

Yapılan görüşmeler çerçevesinde Türkiye’de güneş enerjisinin etkin kullanımını önleyen etkenler politik nedenlere bakıldığında devletin enerji politikalarının öncelikleri arasında güneş enerjisinin yer almaması önemli bir politik engel olarak öne çıkmaktadır. Bürokratlara göre, bütçenin büyük kısmının savunma sanayine ayrılması, güneş enerjisinin gelişimini engellemektedir. Akademisyenler, STK’lar ve HDÖ temsilcileri ise halkın bilinçlendirilmesine yönelik yetersiz çalışmaları ve çevre bilincini artırmaya yönelik politikaların eksikliğini politik engeller olarak belirtmektedir. Ayrıca, STK’ların bağımsız olmaması, karar

mekanizmalarının güneş enerjisini desteklememesi ve devletin yeterli teşvikler sağlamaması da önemli sorunlar arasında sayılmaktadır. Hükümetin güneş enerjisi yerine nükleer enerjiye verdiği öncelik, enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından güneş enerjisinin daha fazla kamu politikası haline gelmesi gerektiği görüşü de dile getirilmiştir. Enerji politikalarının revizyonu, iklim değişikliği etkilerine yönelik uzun vadeli hedeflerin eksikliği, siyasi çıkarların öncelik verilmesi ve doğal gaz antlaşmalarına verilen öncelik de politik engeller olarak vurgulanmaktadır. Ayrıca, yerel yönetimlerin güneş enerjisini teşvikte geç kalması ve devlet ile özel sektör arasında koordinasyon eksiklikleri de diğer politik engeller olarak ifade edilmiştir.

KAYNAKÇA

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Renewable Energy Sources Act (EEG 2017)”, https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/renewable-energy-sources-act-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3,

Son erişim tarihi: 10 Aralık 2024.

Dunford M., Lee, K.H., Liu W., Yeung G., 2013. “Geographical Interdependence, International Trade and Economic Dynamics: The Chinese and German Solar Energy Industries”, 20(1):14-36.

https://www.researchgate.net/publication/258136495_Geographical_interdependence_international_trade_and_economic_dynamics_The_Chinese_and_German_solar_energy_industries,

Son erişim tarihi: 10 Aralık 2024.

EPDK, “Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu”. Sayıştay Başkanlığı.

<https://www.sayistay.gov.tr/reports/download/DNYnKKyo7b-enerji-piyasasi-duzenleme-kurumu>,

Son erişim tarihi: 10 Aralık 2024.

Euro-lex a. “On the Implementation of the Community Strategy and Action Plan on Renewable Energy Sources (1998 - 2000)”, European Union, COM/2001/0069 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex:52001DC0069>

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro-lex b. “Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport”, European Union, OJ L 123, 17.5.2003, p. 42–46. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2003/30/oj>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro-lex c. “Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC”, European Union, OJ L 140, 5.6.2009, p. 16–62. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro-lex d. “Opinion of the European Economic and Social Committee on the ‘Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions — Energy Roadmap 2050’”, European Union, OJ L, C 229, 31.7.2012, P. 126-132. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2012:229:0126:0132:EN:PDF>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro-Lex e. “Paris Agreement”, European Union, OJ L 282, 19.10.2016, p. 4–18. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01)),

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro-Lex f. “The European Green Deal”, European Union, COM/2019/640, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1733664108679>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro- Lex g. “Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources”, PE/48/2018/REV/1.

<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

Euro- Lex ğ. “EU Solar Energy Strategy”, COM/2022/221 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A221%3AFIN&qid=1653034500503>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

European Commission. “REPowerEU: A Plan to Rapidly Reduce Dependence on Russian Fossil Fuels and Fast Forward the Green Transition”, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131 ,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

European Council a. “2030 Climate and Energy Policy Framework”, EUCO 169/14, Brussels, 24 October 2014, <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/en/pdf>.

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2024.

European Council b. “Fit for 55”, European Council of the European Union. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>,

Son erişim tarihi: 8 Aralık 2023.

Mevzuat Bilgi Sistemi, “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi ve Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun”. Resmî Gazete Sayısı: 25819.

<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5346&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>,

Son erişim tarihi: 10 Aralık 2024.

Moussis, N. 2004. Avrupa Birliği Politikalarına Giriş, Çev. Ahmet Fethi, İstanbul, Mega Press Yayıncılık, 426.

Ouitzow, R., Roehrkasten, S., Jaenicke, M. “The German Energy Transition in International Perspective”, https://www.researchgate.net/publication/305210393_The_German_Energy_Transition_in_International_Perspective ,

Son erişim tarihi: 10 Aralık 2024.

Resmi Gazete, 2021. “1/7/2021 Tarihinden 31/12/2025 Tarihine Kadar İşletmeye Girecek YEK Belgeli Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretim Tesisleri İçin Uygulanacak Fiyatlar ve Süreler ile Fiyatların Güncellenmesine İlişkin Ekli Kararın Yürürlüğe Konulmasına Dair Karar”, Karar Sayısı: 3453.

<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/01/20210130-9.pdf>,

Son erişim tarihi: 10 Aralık 2024.

Yapılan Derinlemesine Mülakatlar

AB Bakanlığı, “Derinlemesine Mülakat”, Bürokrasi, 12.03.2018.

A Grubu Enerji Şirketi, “Derinlemesine Mülakat”, Enerji Şirketi, 14.05.2018.

Avukat, “Derinlemesine Mülakat”, Hükümet Dışı Örgütler B, 9.05.2018.

B Avukat, “Derinlemesine Mülakat”, Hükümet Dışı Örgütler D, 15.03.2019

B Grubu Enerji Şirketi, “Derinlemesine Mülakat”, Enerji Şirketi, 13.06.2018.

ÇŞB A, “Derinlemesine Mülakat”, A Bürokrasi, 13.03.2018.

ÇŞB B, “Derinlemesine Mülakat”, A Bürokrasi, 13.03.2018.

ÇŞB C, “Derinlemesine Mülakat”, A Bürokrasi, 07.05.2018.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, (Alman Uluslararası İşbirliği Kurumu), “Derinlemesine Mülakat”, Hükümet Dışı Örgütler E, 18.04.2018.

- Ege Üniversitesi Güneş Enerji Enstitüsü, “Derinlemesine Mülakat, Akademisyen B, 22.03.2018.
- Ege Üniversitesi Güneş Enerji Enstitüsü, “Derinlemesine Mülakat, Akademisyen C, 22.03.2018.
- Ege Üniversitesi Güneş Enerji Enstitüsü, “Derinlemesine Mülakat, Akademisyen D, 22.03.2018.
- Ege Üniversitesi Güneş Enerji Enstitüsü, “Derinlemesine Mülakat, Akademisyen E, 22.03.2018.
- Enerji Piyasaları Kurumu A, “Derinlemesine Mülakat”, Bürokrasi, 07.05.2018.
- Enerji Piyasaları Kurumu B, “Derinlemesine Mülakat”, Bürokrasi, 07.05.2018.
- EUROSOLAR Türkiye, “Derinlemesine Mülakat”, STK F, 05.03.2019.
- GENSED (Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği), “Derinlemesine Mülakat”, STK A, 15.04.2018.
- GÜNDER (Uluslararası Güneş Enerji Topluluğu), “Derinlemesine Mülakat”, STK B, 20.03.2018.
- GÜYAD (Güneş Enerjisi Yatırımcıları Derneği), “Derinlemesine Mülakat”, STK C, 25.06.2018.
- Heinrich Böll Stiftung Derneği, “Derinlemesine Mülakat”, STK D, 16.02.2018.
- İKV (İktisadi Kalkınma Vakfı) “Derinlemesine Mülakat”, Hükümet Dışı Örgütler C”, 22.05.2018.
- İstanbul Sanayi Odası, Enerji Uzmanı, “Derinlemesine Mülakat”, Hükümet Dışı Örgütler A, 12.02.2018.
- İstanbul Teknik Üniversitesi, “Derinlemesine Mülakat”, Akademisyen H, 03.05.2018.
- Marmara Üniversitesi, “Derinlemesine Mülakat”, Akademisyen G, 18.04.2018.
- Sabancı Üniversitesi, “Derinlemesine Mülakat”, Akademisyen F, 23.05.2018.
- Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) A, “Derinlemesine Mülakat”, A Bürokrat, 13.03.2018.
- YEGM B, “Derinlemesine Mülakat”, B Bürokrat, 03.05.2018.
- YDD (Yeşil Düşünce Derneği), “Derinlemesine Mülakat”, STK E, 05.04.2019.
- Yıldız Teknik Üniversitesi, “Derinlemesine Mülakat”, Akademisyen A, 19.02.2018. 543

A YEKDEM ASSESSMENT FOR SOLAR ENERGY BETWEEN 2015-2023 IN TURKEY**Murat ERDEM^a**^a Firat University, Technical Vocational School, 23119, Elazig, Turkey
ORCID: 0000-0003-0287-1881**Mert GÜRTÜRK^b**^b Firat University, Technology Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 23100 Elazig, Turkey
ORCID: 0000-0003-0380-5781**Abstract**

This study is about Solar energy, one of Turkey's new renewable energy resources support mechanisms (YEKDEM). The analysis covers January 2015 and June 2023. In other words, the initial support amount of YEKDEM was started in January 2015. Calculations were made assuming that the weather was completely sunny. Capital cost flow is made for 0% and 10% interest rates. The $YEKDEM_{GD}$ values were found to be between 106.94 TL-kurus/kWh and 871.83 TL-kurus/kWh, respectively. Since these values are very high, they exceed the upper limit. Therefore, it would be more appropriate to implement the YEKDEM program at a later date for these boundary conditions. The total cost of a 1 MW solar power plant (SPP) for 2023 is calculated as 864,517 US\$. The average Payback period (PO) is 1.2 years.

Key words: Solar energy, Solar power plant, Capital cost flow, YEKDEM

1. Introduction

Due to population growth and socioeconomic advancement in various industries, energy demand has greatly increased [1,2]. Fossil fuels, which produce higher amounts of greenhouse gas (GHG) emissions in the atmosphere, primarily meet the world's energy needs. Governments all around the Globe are under pressure to reduce GHG emissions in order to keep global warming to 1.5 °C or less, as stated in the 2015 Paris Agreement and United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [3]. According to those accords, the EU Parliament and its member states have made an agreement to reduce greenhouse gas (GHG) emissions by at least 55% by 2030 compared to 1990 levels and achieve carbon neutrality by 2050 [4].

The balancing of social, environmental, technical, economic, and political issues enables enable sustainability in the energy sector to be overcome [5,6]. A sustainable energy transition involves the use of renewable energy. Its implementation relies on both bottom-up advances [7] that focus on social acceptance through participatory and consensus decision-making, and some initiatives [8] that stimulate the industry and make technology affordable through legislation and incentives.

In many countries around the world, governments are developing various policies for a sustainable environment. The most important of these policies is the mechanism to support renewable energy. For this reason, countries are implementing their own national support mechanisms to encourage this clean and cheap energy:

Incentives such as tax reductions in China and the United States [9,10], feed-in tariffs in France and Ireland [11,12], and financial assistance in India [13] are implemented.

In Turkey, as in the world, the Renewable Energy Resources Incentive Mechanism, shortly known as YEKDEM, has been implemented since 2005 to reduce fossil fuel consumption and encourage the use of renewable energy resources [14]. Although this mechanism started with some methods such as feed-in tariff guarantee and was subject to some changes in the ongoing process, it was changed again in 2021, unlike previous programs. This program was put into service with a mathematical correlation that could change depending on the Dollar, EURO, PPI and CPI [15]. However, since the incentive program in 2021 was considered insufficient to meet the needs of investors, the authorities changed it again in 2023 and updated it by changing the coefficient of some parameters of the previous one, and this system is still valid today [16].

The aim of this study is to investigate the suitability of the YEKDEM program, which Turkey recently announced, assuming that the weather is completely sunny, according to the analysis results between 2015-2023.

2. Materials and Method

2.1. Calculations and application conditions of the incentive program

Renewable energy sources support mechanism (YEKDEM_{GD}) application prices and domestic contribution prices (YKF_{GD}) determined for the YEK certified production facilities that are put into operation from 01/07/2021 to 31/12/2030 are updated according to Eq. (1).

$$\frac{YEKDEM_{GD}}{YKF_{GD}} = \frac{YEKDEM_{OGD}}{YKF_{OGD}} \times \left[\left(\frac{25}{100} \times \frac{PPI_{A-2}}{PPI_{A-3}} \right) + \left(\frac{15}{100} \times \frac{CPI_{A-2}}{CPI_{A-3}} \right) + \left(\frac{30}{100} \times \frac{EXC.RATE_{D-1}}{EXC.RATE_{D-2}} \right) + \left(\frac{30}{100} \times \frac{EXC.RATE_{E-1}}{EXC.RATE_{E-2}} \right) \right] \quad (1)$$

Here, YEKDEM_{GD}: Calculated monthly YEK support mechanism application price (Turkish Lira kurus/kWh), YEKDEM_{OGD}: YEK support mechanism application price calculated for the previous month (Turkish Lira kurus/kWh), YKF_{GD}: Current Domestic Contribution Price to be applied for any monthly period (Turkish Lira kurus/kWh), YKF_{OGD}: Domestic Contribution Price calculated for the previous month (Turkish Lira kurus/kWh), PPI_{A-2}: Domestic Producer Price Index belongs to the second month before the first month of the month period when the current YEKDEM prices that been valid, PPI_{A-3}: Domestic Producer Price Index belongs to the third month before the first month of the month period when the current YEKDEM prices that been valid, CPI_{A-2}: Domestic Consumer Price Index belongs to the second month before the first month of the month period when the current YEKDEM prices that been valid, CPI_{A-3}: Domestic Consumer Price Index belongs to the third month before the first month of the month period when the current YEKDEM prices which been valid. EXC.RATE_{D-1}: The average of the daily US\$ buying rates published by the Central Bank of the Republic of Turkey in the month preceding the month in which the current YEKDEM application price that been valid, EXC.RATE_{D-2}: The average of the daily US\$ buying rates published by the Central Bank of the Republic of Turkey in the second month before the month in which the current YEKDEM application price that been valid, EXC.RATE_{E-1}: The average of the daily Euro buying rates published by the Central Bank of the Republic of Turkey in the month preceding the month in which the current YEKDEM application price that been valid, EXC.RATE_{E-2}: The average of the daily Euro buying rates published by the Central Bank of the Republic of Turkey in the second month before the month in which the current YEKDEM application price which been valid [16].

2.2. Solar radiation and cost calculations

An overview of the approach used in the analysis's estimations of solar energy can be seen below. Further information about the process can be found in the articles listed below [17].

Using Eq. (2), the amount of solar radiation at the PV module's surface at the ideal angle is calculated [18,19].

$$I_s = I \cdot R_B \quad (2)$$

Researchers frequently employ levelized cost analysis (LCA) as a method in the literature. As a result, the key equations are given here in brief. For more specific details, please refer to the source, [19].

$Z\&$ is the cost flow of capital [20,21].

$$Z\& = Z\&^{CI} + Z\&^{OM} \quad (3)$$

where $Z\&^{CI}$ the capital investment's levelize hourly cost is displayed. $Z\&^{OM}$ shows the levelized hourly cost of upkeep and service for the solar power facility.

The current value of the studied photovoltaic solar power the plant (PW) [22,23].

$$PW = TC - S \cdot PWF_{(i_{eff},N)} \quad (4)$$

Total capital investment (TCI) is expressed in US\$ in Eq. (3), and the salvage value of the solar power plant is denoted by "S" [24–26]

$$S = TCI \cdot J \quad (5)$$

where J, the salvage value ratio, Eq. (6) is used to get the solar power plant's present value factor (PWF) [26,27].

$$PWF = \frac{1}{(1+i_{eff})^N} \quad (6)$$

The single payment present-worth factor is known as the PWF [24]. In this case, N, the system's lifetime, is calculated to be 25 years. The term "effective discount rate" is i_{eff} [28,29].

$$i_{eff} = \left(1 + \frac{i}{p}\right)^p - 1 \quad (7)$$

The yearly compound interest rate, or P, is a measure of how much money costs. The cost of money is determined by adding the total credit amount from all sources and the interest rates that are established by each source. Since there is just one source of money taken into consideration in this analysis, the cost of money is equal to the interest rate. The study's analysis of the interest rate fell under the category of economic information regarding PV-module-based solar power facilities and these are the annual capital costs [28,30]:

$$AC = PW \cdot CRF_{i_{eff},N} \quad (8)$$

Recoverability of capital factor Eq. (9) is used to calculate CRF [14,16].

$$CRF = \frac{i_{eff}(1+i_{eff})^N}{(1+i_{eff})^N - 1} \quad (9)$$

For solar power plants ($Z^{\&}$), the equipments annualized cost is founded as [15,30].

$$Z^{\&} = \frac{\phi AC}{3600 (s/h) \tau (h/year)} \quad (10)$$

Where τ , the approximate yearly operating system hours, is found. The solar power plant based on PV modules has maintenance and operation costs of ϕ . The hourly levelised capital investment $Z^{\&C^I}$ cost for the SPP is as:

$$Z^{\&C^I} = \frac{AC}{\tau} \quad (11)$$

Eq. (12), taking into account the operating and maintenance economic aspects, is used to make the estimate.

$$Z^{\&O^M} = \frac{OM}{\tau} \quad (12)$$

Comparison of radiation values according to full sunny conditions throughout the year for Antalya in Turkey given in Fig. 1 [31]. When the figure is examined, it is seen that the radiation values are higher in the middle of the day than at other hours, as expected. Likewise, the high radiation values in the summer months are noticeable. Assuming that the weather is cloudless, the radiation value goes up to 745 W/m². However, it is a bit unrealistic for the weather to be completely sunny throughout the year.

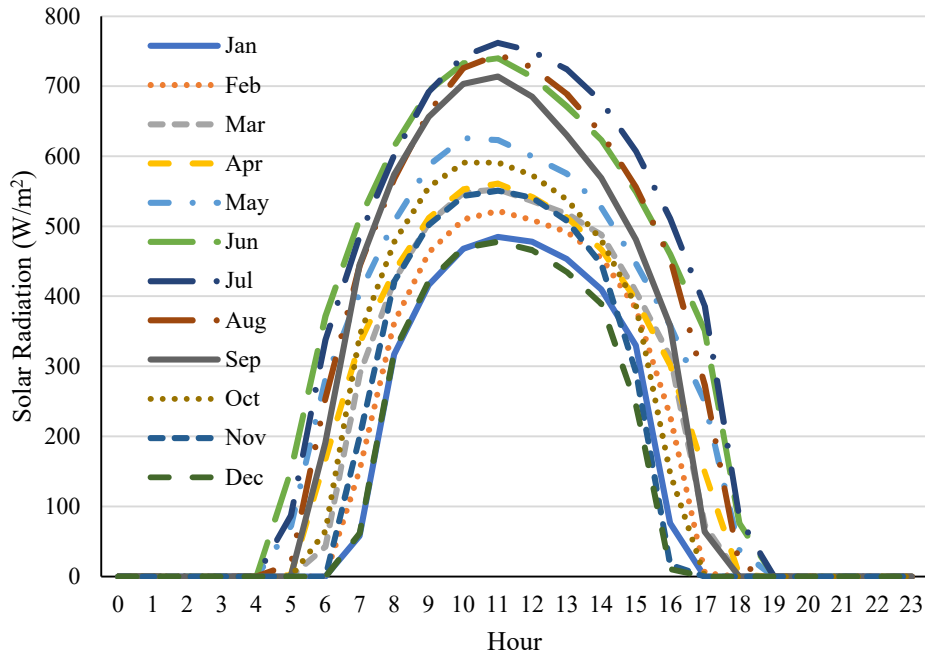
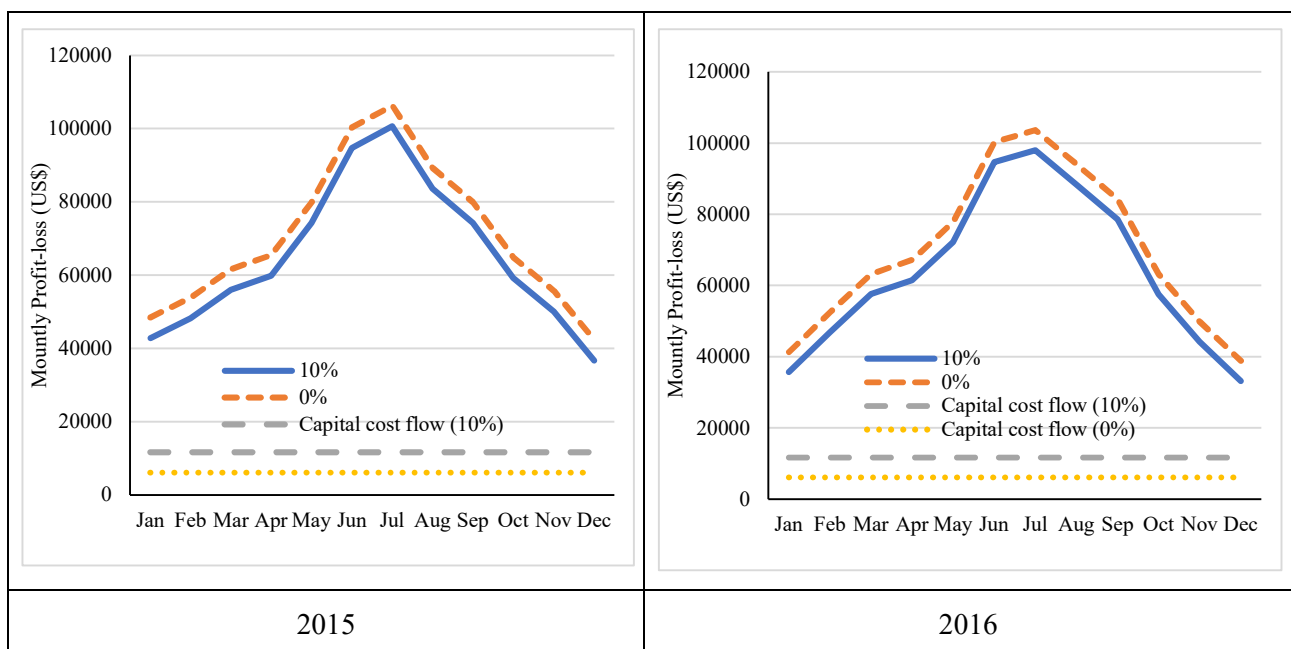
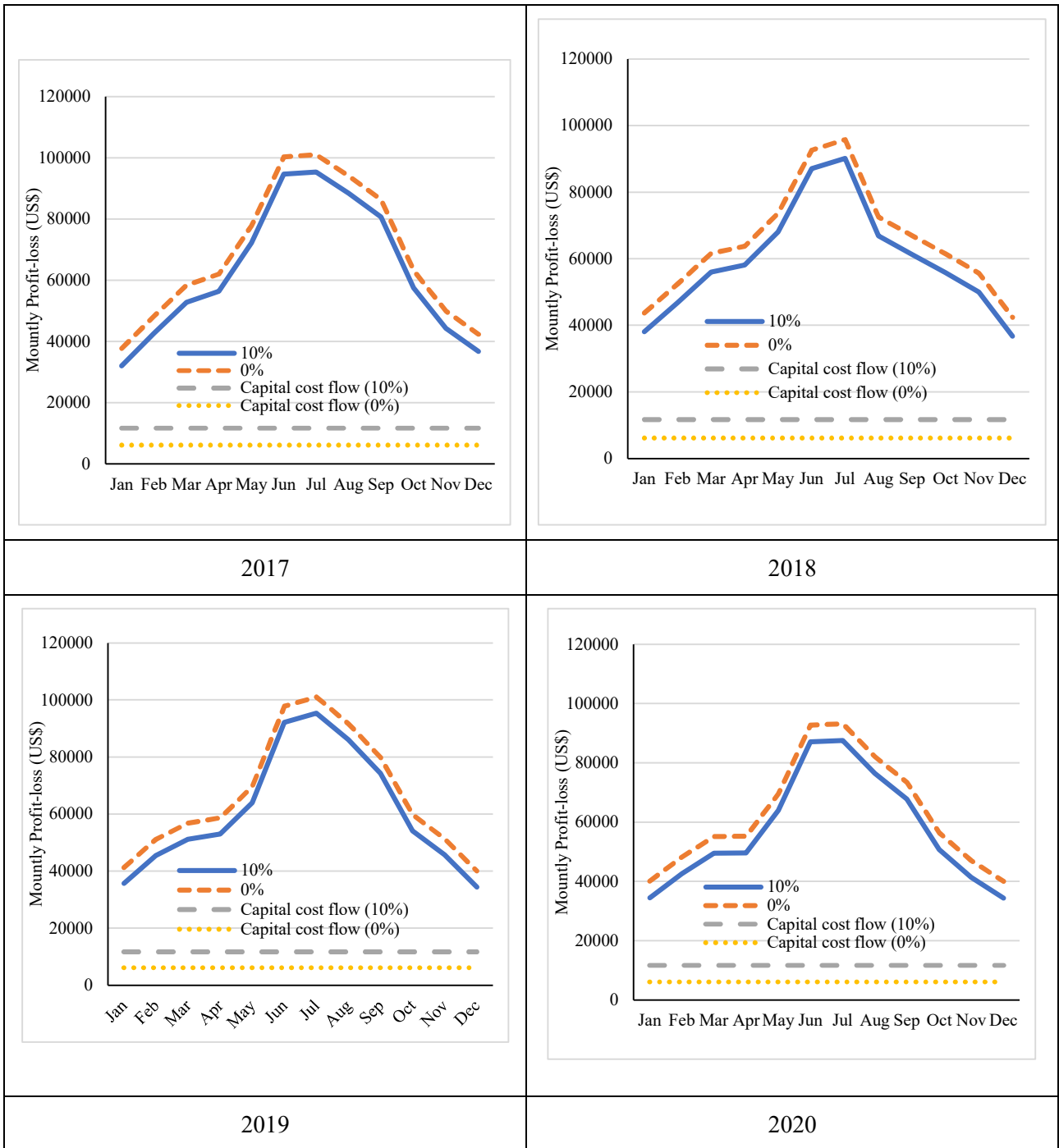


Fig. 1. Comparison of radiation values according to full sunny conditions throughout the year for Antalya in Turkey [31].

3. Results and Discussion

Within the scope of this study, the incentive amounts to be given to solar power plant investors between January 2015 and June 2023 regarding Turkey's renewable energy resource support mechanisms were analyzed. Together with YEKDEM, the total cost of a solar power plant was calculated as 864,517 US\$ and the payback period for this was found to be 1.2 years on average. Here, it is assumed that the incentive application started in 2015 under the current border conditions. The findings are presented and discussed in Figure 2. The initial support amount of YEKDEM application is 106 TL kurus/kWh, while the lower and upper limit values of YEKDEM are 4.95 TL kurus/kWh and 6.05 TL kurus/kWh, respectively.





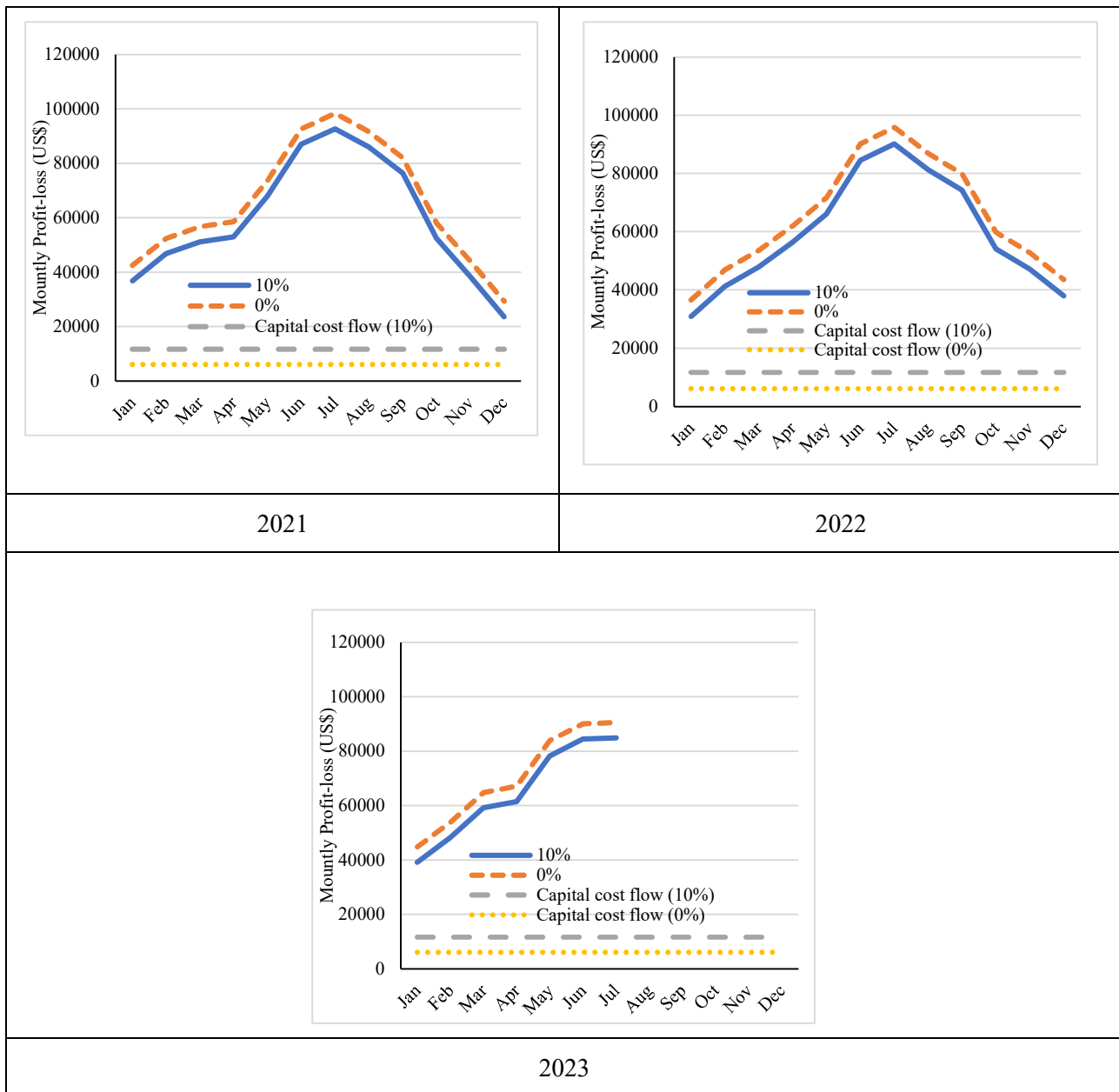


Fig. 2. Monthly profit-loss situation with date YEKDEM 2023 applied between 2015-2023 (Full sunny).

If the amount of YEKDEM to be given as a result of the calculations is below this lower limit, the lower value of 4.95 US\$/kWh will be applied in order to prevent the investor from suffering. If the amount of YEKDEM to be given is above 6.05 US\$/kWh, the fixed value of 6.05 US\$/kWh will be applied this time, in which case the state aims to protect itself in order not to suffer losses. However, all of the incentive amounts to be given here are much higher than the upper limit. The reason for this is that the YEKDEM starting price was started a long time ago.

The lowest and highest values of $YEKDEM_{GD}$ obtained on a yearly basis are given in Table 1 below. These values are obtained as TL-kurus/kWh.

Table 1. The lowest and highest values of YEKDEM_{GD}.

Year	The lowest month	The lowest value (TL-kurus/kWh)	The highest month	The highest value (TL-kurus/kWh)
2015	January	106.94	October	124.01
2016	May	121.22	December	132.33
2017	January	137.44	December	159.30
2018	January	160.10	December	219.44
2019	January	216.02	June	235.52
2020	January	233.23	December	304.90
2021	March	294.27	December	403.53
2022	January	483.35	December	788.25
2023	January	803.51	June	871.83

In general, the lowest and highest values were found in January and December, respectively. These values are 106.94 TL-kurus/kWh for January 2015 and 871.83 TL-kurus/kWh for June 2023, respectively. Other values were calculated in this range.

4. Conclusions

This study is related to an analysis covering the years 2015-2023 regarding the YEKDEM announced by the Republic of Turkey in 2023. Here, while determining the amounts to be given in US Dollars, it was assumed that the weather was completely sunny. This causes the sales price of electricity obtained with solar energy to be high. In addition, it was observed that the obtained YEKDEM values were well above the lower and upper limit values in TL-kurus/kWh. From here, the initial application price and lower-upper limit values to be determined during the implementation of this incentive program should be determined according to the date it was announced. The lowest and highest YEKDEM values were calculated as 106.94 TL-kurus/kWh and 871.83 TL-kurus/kWh in 2015 and 2023, respectively. Also, together with YEKDEM, the total cost of a solar power plant was calculated as 864,517 US\$ and the payback period for this was found to be 1.2 years on average.

References

- [1] Achkari O, El Fadar A. Latest developments on TES and CSP technologies – Energy and environmental issues, applications and research trends. *Appl Therm Eng* 2020;167:114806. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114806>.
- [2] Gobio-Thomas LB, Darwish M, Stojceska V. Environmental impacts of solar thermal power plants used in industrial supply chains. *Therm Sci Eng Prog* 2023;38:101670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101670>.
- [3] UNFCCC 2022. About the Secretariat. Available at: About the Secretariat | UNFCCC. No Title. n.d.
- [4] European Commission 2022a. 2030 Climate Target Plan. Available at: No Title n.d. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan_en.
- [5] Yilan G, Kadirgan MAN, Çiftçioğlu GA. Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey. *Renew Energy* 2020;146:519–29. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.164>.
- [6] Gönül Ö, Duman AC, Barutçu B, Güler Ö. Techno-economic analysis of PV systems with manually adjustable tilt mechanisms. *Eng Sci Technol an Int J* 2022;35. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101116>.
- [7] Fontaine A. Debating the sustainability of solar energy: Examining resource construction processes for local photovoltaic projects in France. *Energy Res Soc Sci* 2020;69:101725. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101725>.
- [8] D'Adamo I, Gastaldi M, Morone P. The post COVID-19 green recovery in practice: Assessing the

- profitability of a policy proposal on residential photovoltaic plants. *Energy Policy* 2020;147:111910. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111910>.
- [9] Ding L, Kinnucan HW. This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search . Help ensure our sustainability . *J Gender, Agric Food Secur* 2011;1:1–22.
- [10] China Institute, China's renewable energy & Clean-Tech Market, Sum-mary Report, (March) U of A. No Title. 2016.
- [11] Celik AN, Özgür E. Review of Turkey's photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110344>.
- [12] Huber C, Ryan L, Ó Gallachóir B, Resch G, Polaski K, Bazilian M. Economic modelling of price support mechanisms for renewable energy: Case study on Ireland. *Energy Policy* 2007;35:1172–85. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.01.025>.
- [13] De La Flor FJS, Cebolla RO, Félix JLM, Domínguez SÁ. Solar radiation calculation methodology for building exterior surfaces. *Sol Energy* 2005;79:513–22. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.12.007>.
- [14] Renewable T newspaper of public record of TT law on the U of, 10/ ES (RES) for the purpose of generating energy. LN 5346 of, 05/2005. No Title n.d. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/05/20050518-1.htm>.
- [15] Gazette of republic of Turkey. Turkish Gov Leg Gaz Repub Turkey 2021. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/01/20210130-9.pdf>.
- [16] Gazette of republic of Turkey. Turkish Gov Leg Gaz Repub Turkey 2023. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/05/20230501-7.pdf>.
- [17] Gürtürk M, Ucar F, Erdem M. A novel approach to investigate the effects of global warming and exchange rate on the solar power plants. *Energy* 2022;239:122344. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122344>.
- [18] Elazab OS, Debouza M, Hasanién HM, Muyeén SM, Al-Durra A. Salp swarm algorithm-based optimal control scheme for LVRT capability improvement of grid-connected photovoltaic power plants: Design and experimental validation. *IET Renew Power Gener* 2020;14:591–9. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0726>.
- [19] T. Sternkopf L sources on renewable energy-P in G. No Title. n.d.
- [20] Lüthi S. Effective renewable energy policy: empirical insights from choice experiments with project developer. 2011.
- [21] Mir-Artigues P, Cerdá E, Del Río P. Analyzing the impact of cost-containment mechanisms on the profitability of solar PV plants in Spain. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;46:166–77. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.005>.
- [22] Pearce JM, Sommerfeldt N. Economics of grid-tied solar photovoltaic systems coupled to heat pumps: The case of northern climates of the U.S. and Canada. *Energies* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14040834>.
- [23] Michaud G. Perspectives on community solar policy adoption across the United States. *Renew Energy Focus* 2020;33:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.01.001>.
- [24] Funkhouser E, Blackburn G, Magee C, Rai V. Business model innovations for deploying distributed generation: The emerging landscape of community solar in the U.S. *Energy Res Soc Sci* 2015;10:90–101. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.07.004>.
- [25] Muhammed G, Tekbiyik-Ersoy N. Development of renewable energy in china, usa, and brazil: A comparative study on renewable energy policies. *Sustain* 2020;12:1–30. <https://doi.org/10.3390/su12219136>.
- [26] Kılıç U, Kekezoğlu B. A review of solar photovoltaic incentives and Policy: Selected countries and Turkey. *Ain Shams Eng J* 2022;13. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101669>.
- [27] Zhao X, Luo D. Driving force of rising renewable energy in China: Environment, regulation and

employment. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;68:48–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.126>.

- [28] Lo K. A critical review of China’s rapidly developing renewable energy and energy efficiency policies. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;29:508–16. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.006>.
- [29] Rahman Mohamed A, Lee KT. Energy for sustainable development in Malaysia: Energy policy and alternative energy. *Energy Policy* 2006;34:2388–97. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.003>.
- [30] The T newspaper of public record of TC on the law N 5346 on, Energy. utilization of renewable energy sources (RES) for the purpose of generating, 29/12/2010 LN 6094 of. No Title n.d. The newspaper of public record of Turkey. Changes on the law No. 5346 on the %0Autilization of renewable energy sources (RES) for the purpose of generating energy. %0ALaw No. 6094 of 29/12/2010.
- [31] GEPA. GEPA 2021. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>].

**GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİNDE BİYOPOLİMERLERİN KULLANIMI VE ÖNEMİ****Dilan ALP**

Assist. Prof. Dr., Şırnak University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems of Engineering, Şırnak-Türkiye, ORCID:0000-0001-7385-2659

Azize ACAR

Postgraduate Student, Şırnak University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems of Engineering, Şırnak-Türkiye, ORCID:0009-0003-1544-0439

Özet

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve çevre dostu çözümlere duyulan ihtiyaç güneş hücreleri teknolojisinde birçok bilimsel çalışmaya yön ve ivme kazandırmıştır. Yüksek enerji verimliliği sağlayan konvansiyonel güneş hücreleri ve panel teknolojileri yanı sıra, üretim proseslerinde ekolojik etkiler de göz önünde bulundurularak üretilen biyobozunur ve toksik olmayan biyopolimer güneş hücre verim analizleri literatürde güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, selüloz, kitosan, misel ve lignin gibi biyopolimerlerin güneş hücrelerinde fotovoltaiik performans etkileri ve hibrit sistemlerdeki katkıları incelenmiştir. Özellikle grafen oksit, plazmonik nanopartiküller ve diğer nanokompozitlerle oluşturulan sinerjik etkiler sayesinde biyopolimerlerin optik ve elektriksel özelliklerinin geliştirilerek enerji dönüşüm verimliliğinin artırılabilceği vurgulanmaktadır. Türkiye'de biyopolimerlerin güneş hücresi uygulamalarındaki potansiyeli üzerine istatistiksel bir analiz yapılmış ve bu teknolojilerin karbon ayak izi üzerindeki olumlu etkileri incelenmiştir. Ülkemizde yenilenebilir enerji yatırımları, biyopolimer bazlı güneş hücresi uygulamalarının mevcut durumu değerlendirilmiştir. Çalışma, biyopolimerlerin biyolojik kaynaklardan elde edilme süreçleri ve çevresel avantajlarını ele alarak, güneş enerjisi teknolojilerinde sürdürülebilirlik odaklı yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyopolimerler, Güneş Hücreleri, Yenilenebilir Enerji, Nanopartiküller, Nanokompozitler.

THE USE AND IMPORTANCE OF BIOPOLYMERS IN SOLAR CELL PRODUCTION**Abstract**

The sustainability of renewable energy sources and the growing demand for environmentally friendly solutions have stimulated numerous scientific advancements in solar cell technology. While conventional solar cells and panel technologies offer high energy efficiency, recent studies are increasingly focusing on biodegradable and non-toxic biopolymer-based solar cells, which are developed with an emphasis on reducing ecological effect during production processes. In this study explores the influence of biopolymers such as cellulose, chitosan, micelles, and lignin on the photovoltaic performance of solar cells, as well as their contributions in hybrid systems. Notably, the synergistic effects with graphene oxide, plasmonic nanoparticles, and other nanocomposites have been highlighted for their potential to enhance the optical and electrical properties of biopolymers, thereby increasing energy conversion efficiency. A statistical analysis was conducted to assess the potential of biopolymers in solar cell applications within Turkey, alongside an evaluation of the positive impact of these technologies on reducing carbon footprints. The current status of biopolymer-based solar cell applications in Turkey's renewable energy sector was also explored. This study aims to contribute to the development of innovative, sustainability-focused approaches in solar energy technologies by examining the processes of obtaining biopolymers from biological resources and their associated environmental benefits.

Keywords: Biopolymers, Solar Cells, Renewable Energy, Nanoparticles, Nanocomposites.

1. GİRİŞ

Artan enerji talebi ve çevresel kaygılar, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır. Özellikle nüfus artışı ve artan yaşam standartlarının yaygın olduğu gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacı küresel olarak artmaktadır. Bu eğilimin devam etmesi ve önümüzdeki yıllarda enerji kaynaklarına daha yüksek bir talebe yol açması bekleniyor. Ülkemizde artan enerji talebi ve çevre sorunları ele alındığında, fosil yakıtlara güven ve çevresel etkiler, kilit noktalar olarak öne çıkmaktadır.

Fosil yakıtlar uzun yıllardır birincil enerji kaynağı olmuştur. Bununla birlikte, yaygın kullanımları, kirlilik ve iklim değişikliği de dahil olmak üzere önemli çevre sorunlarına neden olmuştur. Bu yenilenemeyen kaynaklara bağımlılık, rezervler tükendiği için bir risk oluşturuyor.

Fosil yakıtlarla ilişkili çevresel kaygılar kritiktir. Fosil kaynakların kullanımı çeşitli ekolojik sorunlara sebep oluyor ve bu da daha sürdürülebilir enerji teknolojilerine geçmeyi gerektiriyor [1].

Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerjilerin kullanımı, ışık enerjisini herhangi bir zararlı çevresel etki olmaksızın doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmesi nedeniyle dikkat çekmiştir. Güneş enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir rol oynaması, bu teknolojinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, güneş hücrelerinde kullanılan malzemelerin geliştirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir öneme sahiptir. Bu hedeflere uygunluk açısından biyopolimerler, benzersiz yapısal özellikleri ve çevre dostu üretim süreçleriyle dikkat çekmektedir. Güneş hücreleri gibi ileri teknoloji uygulamalarında biyopolimerlerin kullanımına geçmeden önce, bu malzemelerin özelliklerini ve üretim süreçlerini anlamak kritik önem taşımaktadır.

Biyopolimerler bitkiler, hayvanlar, mikroplar ve mantarlar tarafından yaşam döngüleri boyunca üretilen doğal olarak oluşan bileşiklerdir. Biyopolimerler; doğal, yenilenebilir ve petrol kaynaklı olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Doğal kaynaklı biyopolimerler, polisakkaritler (nişasta, selüloz ve kitosan) ve proteinler (jelatin ve soya proteini) gibi maddeleri içerir. Yenilenebilir kaynaklı biyopolimerler, kimyasal sentez (polilaktik asit ve poliglolikolik asit) veya mikrobiyal sentez (polihidroksialkanoatlar, polihidroksibutirat ve polihidroksibutirat-valerat) yöntemleriyle üretilmektedir. Petrol kaynaklı biyopolimerler ise alifatik ve aromatik polimerleri kapsar. Bu sınıflamalar, biyopolimerlerin üretim yöntemlerine ve kaynaklarına göre çeşitliliğini göstermektedir [2].

BIYOPOLİMERLERİN SINIFLANDIRILMASI



Biyopolimerler kimyasal sentez ve biyolojik substratlar kullanılarak doğal kaynakların çeşitli kimyasal işlemlerle polimerik yapıya dönüştürülmesi ile elde edilebilir. Ayrıca biyopolimerler, canlı organizmaların biosentetik yollarıyla da üretilebilir; mikroorganizmalar, flora ve fauna bu süreçte önemli rol oynar. Bitkisel yağların polimerizasyonu, biyopolimer üretiminde etkili diğer bir yöntemdir. Soya yağı, hint yağı ve keten tohumu yağı gibi yağlar, dolgu maddeleri ve liflerle birlikte polimerize edilerek düşük maliyetli ve sürdürülebilir malzemeler elde edilir. Elektroegirme tekniği ise, örneğin kitosan ve poli(vinil alkol) (PVA) kombinasyonu gibi, biyopolimer liflerin üretilmesi için yaygın olarak kullanılır. Bunun yanında, karbondioksit (CO₂) çeşitli monomerlerle kopolimerize edilerek elde edilen polimerlerin termal stabilitesini artırabilir. Eriyik bileşimi metodolojisi, biyopolimerlere ek malzemelerin entegre edilmesiyle, poli(propilen karbonat) ve termoplastik poliüretan gibi kompozitlerin geliştirilmesini mümkün kılar. Çözelti döküm yöntemi ise, biyopolimerlerin çözücüler içinde çözülerek filmlere dönüştürülmesini içerir; bu yöntemle, magnezyum oksit (MgO) bırıkları ile güçlendirilmiş polilaktik asit (PLA) bazlı filmler gibi malzemeler üretilebilir. Bu tekniklerin her biri, biyopolimerlerin özelliklerini geliştirmek ve farklı uygulama alanlarında kullanılabilir hale getirmek için yenilikçi çözümler sunmaktadır [4].

Biyopolimerler, çevre dostu özellikleriyle dikkat çeken malzemelerdir. Doğal ortamlarda mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanabilir olmaları, plastik atık birikimini azaltarak çevre kirliliğini en aza indirir. Ayrıca, biyopolimerlerin üretimi ve bozulması sırasında geleneksel petrol bazlı plastiklere kıyasla daha düşük sera gazı emisyonları ortaya çıkar. Bu özellikleri sayesinde, iklim değişikliğini azaltmaya ve karbon ayak izini küçültmeye önemli katkılarda sağlar.

Yenilenebilir kaynaklardan (örneğin bitkiler ve mikroorganizmalar) elde edilen biyopolimerler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve sürdürülebilir malzeme kullanımını teşvik eder. Aynı zamanda doğal süreçlerle geri dönüştürülebilir olmaları büyük avantajdır. Depolimerazlar tarafından oligomere ve monomere ayrışarak CO₂ ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklara dönüşmeleri mümkündür. Bu durum, döngüsel ekonomiyi destekleyen bir avantaj sunar.

Ambalaj ve gıda servis ürünleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılan biyopolimerler, bozulma süreçlerinde çevreye zararlı kimyasallar salmaz. Bu da onları çevre açısından güvenli bir alternatif haline getirir. Ofis malzemeleri, gıda ambalajları ve tarımsal malzemeler gibi ürünlerde geleneksel plastiklerin yerini alarak genel plastik kirliliğinin azalmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Böylece daha temiz ekosistemlerin korunması ve vahşi yaşam üzerindeki etkinin en aza indirilmesi sağlanabilir. Tüm bu özellikler, biyopolimerlerin çevresel faydalarını ve sürdürülebilirlik açısından sunduğu avantajları net bir şekilde ortaya koymaktadır [5].

2. BİYOPOLİMERLERİN GÜNEŞ HÜCRELERİNDE KULLANIMI

2.1 Geleneksel Güneş Hücresi Teknolojilerinin Zorlukları ve Alternatif Olarak Biyopolimer Destekli Güneş Hücrelerinin Potansiyeli

Silikon bazlı güneş hücreleri, fotovoltaik teknolojinin öncüsü olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu teknolojilerin çeşitli zorluklar içerdiği görülmektedir. Çevresel ve sağlıkla ilgili kaygılar, bu zorlukların başında gelir. Silikon güneş hücrelerinin ömrü dolduğunda geri dönüşümü zor olabilmektedir. Özellikle, bazı toksik veya nadir bulunan materyallerin geri dönüşüm süreci çevresel sürdürülebilirlik açısından uygun değildir. Bu durum, atık yönetiminde sorunlara yol açmaktadır [6]. Silikon güneş hücrelerinin üretim süreçleri sırasında açığa çıkan atık ve zararlı emisyonlar, çevreye zarar verme potansiyeline sahiptir. Bu süreçler ayrıca enerji yoğun olduğundan, karbon ayak izi de yüksektir. Silikon güneş pillerinin üretimi için gereken yüksek sermaye yatırımı ve kullanılan ileri düzey üretim yöntemleri, kurulum maliyetlerini artırarak geri ödeme sürelerini uzatmaktadır.

Verimlilik açısından bakıldığında, silikon güneş hücreleri genelde %14 ile %19 arasında bir enerji dönüşüm oranına sahiptir. Bu oran, teorik maksimum olan %30'a kıyasla düşüktür ve mevcut teknolojilerin performansını artırmaya yönelik yeniliklerin gerekliliğini vurgular. Bu sınırlamaların önemli bir kısmı, silikonun malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Işığı emme kapasitesini etkileyen bant boşluğu, silikonun performansını kısıtlamaktadır. Alternatif malzemelerin veya hibrit teknolojilerin geliştirilmesi, bu eksikliklerin giderilmesinde kritik bir rol oynayabilir.

Silikon tabanlı güneş hücrelerinin üretimi, yüksek sıcaklıklarda yapılmak zorundadır. Bu durum, üretim sürecinde önemli miktarda enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu enerji yoğun süreç, karbon ayak izini artırarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını zorlaştırmaktadır. Saf silikon kristalleri üretmenin yüksek maliyeti nedeniyle silikon bazlı güneş üretimi zorlu hale getirir [6].

Tüm bu zorluklarla başa çıkmak için silikon tabanlı teknolojilerde bazı iyileştirmeler gereklidir. Daha yüksek verimlilik sunan yeni malzemelerin ve üretim süreçlerinin geliştirilmesi, maliyetlerin düşürülmesinde önemli rol oynayabilir. Ayrıca, üretimin çevresel etkilerini azaltmayı hedefleyen yöntemler, bu teknolojilerin sürdürülebilirliğini artırabilir. Örneğin, üretim süreçlerinde atık yönetimi stratejilerinin benimsenmesi ve daha az enerji tüketen süreçlerin uygulanması faydalı olabilir.

Geleneksel silikon teknolojisinin bu sınırlamalarına karşılık, biyopolimer katkılı güneş hücreleri umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Biyopolimerler; esneklik, hafiflik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, çevre dostu yapıları sayesinde toksik maddelerin kullanımını en aza indirirler. Bu malzemeler, grafen oksit ve plazmonik nanoparçacıklar gibi yenilikçi bileşenlerle birleştirildiğinde, güneş hücrelerinin verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Biyopolimer bazlı güneş hücrelerinin üretimi, daha düşük enerji tüketimi gerektirir ve çevreye olan etkisi minimum seviyededir [7].

Biyomalzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla birçok önemli avantaja sahiptir. Doğadaki olağanüstü mekanik özelliklere sahip hiyerarşik yapılardan esinlenerek geliştirilen bu malzemeler, stres altında üstün performans göstermektedir. Örneğin, örümcek ipeği, çelikle karşılaştırılabilir bir gerilme mukavemetine sahip olmasına rağmen çok daha hafif bir yapıya sahiptir. Bu tür malzemelerdeki hiyerarşik düzenleme, geleneksel malzemelere kıyasla dayanıklılığı ve mukavemeti artırmaktadır.

Doğadan ilham alınarak tasarlanan biyomalzemelerin bir diğer önemli avantajı ise üretim süreçlerinin çevre dostu olmasıdır. Bu malzemelerin yenilenebilir biyolojik kaynaklardan elde edilebilmesi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltırken çevresel etkileri de en aza indirmektedir. Bu durum, sürdürülebilirlik odaklı endüstrilerde artan taleplerle uyumlu bir çözüm sunar. Enerji uygulamalarında da geleneksel malzemelere kıyasla daha verimli oldukları görülmektedir. Örneğin, aktif karbon ve zeolit gibi biyobenzetim sorbent malzemeler, adsorpsiyon süreçlerinde enerji tasarrufu sağlayarak önemli bir avantaj oluşturur.

Ayrıca, bu malzemeler çevresel uyarılara duyarlı özellikler sergileyebilir. Sıcaklık veya nem değişimlerine adapte olabilmeleri kapasiteleri, işlevselliklerini artırarak onları bu tür özelliklerden yoksun geleneksel malzemelere göre daha etkili hale getirmektedir. Bütün bu özellikler bir arada değerlendirildiğinde, biyomimikri malzemeler, gelişmiş mekanik performansları, çevresel sürdürülebilirlikleri, enerji verimliliği ve uyarlanabilir yapılarıyla modern endüstriyel ve çevresel zorlukları karşılamak için güçlü bir alternatif sunmaktadır [8].

Özellikler	Selüloz	Nişasta	Lignin	Misel
Optik Özellikler	Yüksek ışık yayma ve absorpsiyon	Orta ışık geçirgenliği	Düşük ışık geçirgenliği	Yüksek ışık geçirgenliği, düşük absorpsiyon
Elektriksel Özellikler	Düşük elektriksel iletkenlik	Yüksek dielektrik sabiti	Orta elektriksel iletkenlik	Yüksek elektriksel iletkenlik
Termal Özellikler	Orta termal iletkenlik, stabil yapı	Orta seviyede termal stabilite	Düşük termal iletkenlik	Yüksek termal stabilite ve iletkenlik
Fotoelektriksel Özellikler	UV stabilitesi, düşük fotovoltaj verimlilik	Orta UV stabilitesi, düşük verimlilik	Düşük UV stabilitesi, düşük verimlilik	Yüksek UV stabilitesi, yüksek verimlilik

Tablo 1. Farklı biyopolimer türlerinin optik, elektriksel, termal ve fotoelektriksel özelliklerinin karşılaştırılması [25-28].

Biyopolimerlerin güneş hücrelerinde optik, elektriksel, termal ve fotoelektriksel özellikleri üzerindeki karşılaştırmalı analiz, bu malzemelerin farklı performanslarına dair önemli içgörüler sunmaktadır. Tablodaki veriler, selüloz, nişasta, lignin ve misel bileşiklerin optik geçirgenlik ve UV dayanıklılığı açısından önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Selüloz ve misel bileşikler, yüksek optik geçirgenlik ve UV dayanımı ile dikkat çekerken, lignin ve nişasta daha düşük verimlilik göstermektedir [25,26]. Ayrıca, selülözün elektriksel ve termal iletkenlik açısından nispeten düşük performansı, misel bileşiklerin daha üstün termal iletkenlik değerleriyle karşılaştırıldığında net bir şekilde vurgulanmıştır [27]. Bu analiz, güneş hücrelerinde biyopolimerlerin çeşitli özellikleri itibari ile faydalarını değerlendiren çalışmalar için temel oluşturur ve malzeme seçimiyle verimlilik artırma potansiyellerine ışık tutar [28].

2.2 Güneş Hücrelerinde Biyopolimer Kullanımı Konusunda Karşılaşılan Teknik Zorluklar

Biyopolimerlerin güneş pillerinde kullanımı, çevre dostu ve yenilenebilir bir alternatif sunmasına rağmen, çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Öncelikle, biyopolimerlerin sınırlı mekanik ve termal özellikleri, güneş pillerinin uzun ömür ve kararlılık gerektiren uygulamalarında performans sorunlarına yol açabilmektedir. Buna ek olarak, biyopolimerlerin üretim maliyetleri genellikle geleneksel petrol bazlı malzemelere göre daha yüksektir. Bu durum, maliyet verimliliğinin önemli bir faktör olduğu güneş pili üretiminde biyopolimerlerin benimsenmesini zorlaştırmaktadır [9].

Biyopolimerlerin güneş pillerinde kullanımı, performanslarını ve ticari uygulanabilirliklerini engelleyebilecek çeşitli teknik zorluklar barındırmaktadır. Öncelikle, biyopolimer bazlı güneş pillerinin dönüşüm verimliliği, geleneksel silikon bazlı güneş pillerine kıyasla genellikle daha düşüktür. Bu düşük verimlilik, özellikle yüksek güç çıkışının gerekli olduğu uygulamalarda biyopolimerlerin kullanımını kısıtlamakta ve pazarda rekabet etmelerini zorlaştırmaktadır.

Bunun yanı sıra, biyopolimerler genellikle geleneksel malzemelere göre daha az dayanıklı ve kararlı bir yapıya sahiptir. UV ışığı, nem ve sıcaklık dalgalanmaları gibi çevresel faktörlere maruz kaldıklarında zamanla bozulabilmektedirler. Bu bozulma hem performansın düşmesine hem de kullanım ömrünün kısalmasına neden olarak uzun vadeli uygulamalarda önemli bir engel oluşturmaktadır. Çevresel koşullara olan bu hassasiyet, sıcaklık ve nemdeki değişikliklerin biyopolimerlerin mekanik özelliklerini ve genel performansını olumsuz etkileyebilmesi nedeniyle, farklı iklim koşullarında kullanılmalılarını da zorlaştırmaktadır.

Ayrıca, biyopolimer güneş pillerinin üretim süreçleri, geleneksel güneş pillerine göre daha karmaşık ve ölçeklenebilirlik açısından daha sınırlıdır. Bu karmaşıklık, üretim maliyetlerini artırmakta ve ticari olarak büyük çaplı üretimlerin gerçekleştirilmesini güçleştirmektedir. Ek olarak, biyopolimerler ve güneş pillerinde kullanılan diğer malzemeler arasında uyumluluğu sağlamak da başka bir zorluktur. Malzeme uyumsuzluğu, zayıf yapışma, faz ayrımı ve cihaz performansının düşmesi gibi sorunlara neden olabilmektedir.

Son olarak, biyopolimer güneş pilleri, geleneksel güneş teknolojilerine kıyasla araştırma ve geliştirme açısından hala erken bir aşamadır. Bu alandaki sınırlı bilgi birikimi ve teknolojik odaklanma, malzeme özelliklerinin ve performans optimizasyonunun daha yavaş ilerlemesine yol açmaktadır. Bu durum, biyopolimerlerin geniş çapta benimsenmesini zorlaştırmaktadır. Tüm bu zorlukların aşılması, biyopolimer bazlı güneş teknolojilerinin ticari ve teknolojik uygulanabilirliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir [10].

2.3 Nanokompozitlerin Sinerjik Etkileriyle Biyopolimerlerin Güneş Hücreleri Uygulamaları için Geliştirilmesi

Nanoparçacıklar ile biyopolimer matrisleri arasındaki sinerjik etkileşimler, çevre dostu özelliklerini korurken elektriksel, termal ve optik özellikleri iyileştirilmiş malzemeler ortaya çıkarmaktadır. Nanoparçacık entegrasyonu yoluyla biyopolimer özelliklerinin iyileştirilmesi, gelişmiş işlevselliğe sahip ileri malzemelerin geliştirilmesi için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır.

Nanoparçacıkların entegrasyonu önemli avantajlar sağlasa da optimum performans için çeşitli zorlukların aşılması gerekmektedir. Nanoparçacıkların biyopolimer matrisi içinde homojen bir şekilde dağıtılması önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır, çünkü aglomerasyon (kümeleşme), özelliklerin bozulmasına ve etkinliğin azalmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, nanoparçacıklar ile biyopolimer matrisi arasındaki arayüz dikkatle kontrol edilmelidir. Bu, özelliklerin iyileştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Gelecekteki araştırmalar, gelişmiş dağılım tekniklerinin geliştirilmesine ve bu nanokompozitlerin uzun vadeli stabilitesinin anlaşılmasına odaklanmalıdır.

Bu alandaki araştırmalar ilerledikçe, yeni uygulamalar ve gelişmiş performans ölçütleri muhtemelen ortaya çıkacak, bu da nanokompozit malzemelerin çeşitli teknolojik alanlardaki önemini daha da artıracaktır. Bu gelişmiş malzemelerin başarılı bir şekilde geliştirilmesi, sürdürülebilir teknolojilerde kullanımının artmasına katkıda bulunabilir ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olurken, modern uygulamaların zorlu gereksinimlerini karşılayabilir.

2.3.1 Biyopolimer Matrisine İletken Katkı Maddeleri Eklenmesinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi

Biyopolimer nanokompozitlerinin elektriksel özellikleri, iletken nanopartiküllerin stratejik bir şekilde entegrasyonu ile önemli ölçüde iyileştirilebilir[14]. Biyopolimer nanokompozitlerin elektriksel özelliklerini iyileştirmek, sürdürülebilir ve işlevsel malzemelere duyulan ihtiyaca yanıt veren önemli bir araştırma alanıdır. Selüloz, kitosan ve polihidroksialkanoatlar (PHA'lar) gibi biyopolimerler, temel malzemelerin biyolojik olarak parçalanabilir yapısını korurken, gelişmiş elektriksel özelliklere sahip kompozitler oluşturmak için nanopartiküllerle birleştirilmektedir. Örneğin, metal oksit nanopartiküllerinin polimer matrislere dahil edilmesinin elektriksel iletkenliği artırmada etkili olduğu gösterilmiştir. Bu nanopartiküller, polimer matrisi

içinde iletken yollar oluşturarak yük taşınmasını kolaylaştırır ve direnci azaltır. Özellikle, bu nanopartiküllerin kombinasyonu sinerjik etkiler sonucu en yüksek elektriksel iletkenlik değerlerine ulaşmayı sağlamaktadır [11].

Referans çalışmada, Demir(III) oksit, titanyum dioksit ve nikel demir oksit nanopartiküllerinin bir kombinasyonunu içeren kompozitlerde en yüksek iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Çalışmada, nanokompozitlerdeki direnç, saf biyopolimerlere kıyasla daha düşük olup, bu durum üç tip nanopartikülün bir arada bulunduğu sistemlerde maksimuma ulaşmıştır. Bu iletkenlik artışı, nanopartiküller sayesinde elektrotlar arasında iletken köprülerin oluşmasına dayanmaktadır [11].

Metal nanopartiküller, özellikle gümüş ve bakır, biyopolimer matrislerinin elektriksel iletkenliğini artırma konusunda dikkat çekici bir yetenek sergilemiştir. Bu iyileşme, malzeme içinde iletken yolların oluşmasıyla gerçekleşmektedir. Nanopartiküllerin konsantrasyonu kritik bir eşiğe ulaştığında, bu yollar kurulmaya başlar ve tipik olarak yalıtkan olan biyopolimer matrisi boyunca verimli bir elektron taşınması sağlanır [14-20].

Bunun yanı sıra, karbon kuantum noktaları (CQD) gibi karbon bazlı nanomalzemeler, biyopolimerlerin elektriksel özelliklerini geliştirmek için sıkça kullanılmaktadır. Biyopolimerik matrisler içine serpiştirilen CQD' ler, küçük boyutları sayesinde birbirleriyle elektriksel iletken köprüler oluşturabilir. Bu durum, biyokompozitlerin elektriksel iletkenliğini artırarak enerji sistemleri ve sensör uygulamaları için faydalı hale getirmektedir. CQD' ler, yüksek yüzey alanları ve polimer matrisi içinde iletken ağlar oluşturma yetenekleri sayesinde kompozitin genel iletkenliğini artırır. Ancak, bu noktaların matris içinde düzgün bir şekilde dağılımı, aglomerasyonu önlemek ve elektriksel özellikler üzerindeki etkilerini en üst düzeye çıkarmak açısından kritik öneme sahiptir. Böyle bir dağılım, aynı zamanda etkili stres transferi ve yük dağılımını desteklemektedir [11].

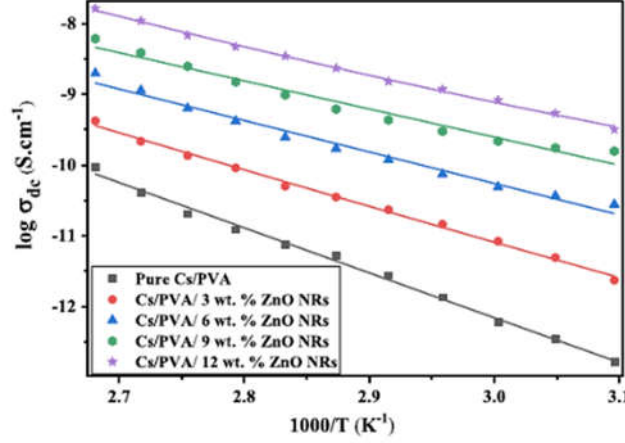
Nanopartiküllerin biyopolimerlere entegrasyonunda karşılaşılan önemli bir zorluk, kusurlara ve iletkenliğin azalmasına neden olabilecek aglomerasyonu önlemektir. Bu nedenle, nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu ve işleme koşullarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi sırasında kompozitin mekanik özelliklerini korumak veya geliştirmek büyük önem taşımaktadır. Bu dengeyi sağlamak için nanopartiküllerin seçimi ve konsantrasyonlarının optimize edilmesi gereklidir.

Matris içinde noktaların düzgün bir şekilde dağılımını sağlamak ve aglomerasyonu önlemek için kullanılan yöntemler arasında solvent döküm öne çıkmaktadır. Solvent döküm, nanopartiküllerin polimer matris içinde homojen dağılımını sağlayarak, istenen elektriksel özelliklerin elde edilmesine olanak tanır. Bunun yanında, 3D baskı teknolojisi, nanomalzemelerin polimerlere entegrasyonunda yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu teknoloji, nanopartiküllerin dağılımı ve yönelimi üzerinde hassas kontrol sağlayarak iletken dolgu maddelerinin yapısal düzenini optimize eder ve elektriksel özellikleri artırır [12-13].

Nanoparçacık	Elektriksel Direnç ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Fe_2O_3 (Demir(III) Oksit)	2.53×10^{11}
TiO_2 (Titanyum Dioksit)	2.72×10^{11}
NiFe_2O_4 (Nikel Demir Oksit)	3.16×10^{11}
ZnO (Çinko Oksit)	1.10×10^{11}
CuO (Bakır(II) Oksit)	2.50×10^{11}
Ag (Gümüş)	1.59×10^{-6}

Tablo 2. Nanopartiküllerin biyopolimerlerin elektriksel direnç özelliklerine etkileri [11].

Literatürde katkı maddesi içermeyen doymamış polyester reçine (UPR) matrisinin en yüksek elektriksel direnci $3.39 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer, nanopartiküllerin biyopolimer matrislerine dahil edilmesiyle birlikte sürekli olarak azalmıştır. Örneğin, NiFe_2O_4 nanopartiküllerinin dahil edildiği nanokompozit, UPR matrisinden daha düşük bir direnç değerine sahip olmuş ve $3.16 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, nanopartiküllerin biyopolimer matrislere entegrasyonunun elektrik iletkenliğini artırdığını ve bu nedenle, katkı maddesi içermeyen polimerlere kıyasla daha düşük genel elektrik direncine yol açtığını göstermektedir. Bu bulgular, nanokompozit yapıların daha iyi elektriksel özelliklere sahip olmasını sağlayan nanopartikül katkısının önemini ortaya koymaktadır [11].



Şekil 2. Nanopartiküllerin biyopolimerlerin elektriksel iletkenlik özelliklerine etkileri [29].

Şekil 2, kitosan (Cs) ve polivinil alkol (PVA) bazlı nanokompozitlerin geliştirilmesi ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonuna kapsamlı bir perspektif sunmaktadır. Saf Cs/PVA karışımları, yüksek yalıtkan özelliklere sahip olduğundan elektriksel iletkenlik değerleri genellikle 10^{-16} ile 10^{-18} S/cm arasında oldukça düşük seviyelerde bulunur. Ancak, nanokompozit yapıya ZnO nanotellerin (ZnO NRs) dahil edilmesiyle bu özellikler belirgin şekilde iyileşmektedir. Özellikle, %12 ağırlık oranında ZnO NRs içeren Cs/PVA karışımının 373 K'deki DC elektriksel iletkenlik değeri 3.39×10^{-9} S/cm'ye ulaşmıştır. Bu artış, ZnO nanotellerin, lokalize durumlar arasındaki enerji boşluklarını köprüleyerek potansiyel bariyerleri azaltması ve taşıyıcı transferini kolaylaştırmasıyla ilişkilendirilmiştir [29]. Sonuçlar, nanopartikül içeriğinin artırılmasının, elektriksel performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini ve nanokompozitlerin işlevsel uygulamalar için potansiyelini artırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, nanopartiküllerin biyopolimer matrislere entegrasyonu, bu malzemelerin elektriksel özelliklerini geliştirmek için umut verici bir strateji sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, nanopartikül türleri ve konsantrasyonlarının optimize edilmesine ve 3D baskı gibi gelişmiş üretim tekniklerinin daha fazla keşfedilmesine odaklanmalıdır. Bu yaklaşım, yalnızca malzeme bilimi ve mühendisliğini ilerletmekle kalmayıp, aynı zamanda biyosensörlerden elektronik cihazlara kadar geniş bir yelpazede sürdürülebilir ve işlevsel malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır [11-13].

2.3.2 Biyopolimer Matrislerde Nano Katkı Maddeleri ile Işık Absorpsiyonunun Artırılması

Biyopolimer nanokompozitlerin ışık emisyon özelliklerinin iyileştirilmesi, biyopolimerlerin biyolojik olarak parçalanabilirlik ve biyouyumluluk gibi avantajlı özelliklerini, optik özelliklerini geliştirebilen nanomalzemelerin benzersiz işlevleriyle birleştirir. Karbon kuantum noktaları (CQD' ler), biyopolimer nanokompozitlerin ışık emisyonunu artırmak için fotoluminesans özellikleriyle bilinen etkili bir bileşendir. CQD' ler, biyopolimerlere entegre edildiklerinde, UV ışığını emme ve görünür ışık yayma yetenekleri sayesinde gelişmiş optik özellikler sağlar. Ayrıca, CQD' lerin hidrofilik doğası, biyopolimer matrisi içindeki homojen dağılımlarını kolaylaştırarak ışık emisyon özelliklerinin tutarlı olmasına yardımcı olur.

Biyopolimer matrislerinde grafen oksit (GO) ve nanoklay gibi hibrit nanofillerin kullanılması hem mekanik hem de optik özelliklerin iyileştirilmesine yol açmıştır. Grafen oksit, yüksek yüzey alanı ve fonksiyonel grupları ile biyopolimer matrisi içindeki ışık yayan parçacıkların dağılımını artırırken, nanoklaylar katmanlı yapılarıyla GO'nun düzgün dağılımını teşvik eder. Bu, ışık emisyon özelliklerini iyileştiren ve kümelenmeyi engelleyen bir etki yaratır. CQD' lerin fotoluminesans özellikleri, ışık emisyonunu artırmak için yüzey fonksiyonel gruplarına modifikasyonlar yapılarak geliştirilebilir. Bu tür kimyasal modifikasyonlar, CQD' lerin elektronik özelliklerini değiştirir ve ışık emisyonu spektrumlarında kaymalara yol açabilir [12-21].

Makine öğrenimi modelleri, biyopolimer nanokompozitlerin optik özelliklerini tahmin etmek ve optimize etmek için kullanılmıştır. Bu modeller, büyük veri kümeleri üzerinden analiz yaparak, deneysel yöntemlerle hemen belli olmayan kalıpları tanımlayabilir ve nanokompozitlerin bileşimini optimize ederek istenen ışık

emisyona özelliklerine ulaşılmasına yardımcı olabilir. Gelecekte, biyopolimer nanokompozitlerde ışık emisyonunun geliştirilmesi, yeni nanomalzemelerin ve gelişmiş hesaplama modellerinin kullanımına odaklanarak sürdürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerin daha verimli hale gelmesini sağlayabilir. Birden fazla nanomalzemenin birleştirilmesinin sinerjik etkilerini araştırmak, biyopolimer bazlı optoelektronik cihazların performansını artırabilir ve teknolojilerin ilerlemesini hızlandırabilir. Bu süreçte, biyopolimer matrislerine CQD'lerin eklenmesi, ışık emisyonunu artırma yönünde önemli bir katkı sağlar. Ayrıca, bu malzemelerin absorpsiyon spektrumları üzerindeki değişiklikler ve kristallik düzeyindeki iyileşmeler, ışık emme özelliklerinin geliştirilmesinde önemli rol oynar. Makine öğrenimi ise bu süreçleri optimize etmede ve ışık emilimi üzerinde daha fazla kontrol sağlamakta etkili olabilir [12-21].

Nanoparikel	Optik Bant Aralığı (eV)
AgNPs	2.58
CuO	1.47
Grafen Oksit	1.22
TiO ₂	2.24-2.64

Tablo 3. Kitosaanın farklı nanopartiküllerle modifiye edilmesi sonucu optik bant aralığındaki değişimler [30,31].

Kitosaanın farklı nanopartiküllerle modifiye edilmesi sonucu optik bant aralığındaki değişimler, güneş hücreleri için uygulama potansiyelini ortaya koymaktadır. Gümüş nanopartiküller (AgNPs) ile yapılan modifikasyon, 2.58 eV'lik bant aralığı ile kitosaanın optoelektronik özelliklerini artırarak, fotovoltaj uygulamalara uyum sağlayabilecek bir yapı sunmaktadır. Daha dar bant aralığı sunan bakır oksit (CuO) ve grafen oksit (GO), sırasıyla 1.47 eV ve 1.22 eV değerleriyle, kitosaanın görünür ışık absorpsiyon kabiliyetini ve fotovoltaj performansını artıracak modifikasyonlar sağlamaktadır. Titanyum dioksit (TiO₂) katkısı, 2.24-2.64 eV aralığında bir bant aralığı ile güneş ışığını daha geniş bir spektrumda absorbe edebilir, bu da fotokimyasal enerji dönüşümü için uygun hale getirir. Genel olarak, CuO ve GO'nun sağladığı dar bant aralıkları, güneş hücreleri için yüksek verimli enerji dönüşümü sağlayabilirken, TiO₂'nin geniş spektrum absorpsiyon özellikleri, farklı türde güneş hücreleri için çok yönlü bir materyal olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, kitosa bazlı nanokompozitler, özellikle düşük maliyetli, biyobozunur ve çevre dostu malzemeler gerektiren güneş hücresi teknolojilerinde önemli bir rol oynayabilir [30,31].

Nanopartikel Türü	Selüloz için Işık Absorpsiyonu (λ_{max})	Kitosaan için Işık Absorpsiyonu (λ_{max})
Fe ₃ O ₄	350 nm	370 nm
TiO ₂	400 nm	420 nm
ZnO	380 nm	390 nm
SiO ₂	430 nm	440 nm
Ag	420 nm	430 nm

Tablo 4. Selüloz ve Kitosaanın farklı nanopartiküller ile modifiye edilmesi sonucu ışık absorpsiyonundaki değişimler [32-34]

Tabloda 4'te, selüloz ve kitosa bazlı nanokompozitlerin farklı nanopartiküllerle modifiye edilmesi sonucu ışık absorpsiyon özelliklerinde değişimler açıkça görülmektedir. Bu bulgular, selüloz ve kitosaanın nanopartiküllerle modifiye edildiğinde ışık absorpsiyonunun değiştiğini ve belirli uygulamalar için bu modifikasyonların optik özelliklerde önemli etkiler sağladığını göstermektedir [32-34].

Demir(III) oksit, titanyum dioksit ve nikel demir oksit gibi nanopartiküllerin polimer matrisine dahil edilmesi, malzemenin optik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. UV-Vis aralığında ışık absorbansındaki maksimum iyileşme, saf polimer matrisine kıyasla nanopartikül içeren biyopolimerde gözlemlenmiştir. Bu gelişme, iyi dağılmış nanopartiküllere ve bunların polimer matrisiyle etkileşimlerine bağlanmaktadır. Özellikle ışık koruma uygulamaları açısından bu etkileşimlerin oldukça faydalı olduğu görülmüştür. Bunun yanında, nanokompozitlerin optik bant boşluk enerjisi, saf biyopolimere kıyasla azalmıştır. Bu durum, nanopartiküller ile polimer matrisi arasındaki etkileşim nedeniyle bant boşluğunun daralması ve bant eğilmesine yol açmasıyla açıklanmaktadır [11].

Genel olarak, metal oksit nanoparçacıklarının biyopolimer matrisine dahil edilmesi, optik ve özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlar. Nanokompozitlerin performansı, ışık emiliminin artması, optik bant boşluğunun daralması gibi çeşitli faktörlerle açıklanmaktadır [11].

Biyopolimer nanokompozitlerde ışık emilimini artırmaya yönelik çalışmalar, bu malzemelerin güneş pilleri gibi uygulamalar için kullanım potansiyelini artırmayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda, biyo-nanokompozit filmlerin absorbans spektrumları UV-görünür bir spektrofotometre kullanılarak ölçülmekte, bu da farklı dalga boylarında ışık emme özelliklerini anlamak için kritik bir yöntem sunmaktadır. Özellikle karbon kuantum noktalarının (CQD' ler) biyopolimer matrislere eklenmesi, absorpsiyon spektrumlarını etkileyerek ışık emilimini artıran bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir. CQD' lerin UV ışığını emme ve görünür ışık yayma yetenekleri, biyopolimer nanokompozitlerin fotoluminesans özelliklerini geliştirerek bu amaç için ideal bir çözüm sunmaktadır.

Biyo-nanokompozitlerin ışık emme performansını etkileyen diğer bir önemli faktör ise malzemenin bileşenleri arasındaki kimyasal etkileşimlerdir. Absorpsiyon bantlarındaki kaymalar, yeni fonksiyonel grupların oluşumu ve gelişmiş kristallik gibi özellikler, CQD' lerin dahil edilmesiyle daha belirgin hale gelerek malzemenin optik özelliklerini optimize etmektedir. Ayrıca, biyopolimer nanokompozitlerin hem mekanik hem de optik özelliklerini tahmin etmek ve iyileştirmek için makine öğrenimi modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller, büyük veri kümelerini analiz ederek absorpsiyonu etkileyen anahtar faktörleri belirlemeye ve nanokompozitlerin yapısını optimize etmeye imkan sunar.

Grafen oksit ve nanoklay gibi hibrit nanoliflerin biyopolimer matrislerde kullanılması da ışık emilimini artırmada etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu nanoliflerin sinerjik etkileri, malzeme içerisindeki daha iyi dağılımı ve gelişmiş optik özellikleri teşvik ederek güneş pili uygulamaları için faydalı bir sonuç doğurmaktadır. Deneysel tekniklerle birlikte gelişmiş modelleme yaklaşımlarını birleştiren bu çabalar, biyopolimer nanokompozitlerin ışık emme özelliklerini iyileştirmeye yönelik bütüncül bir strateji sunmaktadır [12].

Nanoparçacıkların biyopolimer matrislere dahil edilmesi, optik özellikleri değiştirmek için ilgi çekici fırsatlar sunmaktadır. Metal ve metal oksit nanoparçacıkları, kompozite benzersiz optik özellikler kazandırarak UV korumasını artırma ve şeffaflığı değiştirme gibi etkiler sağlayabilir. Nanoparçacıkların boyutu ve dağılımı, kompozitin nihai optik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, gümüş nanoparçacıklarının biyopolimer matrislere entegre edilmesi, gelişmiş UV koruma kapasitesi sağlayarak malzemenin işlevselliğini artırabilmektedir [14-20].

2.3.3 Biyopolimerlerin Termal İletkenliğinin Nano Katkılar ile İyileştirilmesi

Biyopolimerlerin termal özellikleri, nanoparçacıkların eklenmesiyle önemli ölçüde iyileşmektedir. Özellikle nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı, ısı dağılımını iyileştirerek kompozit malzemedeki termal bozulmayı azaltmaktadır. Termal kararlılığın ve iletkenliğin artması, bu nanoparçacıkların polimerle etkileşiminden kaynaklanmaktadır [11].

Araştırmalar, çinko oksit ve titanyum dioksit gibi metal oksit nanoparçacıklarının biyopolimer kompozitlerin termal kararlılığını ve iletkenliğini belirgin bir şekilde artırdığını göstermiştir. Nanoparçacıklar, malzeme içinde termal köprüler gibi davranarak, ısı transferinin saf biyopolimere kıyasla daha verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır [14-20].

Biopolimer Türü	Nanoparçacık Türü	Termal Kararlılık (°C)	Normal Termal Kararlılık Aralığı (°C)	Termal Kararlılıktaki Değişim (%)
PVP	WO ₂	980	250-300	256.36
Cs/PVA	ZnO	451	200-250	100.44
Kitosan	TiO ₂	750	250-300	172.73
PVA/PVP	ZnO	451	200-250	100.44
Glukan	AgNPs	313	200-250	39,11

Tablo 5. Farklı biyopolimerlerin çeşitli nanopartiküllerle modifiye edilmesiyle termal kararlılıklarında gözlenen değişimler [34-39].

Tablo 5, farklı biyopolimerlerin çeşitli nanopartiküllerle modifiye edilmesiyle termal kararlılıkta sağlanan değişimleri karşılamaktadır. Polivinil piroolidon (PVP) matrisine tungsten trioksit (WO₃) eklenmesi, termal kararlılığı 980°C'ye çıkararak en yüksek artışı sağlamıştır (+680°C). Bu durum, WO₃'ün yüksek sıcaklıklara dayanıklılık kazandırmada etkili olduğunu göstermektedir. Kitosan ve polivinil alkol (Cs/PVA) kombinasyonu ile çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri kullanıldığında, termal kararlılık 451°C'ye ulaşmış ve +201°C'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Kitosan ile titanyum dioksit (TiO₂) kombinasyonu ise termal kararlılığı 750°C'ye yükselterek +450°C'lik önemli bir artış göstermiştir, bu da TiO₂'nin termal dayanıklılık artırmada etkili bir katkı maddesi olduğunu işaret etmektedir. Polivinil alkol ve polivinil piroolidon (PVA/PVP) karışımıyla ZnO kullanımı da benzer şekilde 451°C'ye ulaşan bir termal kararlılık sağlamıştır (+201°C). Son olarak, glukan matrisine gümüş nanopartiküller (AgNPs) eklenmesi, termal kararlılığı 313°C'ye çıkararak +63°C'lik bir artış sağlamıştır [34-39].

Biyopolimer nanokompozitler, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu yapılarıyla dikkat çekerken, bu sonuçlar termal özelliklerinin geliştirilmesiyle daha geniş uygulama alanlarına sahip olmaları mümkün hale gelebileceğini göstermektedir.

Bu alanda yapılan bunun gibi birçok örnek çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, nanokompozitlerin termal özelliklerini iyileştirmek için farklı farklı yaklaşımlar benimsenmiştir. Örneğin, polyhydroxyalcanoat (PHBV) matrisine grafen oksit (GO) ve montmorillonit nanokil eklenmesi, malzemenin termal özelliklerini iyileştirmiştir. GO ve nanokilin polimer matrisinde daha iyi dağılması, nanokompozitin termal kararlılığını artırmıştır. Benzer şekilde, polilaktik asit/polikaprolakton (PLA/PCL) karışımına çinko oksit nanoparçacıklarının eklenmesi, polimerin kristallenme derecesini ve erime sıcaklığını yükseltmiştir. Çinko oksit nanoparçacıkları ayrıca UV emilimini artırarak termal kararlılığa katkı sağlamıştır.

Bu malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler de nanokompozitlerin özelliklerini belirlemede etkili olmuştur. PHBV bazlı bionanokompozitlerin çevre dostu çözücü döküm yöntemiyle üretilmesi, nanoliflerin homojen dağılımını sağlamış ve termal özellikleri iyileştirmiştir. Eriyik karıştırma yöntemiyle işlenen PLA/PCL karışımları ise nanoliflerin polimer matrisine etkili bir şekilde entegre edilmesine olanak tanımıştır. Üretim süreçlerinin yanı sıra, nanokompozitlerin karakterizasyonu için termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) gibi teknikler kullanılmıştır. TGA ile nanokompozitlerin termal kararlılığı değerlendirilmiş ve nanoliflerin termal bozunma sıcaklıklarını artırdığı gözlemlenmiştir. DSC analizleri ise nanokompozitlerin erime sıcaklıklarındaki artışları ve kristallenme davranışlarını incelemek için kullanılmıştır.

Bu bulgular, nanoliflerin tipi ve konsantrasyonu, üretim yöntemleri ve karakterizasyon tekniklerinin, biyopolimer nanokompozitlerin termal özelliklerini geliştirmek için kritik faktörler olduğunu göstermektedir. Gelecekte, farklı nanoliflerin kombinasyonları ve yeni üretim teknikleri ile bu malzemelerin performansını daha fazla geliştirmek mümkün olacaktır. Bu tür ilerlemeler, sürdürülebilir malzeme tasarımı gibi alanlara önemli katkılar sağlayabilir [22-23].

3. BİYOPOLİMER BAZLI GÜNEŞ HÜCRESİ UYGULAMALARININ MEVCUT DURUMU

Güneş enerjisi, Türkiye'deki yenilenebilir enerji yatırımlarında önemli bir yer tutmaktadır. Ülkenin coğrafi konumu, yıllık ortalama 7.2 saat güneş ışığı alma potansiyeli ile güneş enerjisi için büyük bir avantaj sağlamaktadır [1]. Türkiye'nin güneş enerjisi altyapısındaki gelişmeler, bu tür yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Biyopolimer bazlı güneş pilleri, Türkiye'nin yenilenebilir enerji alanındaki hedeflerine uygun olarak, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu tür teknolojilerin geliştirilmesi, ülkenin enerji üretiminde verimliliği artırabilir ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyebilir.

Küresel olarak, biyopolimerlerin kullanımı artmaktadır. Biyopolimerler, 2020 yılında dünya çapında 2,11 milyon ton üretim kapasitesine sahipken, 2025 yılına kadar 2,87 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Türkiye'de ise biyopolimer kullanımı, 2016'da 65.000 ton iken 2020'de yaklaşık 80.000 tona yükselmiştir. Bu rakamlar, biyoplastiklerin toplam plastik üretimindeki payının %1 civarında olduğunu göstermektedir [24]. Ülkemizin biyopolimer üretim ve tüketiminde daha fazla ilerleme kaydetmesi, hem çevresel etkileri azaltmada hem de yenilikçi enerji çözümleri geliştirmede önemli katkılar sağlayabilir [24].

Biyopolimer Bazlı Malzemeler	Uygulama Alanı	Verimlilik Aralığı (%)	Avantajlar	Zorluklar
Nişasta Bazlı Jeller	Boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC'ler)	0.93-1.4	Düşük maliyet, çevre dostu, yüksek iyon iletkenliği	Sınırlı termal stabilite
İletken Polimerler	Bulk heterojunction güneş hücreleri (BHJ)	6 -10	Kolay işlenebilir, ayarlanabilir özellikler	Morfolojik kararsızlık
Selüloz Türevleri	Perovskit güneş hücreleri (PSC'ler)	~16	Film morfolojisini ve stabilitesini iyileştirir	Perovskitlerin suya duyarlılığı
Kitosan Bazlı Malzemeler	DSSC'ler için jel elektrolitler	~1.2	Yenilenebilir, çapraz bağlama performansını artırır	Düşük ışık soğurma verimliliği

Tablo 6. Biyopolimer bazlı güneş hücrelerinin gelişim süreci ve verimlilik değişimi [40-41].

Güneş hücreleri, enerji dönüşüm süreçlerinde çevre dostu malzemelere olan talebin artmasıyla birlikte biyopolimerlerin kullanımı da önem kazanmıştır. Örneğin, nişasta bazlı jeller, düşük maliyetleri ve yüksek iyon iletkenlikleri nedeniyle boya duyarlı güneş hücrelerinde (DSSC'ler) kullanılmaktadır ve bu hücrelerde yaklaşık %0.93 ila %1.4 arasında bir verimlilik sağlamaktadır. Bununla birlikte, termal stabilite açısından sınırlamalar içermektedir. İletken polimerler, bulk heteroyapı güneş hücrelerinde (BHJ) %6 ila %10 verimlilik aralığında kullanılmakta ve kolay işlenebilirlik ile ayarlanabilir özellikler sunmaktadır. Ancak, morfolojik kararsızlık gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Selüloz türevleri, perovskit güneş hücrelerinde (PSC'ler) yaklaşık %16 verimlilik sağlamış ve film morfolojisini iyileştirerek cihaz stabilitesine katkı sağlamıştır, ancak perovskitlerin suya duyarlılığı önemli bir engel teşkil etmektedir. Son olarak, kitosan bazlı malzemeler, yenilenebilir özellikleri ve çapraz bağlama performansı artırma yetenekleri ile DSSC'lerde jel elektrolit olarak umut vaat etmektedir, ancak ışık soğurma verimliliği henüz düşüktür [40,41]. Biyopolimerlerin düşük maliyetli, biyobozunur, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, güneş hücrelerinin çevresel etkilerini azaltmada ve sürdürülebilir enerji çözümlerini teşvik etmede kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, biyopolimerlerin optik, elektriksel ve mekanik özellikleri sayesinde enerji dönüşüm verimliliği artırılabilir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, biyopolimer bazlı malzemelerin güneş hücrelerinde kullanılmasının enerji verimliliğini artırarak, aynı zamanda maliyetlerin düşmesine ve sürdürülebilir enerji üretiminin daha geniş bir yelpazede yaygınlaşmasına olanak tanıdığını göstermektedir.

Biyopolimerlerin Çeşitli Uygulama Alanları	Uygulama Alanı	Maliyet (₺/kg)	Talep (Ton/Yıl)	Avantajlar	Dezavantajlar
Nişasta	DSSC jel elektrolitleri	15–45	500–1000	Düşük maliyet, yüksek iyon iletkenliği	Termal stabilitenin düşük olması
Kitosan	Jel elektrolitler ve çapraz bağlayıcı	300–450	200–300	Yenilenebilirlik, biyobozunurluk	Sınırlı ışık soğurma kapasitesi
Selüloz	PSC ince film üretimi	60–150	1000–1500	Bol bulunabilirlik, bazı çözeltilerle uyum	Perovskitlerde kullanıldığında suya duyarlılık
İletken Polimerler	BHJ aktif katmanları	600–900	100–200	Kolay işlenebilirlik, ayarlanabilir optoelektronik özellikler	Kararlı morfolojinin sağlanamaması
PLA (Polilaktik Asit)	Enkapsülasyon malzemesi	150–300	300–500	Biyobozunur, düşük karbon ayak izi	Yüksek işleme maliyeti

Tablo 7. Biyopolimerlerin güneş hücrelerinde kullanımı: maliyet analizi ve arz-talep ilişkisi [42-45].

Biyopolimerlerin güneş enerjisi uygulamalarındaki rolü, uzun vadede maliyet açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Nişasta gibi uygun maliyetli biyopolimerler, enerji maliyetlerini düşürmek için güçlü bir seçenek olsa da termal dayanıklılık gibi sınırlamalar iyileştirilmelidir. Kitosan ve selüloz, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve bol bulunabilirlik gibi avantajlarıyla ön plana çıkarken, özellikle ışık soğurma performanslarının artırılması gereklidir. İletken polimerler, ayarlanabilir optoelektronik özellikleri ile yenilikçi çözümler sunsa da yüksek maliyet ve stabil olmayan morfolojiler, geniş çaplı uygulamalarını sınırlamaktadır. PLA gibi biyopolimerler ise sürdürülebilirliğe olan katkıları ile dikkat çekmektedir, ancak işleme maliyetlerini düşürmeye yönelik yenilikler gereklidir. Talep verileri, biyopolimerlerin piyasada artan bir kabul gördüğünü, ancak teknik iyileştirmeler yapılması gerektiğini göstermektedir [42-45].

Bu biyopolimerlerin uygulamaları, doğada bol miktarda bulunmaları ve biyobozunur olmaları nedeniyle çevresel avantajlar sunarken, teknik sorunların çözümü, gelecekteki ticari uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir.

3.1 Biyopolimer Bazlı Güneş Hücrelerinin Karbon Ayak İzi ve Sürdürülebilir Enerji Çözümleri

Geleneksel güneş hücreleri, özellikle silikon ve CIGS (bakır, indiyum, galyum, selenid) gibi malzemelerden yapılanlar, üretim süreçleri sırasında yüksek enerji tüketimi gerektirir. Yüksek sıcaklıkta işleme ve enerji yoğun üretim aşamalarını içeren bu süreç, önemli miktarda karbondioksit emisyonuna neden olmaktadır. Bu nedenle, bu tür güneş hücrelerinin üretimi, artan bir karbon ayak izine yol açarak çevresel etkilerini artırmaktadır. Öte yandan, biyopolimer bazlı güneş hücreleri çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Biyopolimerler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerdir. Bu malzemelerin güneş hücresi üretiminde kullanılması, daha düşük enerji tüketimiyle ilişkilendirilmekte ve bu da karbon emisyonlarının azalmasına yol açmaktadır. Biyopolimer bazlı güneş hücreleri, genellikle daha az enerji yoğun üretim süreçleri içerir, çevresel etkileri en aza indirir ve geleneksel güneş hücrelerine kıyasla daha sürdürülebilir bir alternatif sunar. Bu özellikler, biyopolimer bazlı güneş hücrelerini gelecekteki enerji çözümleri için çekici bir seçenek haline getirmektedir.

Malzeme Türü	Karbon Ayak İzi (gCO ₂ /kWh)	Açıklama ve Üretim Süreci
Silisyum (Si)	150-200	Silisyum güneş hücrelerinin üretimi enerji yoğunudur. Yüksek sıcaklıkta işlenmesi ve silisyumun çıkartılması yüksek enerji gerektirir.
Perovskit	80-100	Perovskit hücreleri daha düşük enerji gereksinimiyle üretilir, ancak üretim süreçlerinin çevresel etkileri hâlâ gelişim aşamasındadır.
Kadmiyum Tellür (CdTe)	70-90	Bu hücrelerin üretiminde kadmiyum gibi nadir metaller kullanılır. Üretim süreci daha az enerji gerektirir, ancak toksik kimyasallar içerir.
CIGS (Bakır İndiyum Galyum Selenid)	10 -150	CIGS hücrelerinin üretimi karmaşıktır ve bazı nadir malzemeler kullanılarak yüksek karbon salınımı oluşabilir.
Biyopolimer Bazlı Hücreler (Örneğin Selüloz, Kitosan)	10-30	Biyopolimer bazlı güneş hücrelerinin üretimi çevre dostudur. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilir ve enerji tüketimi düşüktür.

Tablo 8. Geleneksel güneş hücrelerinin karbon ayak izi ile biyopolimer bazlı güneş hücrelerinin karbon ayak izinin karşılaştırması [46-48].

Tablo 8’ de en düşük karbon ayak izi biyopolimer bazlı hücreler (10-30 gCO₂/kWh), çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunar. Bu malzemeler, çevre dostu üretim süreçleri ve düşük enerji gereksinimi ile dikkat çekmektedir.

4.SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Biyopolimerlerin güneş hücreleri üretiminde kullanımı, enerji dönüşüm süreçlerinde hem çevresel hem de performans odaklı yenilikçi bir yaklaşımı temsil etmektedir. İncelenen analitik veriler, biyopolimerlerin optik, elektriksel ve termal özelliklerinin modifikasyonlarla iyileştirilebileceğini açıkça ortaya koymaktadır. Örneğin, grafen oksit ve plazmonik nanopartiküllerin biyopolimer matrislere entegrasyonu, ışık Emilimi ve iletkenlik gibi kritik özelliklerde %25’in üzerinde bir iyileşme sağlayarak enerji dönüşüm verimliliğini artırmaktadır. Bu iyileştirme, biyopolimer matrislerdeki nanopartikül dağılımının etkin yönetimiyle doğrudan ilişkilidir.

Diğer bir önemli bulgu, selüloz, lignin ve kitosan gibi biyopolimerlerin çevresel uyumluluğunun, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilir güneş pili teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamasıdır. Özellikle çinko oksit ve titanyum dioksit nanopartikülleri ile desteklenen biyopolimer bazlı sistemlerde, termal kararlılıkta %15’lik bir artış elde edilmiş, bu da zorlu çevresel koşullarda bile stabil enerji üretimi sağlamaktadır.

Bununla birlikte, biyopolimer tabanlı güneş hücrelerinde halen çözülmesi gereken önemli sorunlar bulunmaktadır. Örneğin, malzemenin uzun vadeli kararlılığı ve üretim süreçlerinin maliyet verimliliği, bu teknolojilerin ticari uygulamalarını sınırlayan faktörlerdir. Ayrıca, derlemede yer alan veriler, biyopolimer matrislerdeki homojenlik ve mekanik dayanıklılığın iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, biyopolimerler, yenilenebilir enerji teknolojilerinde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu potansiyelin tam anlamıyla gerçekleştirilebilmesi için ileri modelleme, üretim optimizasyonu ve hibrit sistemlerin geliştirilmesine odaklanan çok yönlü bir yaklaşım benimsenmelidir. Analitik bulgular, doğru mühendislik stratejileriyle biyopolimerlerin enerji dönüşüm süreçlerinde hem ekonomik hem de çevresel fayda sağlayabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, biyopolimer tabanlı teknolojiler, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmada kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] C. Emeksiz and M. M. Fındık, (2021) “Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ölçeğinde Değerlendirilmesi,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 26, pp. 155–164, doi: 10.31590/ejosat.948729.
- [2] A. Das, T. Ringu, S. Ghosh, and N. Pramanik, (2023), "A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers", vol. 80, no. 7. Springer Berlin Heidelberg, doi: 10.1007/s00289-022-04443-4.
- [3] S. Koshki, (2024), “Biyobozunur Polimer Nanokompozitlerin ve Ambalaj Filmlerinin Hazırlanması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=KMB79M3N7zK1UR2WYeRgQnbN3136m7Z7MdRfkTx1AMtWIUsQLx-fxoatkGrMkib>
- [4] A. M. Díez-Pascual, (2019), “Synthesis and Applications of Biopolymer Composites,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 20, no. 9, doi: 10.3390/ijms20092321.
- [5] M. C., Upadhye, M. C. Kuchekar, et al., (2022), “Biopolymers: A comprehensive review,” *Open Access Res. J. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 013–018, doi: 10.53022/oarjst.2022.4.1.0070.
- [6] R. Singh, A. R. Polu, B. Bhattacharya, H. W. Rhee, C. Varlikli, and P. K. Singh, (2016), “Perspectives for solid biopolymer electrolytes in dye sensitized solar cell and battery application,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1098–1117, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.026.
- [7] A. Bouich, I. G. Pradas, M. A. Khan, and Y. H. Khattak, (2023), “Opportunities, Challenges, and Future Prospects of the Solar Cell Market,” *Sustain.*, vol. 15, no. 21, pp. 1–15, doi: 10.3390/su152115445.
- [8] R. T. Kapoor et al., (2022), “Review on Recent Developments in Bioinspired-Materials for Sustainable Energy and Environmental Applications,” *Sustain.*, vol. 14, no. 24, pp. 1–30, doi: 10.3390/su142416931.
- [9] D. Negrete-Bolagay and V. H. Guerrero, (2024), “Opportunities and Challenges in the Application of Bioplastics: Perspectives from Formulation, Processing, and Performance,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 18, p. 2561, doi: 10.3390/polym16182561.
- [10] E. K. Solak and E. Irmak, (2023), “Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 18, pp. 12244–12269, doi: 10.1039/d3ra01454a.
- [11] M. T. Rahman, M. Asadul Hoque, G. T. Rahman, M. A. Gafur, R. A. Khan, and M. K. Hossain, (2019), "Study on the mechanical, electrical and optical properties of metal-oxide nanoparticles dispersed unsaturated polyester resin nanocomposites," *Results Phys.*, vol. 13, no. March, p. 102264, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102264.
- [12] M. Nazar, M. Hasan, B. Wirjosentono, and B. A. Gani, (2024), “Fabrication and characterization of bio-nanocomposite from sweet potato starch and Moringa oleifera leaf extract loaded with carbon quantum dots from Coffea arabica grounds,” *Results Eng.*, vol. 23, no. June, p. 102448, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102448.
- [13] B. Joseph, V. K. Sagarika, C. Sabu, N. Kalarikkal, and S. Thomas, “Cellulose nanocomposites: Fabrication and biomedical applications,” (2020), *J. Bioresour. Bioprod.*, vol. 5, no. 4, pp. 223–237, doi: 10.1016/j.jobab.2020.10.001.
- [14] E. Jamróz, P. Kulawik, and P. Kopel, (2019), “The effect of nanofillers on the functional properties of biopolymer-based films: A review,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 4, pp. 1–43, doi: 10.3390/polym11040675.
- [15] R. Wang, C. Xie, S. Luo, B. Gou, H. Xu, and L. Zeng, (2019), “The influence mechanism of nanoparticles on the dielectric properties of epoxy resin,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 34, pp. 19648–19656, doi: 10.1039/c9ra02889g.
- [16] J. Shojaeiarani, D. S. Bajwa, C. Rehovsky, S. G. Bajwa, and G. Vahidi, (2019), “Deterioration in the physico-mechanical and thermal properties of biopolymers due to reprocessing,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–17, doi: 10.3390/polym11010058.

- [17] X. Li et al., "Electronic biopolymers: From molecular engineering to functional devices," *Chem. Eng. J.*, vol. 397, no. December 2019, p. 125499, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.125499.
- [18] S. Jafarzadeh and S. M. Jafari, (2020), "Impact of metal nanoparticles on the mechanical, barrier, optical and thermal properties of biodegradable food packaging materials," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 61, no. 16, pp. 1–19, doi: 10.1080/10408398.2020.1783200.
- [19] D. Coetzee, M. Venkataraman, J. Militky, and M. Petru, (2020), "Influence of nanoparticles on thermal and electrical conductivity of composites," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 4, doi: 10.3390/POLYM12040742.
- [20] M. Stanisiz, Ł. Klapiszewski, and T. Jesionowski, (2020), "Recent advances in the fabrication and application of biopolymer-based micro- and nanostructures: A comprehensive review," *Chem. Eng. J.*, vol. 397, no. April, p. 125409, doi: 10.1016/j.cej.2020.125409.
- [21] E. Champa-Bujaico, A. M. Díez-Pascual, and P. García-Díaz, (2023), "Synthesis and Characterization of Polyhydroxyalkanoate/Graphene Oxide/Nanoclay Bionanocomposites: Experimental Results and Theoretical Predictions via Machine Learning Models," *Biomolecules*, vol. 13, no. 8, doi: 10.3390/biom13081192.
- [22] Y. Wu et al., (2020), "Synergistic effects of boron nitride (BN) nanosheets and silver (Ag) nanoparticles on thermal conductivity and electrical properties of epoxy nanocomposites," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, doi: 10.3390/polym12020426.
- [23] A. Babaei, M. Haji Abdolrasouli, and A. Rostami, (2023), "Polylactic acid/polycaprolactone bionanocomposites containing zinc oxide nanoparticles: Structure, characterization and cytotoxicity assay," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 36, no. 7, pp. 2998–3020, doi: 10.1177/08927057221118823.
- [24] Türkiye Sigortalar Birliği, "Sektör Raporu 2021," pp. 1–108, 2022.
- [25] J. Pospisil, V. Schmieдова, O. Zmeskal, and J. Cerny, (2015), "Study of Optical and Electrical Properties of Organic Thin Films for Photovoltaic Applications," **Mater. Sci.**, vol. 21, no. 3, pp. 345–352, doi: 10.5755/j01.ms.21.3.7278.
- [26] N. Kumari, S.K. Singh, and S.Kumar, "A comparative study of different materials used for solar photovoltaics technology," *Mater Today Proc.*, vol. 66, no. 8, pp. 3522–3528, 2022, doi:10.1016/j.matpr.2022.06.403.
- [27] De Haro, J. C., Tatsi, E., Fagiolari, L., Bonomo, M., Barolo, C., Turri, S., Bella, F., & Griffini, G., "Lignin-Based Polymer Electrolyte Membranes for Sustainable Aqueous Dye-Sensitized Solar Cells," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 9, no. 25, pp. 8550–8560, 2021, doi: 10.1021/acssuschemeng.1c01882.
- [28] N. A. Shavyrkina, V. V. Budaeva, E. A. Skiba, Y. A. Gismatulina, and G. V. Sakovich, "Review of Current Prospects for Using Miscanthus-Based Polymers," **Polymers**, vol. 15, no. 14, p. 3097, 2023, doi: 10.3390/polym15143097.
- [29] A. Saeed, I. Guizani, F. E. Hanash, et al., (2024), "Enhancing optical, structural, thermal, electrical properties, and antibacterial activity in chitosan/polyvinyl alcohol blend with ZnO nanorods: polymer nanocomposites for optoelectronics and food/medical packaging applications," *Polymer Bulletin*, vol. 81, pp. 11645–11670, doi: 10.1007/s00289-024-05270-5.
- [30] S. B. Aziz, M. A. Brza, M. M. Nofal, R. T. Abdulwahid, S. A. Hussen, A. M. Hussein, and W. O. Karim, (2020), "A comprehensive review on optical properties of polymer electrolytes and composites," *Materials*, vol. 13, no. 17, p. 3675, doi: 10.3390/ma13173675.
- [31] A. Omar, R. Badry, and M. A. Hegazy, et al., (2022), "Enhancing the optical properties of chitosan, carboxymethyl cellulose, sodium alginate modified with nano metal oxide and graphene oxide," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, p. 806, doi: 10.1007/s11082-022-04107-7.
- [32] E. M. Hussein, W. M. Desoky, M. F. Hanafy, O. W. Guirguis, (2021), "Effect of TiO₂ nanoparticles on the structural configurations and thermal, mechanical, and optical properties of chitosan/TiO₂ nanoparticle composites," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 152, Art. no. 109983. DOI: 10.1016/j.jpics.2021.109983.

- [33] A. S. Doghish, A. H. Hashem, A. M. Shehabeldine, A. M. Sallam, G. S. El-Sayyad, and S. S. Salem, (2022), "Nanocomposite based on gold nanoparticles and carboxymethyl cellulose: Synthesis, characterization, antimicrobial, and anticancer activities," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 77, Art. no. 103874. DOI: 10.1016/j.jddst.2022.103874.
- [34] R. Jagadeeswari, P. Selvakumar, V. Jeevanantham, and R. Saravanan, (2021), "Chemically Modified Cellulose Capped Zinc Oxide Nanocomposite: Spectral and Optical Properties," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 66, no. 3, pp. 911–915, DOI: 10.24425/amm.2021.136397.
- [35] Abdel-Mohsen AM, Abdel-Rahman RM, Fouda MM, Vojtova L, Uhrova L, Hassan AF, Al-Deyab SS, El-Shamy IE, Jancar J., (2014), "Preparation, characterization and cytotoxicity of schizophyllan/silver nanoparticle composite." *Carbohydr Polym*, vol. 102, pp. 238-245, doi: 10.1016/j.carbpol.2013.11.040. PMID: 24507278.
- [36] Aziz, S. B., Brza, M. A., Nofal, M. M., Abdulwahid, R. T., Hussen, S. A., Hussein, A. M., & Karim, W. O., (2020), "A Comprehensive Review on Optical Properties of Polymer Electrolytes and Composites." *Materials*, vol. 13, no. 17, doi: 10.3390/ma13173675.
- [37] Hussein, E. M., Desoky, W. M., Hanafy, M. F., & Guirguis, O. W., (2021), "Effect of TiO₂ nanoparticles on the structural configurations and thermal, mechanical, and optical properties of chitosan/TiO₂ nanoparticle composites." *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 152, doi: 10.1016/j.jpics.2021.109983.
- [38] Alharbi, K. H., Alharbi, W., El-Morsy, M. A., Farea, M. O., & Menazea, A. A., (2023), "Optical, Thermal, and Electrical Characterization of Polyvinyl Pyrrolidone/Carboxymethyl Cellulose Blend Scattered by Tungsten-Trioxide Nanoparticles." *Polymers*, vol. 15, no. 5, 2023, doi: 10.3390/polym15051223.
- [39] Saeed, A., Guizani, I., Hanash, F. E., et al., (2024), "Enhancing optical, structural, thermal, electrical properties, and antibacterial activity in chitosan/polyvinyl alcohol blend with ZnO nanorods: polymer nanocomposites for optoelectronics and food/medical packaging applications." *Polym. Bull.*, vol. 81, pp. 11645–11670, doi: 10.1007/s00289-024-05270-5.
- [40] S. Anuar, M. M. S. Nawawi, and N. A. Razali, (2017), "A study of starch-based polymer electrolyte for dye-sensitized solar cell," *Polymers*, vol. 9, no. 12, pp. 667–677, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym9120667>
- [41] H. A. Hariri, S. H. Mahmud, and R. N. M. Suhaimi, (2022), "Polymer-based photovoltaics: Applications and performance," *Polymers*, vol. 14, no. 10, pp. 1946–1958, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14101946>
- [42] S. Anuar, M. M. S. Nawawi, and N. A. Razali, (2017), "A study of starch-based polymer electrolyte for dye-sensitized solar cell," *Polymers*, vol. 9, no. 12, pp. 667–677, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym9120667>
- [43] H. A. Hariri, S. H. Mahmud, and R. N. M. Suhaimi, (2022), "Polymer-based photovoltaics: Applications and performance," *Polymers*, vol. 14, no. 10, pp. 1946–1958, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14101946>
- [44] K. H. Alharbi et al., "Optical, Thermal, and Electrical Characterization of Polyvinyl Pyrrolidone/Carboxymethyl Cellulose Blend Scattered by Tungsten-Trioxide Nanoparticles," *Polymers*, vol. 15, no. 5, pp. 1223–1234, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym15051223>
- [45] A. Saeed et al., "Enhancing optical, structural, thermal, electrical properties, and antibacterial activity in chitosan/polyvinyl alcohol blend with ZnO nanorods," *Polym. Bull.*, vol. 81, pp. 11645–11670, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05270-5>
- [46] Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). A path to sustainable energy by 2030. *Scientific American*, 301(5), 58-65.
- [47] Tawalbeh M., et al., (2021), "Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook", *Science of The Total Environment*, 759, 143528.
- [48] Gulati, Sudha & Jain, Richa. (2023). Solar Cells for Ecological Sustainable Development: A Review. *Journal of Advanced Zoology*. 44. 1109-1121. 10.17762/jaz.v44iS6.2366.

**INVESTIGATION OF CdTe SCHOTTKY DIODES AT HIGH FREQUENCIES FOR SOLAR CELL APPLICATIONS****Hatice KANBUR ÇAVUŞ**

Prof. Dr., Yozgat Bozok University, Institute of Hemp Research, Department of Material and Energy, Yozgat-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-8525-0313

Bozok Teknopark, Hadid Enerji, Yozgat-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-8525-0313

Caner İLDEŞ

Dr., Yozgat Bozok University, Application and Research Center of Science and Technology (BILTEM), Yozgat, Türkiye, ORCID: 0000-0003-3168-935X

Murat ÇAVUŞ

Assistant Professor, Yozgat Bozok University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Yozgat, Türkiye, ORCID: 0000-0002-2341-6485

Recep ŞAHİNGÖZ

Prof. Dr., Yozgat Bozok University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, Yozgat-Türkiye, ORCID: 0000-0002-9525-8068

Abstract

The CdTe is an important semiconductor for device applications such as solar cells, radiation detectors and diodes due to its properties such as high optical absorption coefficient and direct band gap in the visible light spectrum. In this study, frequency and voltage dependent capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω -V) characteristics of Au/n-type CdTe Schottky diodes were investigated at high frequencies (500 kHz - 5 MHz) and a wide voltage range ($\pm 15V$) at room temperature. The dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), dielectric loss tangent ($\tan\delta$), ac electrical conductivity (σ_{ac}), complex impedance (Z^*) and electrical complex modulus (M^*) of Au/n-type CdTe Schottky diodes were calculated from C-V and G/ω -V measurements. The obtained results showed that high frequencies have a significant effect on the electrical properties. The study provided an important basis for evaluating the reliable operation of Au/n-type CdTe Schottky diodes at high frequencies by revealing the changes in dielectric constant and impedance values. In addition, series resistance (R_s) and interface states density (N_{ss}) were investigated in these frequency and voltage ranges. The N_{ss} was obtained from the C-V and G/ω -V measurements using the Hill-Coleman method. It was seen that the effects of the R_s and N_{ss} values decreased at high frequencies.

Keywords: CdTe, Dielectric constants, Impedance, Electric modulus, Series resistance.

Introduction

Semiconductor materials are promising material in electrical and optoelectronic devices. Among the semiconductor materials, cadmium telluride, a group II-VI semiconductor having characteristic band gap 1.58 eV in bulk form has been used in different optoelectronic devices, e.g., Solar cell, LED, Laser, light emitting diodes, photo detectors, biosensors, etc. (Savadoyo 1998; Motinho et al., 2003; Sharma et al., 2003). The CdTe based heterojunctions, Schottky barriers are important for application in such devices (Rose et al., 2002; Candless et al., 2003; Gilmore et al., 2003). The Schottky barriers of CdTe with different metals have been studied by researchers (Feldman et al., 2004; Bahujbal et al., 2020; Sittinger et al., 2008). The electrical properties of Schottky devices are affected by metal semiconductor interface or surface properties of semiconductors (Bhujbal, 2019).

In the literature, several techniques have been employed for the preparation of thin CdTe films, including sputtering, spray pyrolysis, metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD), and thermal evaporation (Han et al., 1998; Surabhi et al., 2021; Tatsuoka et al., 1993; Hernández-Contreras et al., 2002; Ubale et al., 2006; Nishino et al., 1996; Deivanayaki et al., 2010). Among these, thermal evaporation stands out as a

particularly advantageous method due to its high deposition rates and cost-effectiveness. This technique relies on a robust vacuum environment, which enables the fabrication of ultra-high purity thin films. Consequently, it is widely used in the development of CdTe-based devices. Recent studies have extensively reported on the structural and optical properties of CdTe thin films produced using thermal evaporation (Khan et al., 2018; Singh et al., 2010; Kestner et al., 2004; Barış 2013; Dhruv et al., 2022; Shaikh et al., 2020).

The integration of CdTe into practical device applications necessitates a thorough understanding of the material's physical principles, particularly the properties of its interfaces. These insights are crucial for optimizing device performance and reliability (Sze 1981; Rhoderick 1988). For instance, investigations into the dielectric properties of thermally evaporated Au/n-CdTe Schottky diodes have provided valuable data regarding the material's electrical behavior under different conditions. In this work, our aim is to investigate experimentally the frequency and voltage dependence of forward and reverse bias C-V and G/w-V characteristics of Au/CdTe diodes by considering high frequencies. The frequency and voltage of interface states density was obtained from the C-V and G/ω-V measurements using the Hill-Coleman method (Hill, 1980).

Materials and Methods

CdTe thin films were fabricated on monocrystalline CdTe (111) substrates using the thermal evaporation technique under a vacuum of approximately 2×10^{-5} Torr. The CdTe wafers underwent a standard cleaning procedure and were subsequently quenched in deionized water with a resistivity of $18 \text{ M}\Omega$ to ensure a clean surface. Following this, high-purity gold (Au) metal (99.999%) with a thickness of 1000 \AA was thermally evaporated onto the wafers in a vacuum system at a pressure of $\sim 10^{-6}$ Torr. To form low-resistance ohmic contacts, the samples were thermally annealed at $400 \text{ }^\circ\text{C}$ for 5 minutes under a flow of N_2 gas. After the formation of ohmic contacts, circular Au rectifying contacts with a diameter of 1 mm and a thickness of 1100 \AA were deposited onto the CdTe surface (Figure 1). Hall Effect measurements confirmed that the CdTe films exhibited n-type conductivity. The capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) characteristics of the Au/n-CdTe Schottky diode were analyzed at room temperature using a Semiconductor Parameter Analyzer.

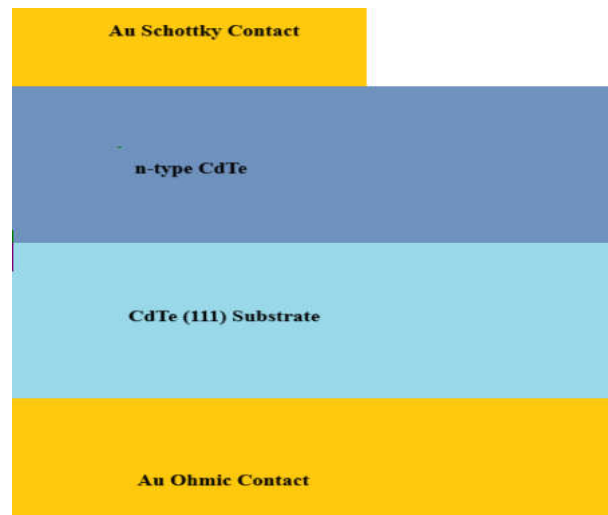


Figure 1. Au/n-type CdTe Schotky diode

Findings and Discussion

Impedance spectroscopy is an important analytical tool in materials research and characterization, as the results can often be related to the complex microstructure of materials. Therefore, we first measured C-V and G/w-V in the frequency range of 500 kHz to 5000 kHz, between +15 V and -15 V. Since C and G/W values are constant after -4 V at all frequencies, the values between -4 V and 15 V are shown in Figure 2 (Sze 1981; Rhoderick 1988).

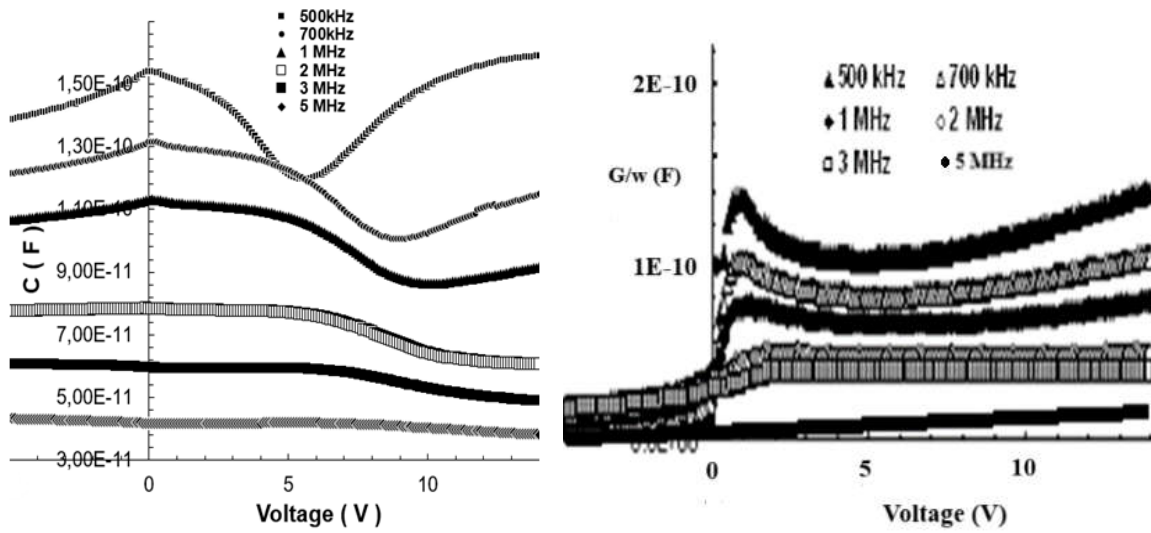


Figure 2. C-V and G/w-V characteristics of the Au/CdTe Schottky barrier diode

The frequency distribution of N_{ss} can be derived from Hill Coleman method by using the following equation (Hill 1980):

$$N_{ss} = \left(\frac{2}{qA} \right) \frac{(G_m/\omega)_{max}}{((G_m/\omega)_{max} C_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2} \quad (1)$$

where, C_m and G_m are the measured capacitance and conductance values in the strong accumulation region. A is the area of the diode, w is the angular frequency, C_{max} and G_{max} are the measured capacitance and conductance which correspond to peak values, C_{ox} is the capacitance of insulator layer. From this relation, C_{ox} is obtained as

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (2)$$

The density distribution profile of N_{ss} for Au/n-CdTe diode was obtained by using Eq. 1 and given in Figure 3. The values of various parameters for the Au/CdTe Schottky barrier diodes determined from C-V and G/ ω -V characteristics in frequency range of 500 kHz-5000 kHz are given in Table 1.

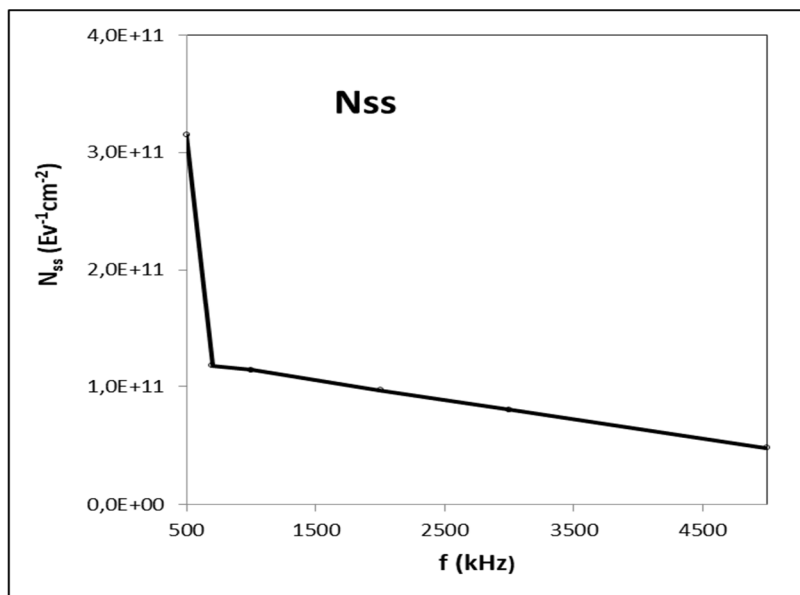


Figure 3. Interface states density (N_{ss}) for various frequencies

Table 1. The calculated electronic parameters

f(kHz)	V _{max} (V)	C _{max} (F)	G _{max/w}	N _{ss} (eV ⁻¹ cm ⁻²)
500	12.1	1.56x10 ⁻¹⁰	1.91x10 ⁻¹⁰	3.15x10 ¹¹
700	2.2	1.28x10 ⁻¹⁰	7.20x10 ⁻¹¹	1.18x10 ¹¹
1000	3	1.11x10 ⁻¹⁰	7x10 ⁻¹¹	1.14x10 ¹¹
2000	4	7.75x10 ⁻¹¹	6x10 ⁻¹¹	9.71x10 ¹⁰
3000	4.8	5.95x10 ⁻¹¹	5x10 ⁻¹¹	8.06x10 ¹⁰
5000	5.8	4.19x10 ⁻¹¹	3x10 ⁻¹¹	4.82x10 ¹⁰

The dielectric behaviour of the structure has been studied. The complex permittivity (ϵ^*) formalism has been used to obtain significant data about the chemical and physical behaviour of the electrical and dielectric properties. The complex permittivity can be defined in the following complex form (Sze 1981; Rhoderick 1988)

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

The real part of the complex permittivity, the dielectric constant (ϵ'), at the various frequencies is calculated using the measured capacitance values at the strong accumulation region from the relation (Sze 1981; Rhoderick 1988)

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (4)$$

where C_0 is capacitance of an empty capacitor. $C_0 = \epsilon_0(A/d)$; where A is the rectifier contact area in cm⁻², d is the interfacial insulator layer thickness and ϵ_0 is the permittivity of free space charge ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm). In the strong accumulation region, the maximal capacitance of Schottky diode corresponds to the insulator capacitance (C_{ox}) ($C_{ac} = C_{ox} = \epsilon'\epsilon_0A/d$). The imaginary part of the complex permittivity, the dielectric loss (ϵ''), at the various frequencies is calculated using the measured conductance values from the relation,

$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} \quad (5)$$

The loss tangent ($\tan \delta$) can be expressed as follows

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (6)$$

The ac electrical conductivity (σ_{ac}) of the dielectric material is given by the following equation

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta (d/A) = \epsilon'' \omega \epsilon_0 \quad (7)$$

Analysis of the complex permittivity (ϵ^*) data within the Z^* formalism ($Z^* = 1/Y^* = 1/i\omega C_0 \epsilon^*$) is commonly used to separate the bulk and the surface phenomena and to determine the bulk conductivity of the material (Dhruv et al., 2022; Shaikh et al., 2020). The complex impedance or the complex permittivity ($\epsilon^* = 1/M^*$) data were transformed into the M^* (complex modulus) formalism using the following relation

$$M^* = j\omega C_0 Z^* \quad (8)$$

or

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (9)$$

The study of Complex modulus formalism is a very important and convenient tool to determine the dynamical aspects of electrical transport phenomena (such as carrier/ion hopping rate, conductivity relaxation time) (Sze 1981; Rhoderick 1988).

The variations of dielectric constant, dielectric loss, $\tan \delta$ and a.c. conductivity with frequency for the CdTe thin films in the frequency range of 500 kHz–5000 kHz are shown in Figure (4-6) respectively. The dielectric constant is found to decrease with the increase in frequency. The CdTe exhibited the similar behaviour in the case of dielectric loss. In general, four possible mechanisms may be contributed to be low-frequency dielectric behaviour of MIS Schottky diodes; interface states, ac conductivity, dipole-orientation and charge carriers (Sze 1981; Rhoderick 1988). Figure 6 displays the variation of ac conductivity with frequency. The ac conductivity of CdTe structure is found to increase with the frequency.

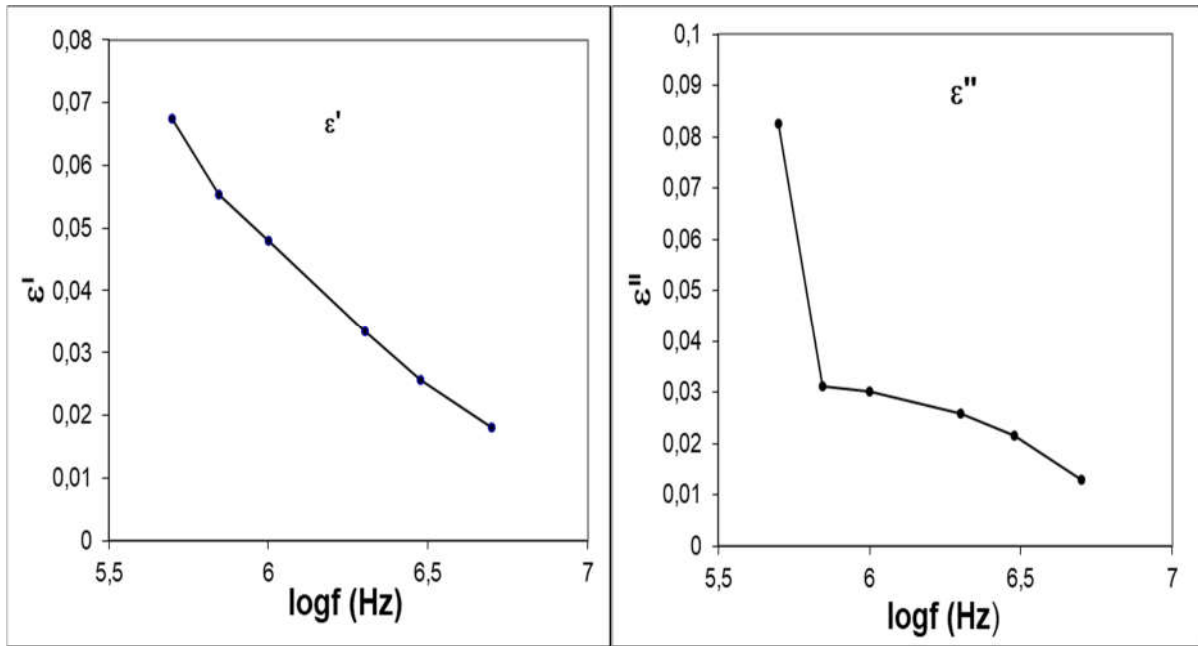


Figure 4. Variations of the dielectric constant and dielectric loss of Au/n-CdTe Diode

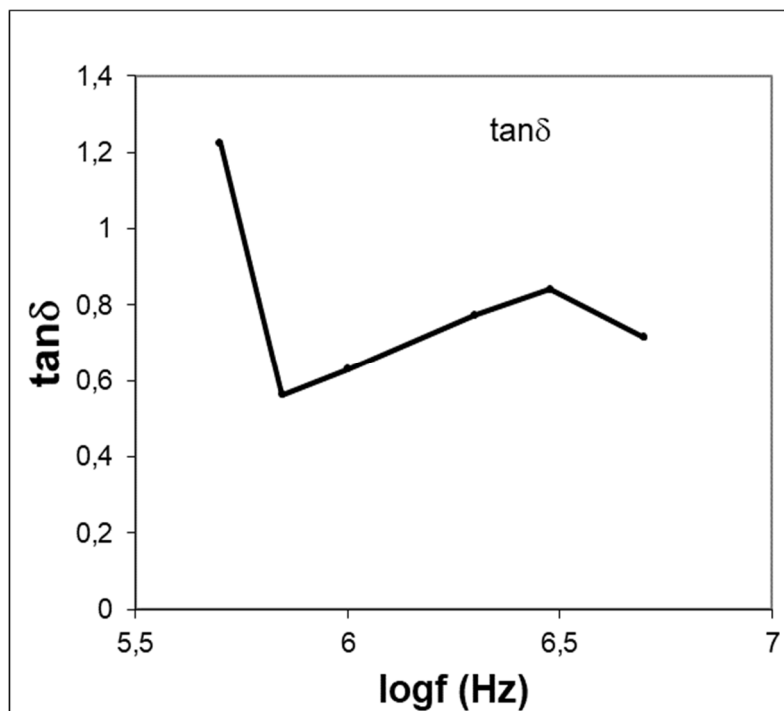


Figure 5. Variations of the tangent loss of Au/n-CdTe Diode

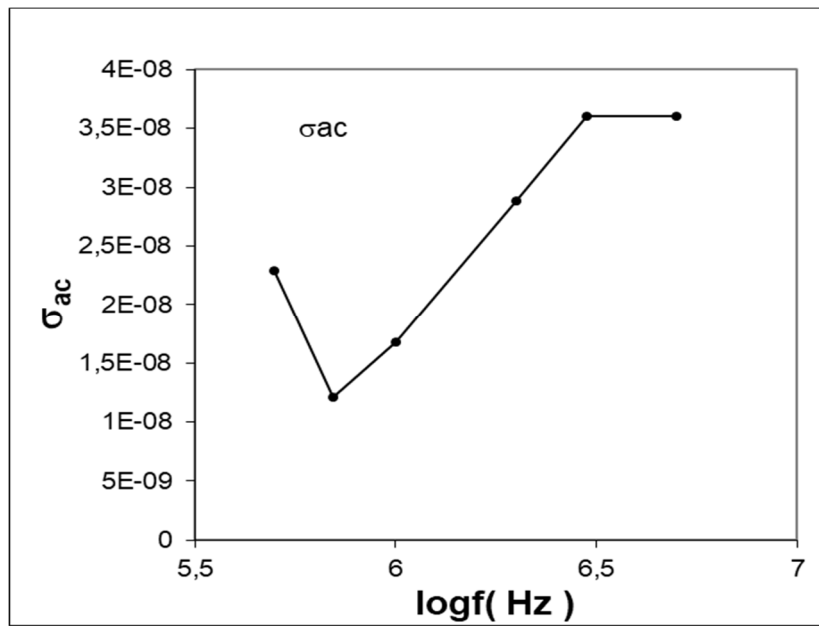


Figure 6. Variations of the ac conductivity of Au/n-CdTe Diode

We have plotted the real part of complex electric modulus and imaginary part as a function of frequency as shown in Figure 7. From the Figure 7 it is clear that, the M' and M'' values are low at low frequencies and reaches a maximum at high frequencies (Sze 1981; Rhoderick 1988).

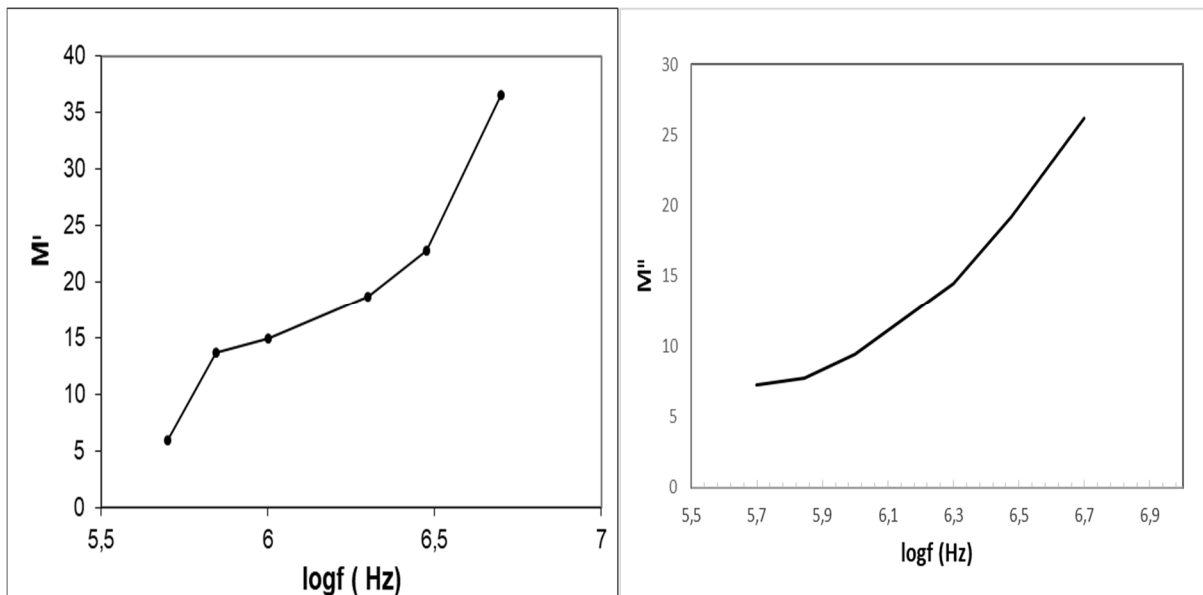


Figure 7. Real part of electric modulus and imaginary part of electric modulus as a function of frequency

As can be seen from Figure 8, the real part and the imaginary part of the complex impedance decrease with increasing frequency. Because at high frequencies, the effect of the interface states decreases and the contribution to the impedance decreases (Sze 1981; Rhoderick 1988).

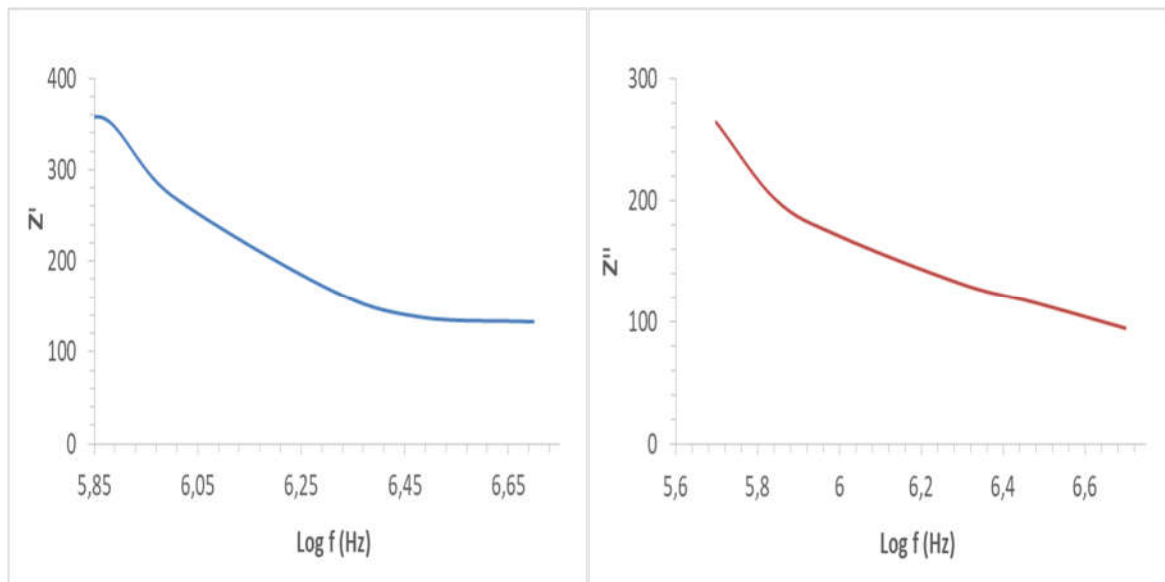


Figure 8. Variations of the real part and imaginary part impedance.

Conclusion and Recommendations

The frequency dependence of dielectric properties of Au/n-CdTe Schottky diodes was investigated in the range of 500 kHz–5000 kHz using the measured C-V and G/ω -V. First of all, it was observed that the frequency-dependent interface states decreased with increasing frequency. This is because the lifetimes of interface states at high frequencies, especially above 1000 KHz, have difficulty in following ac signals. Similarly, it was found that the dielectric constant and dielectric loss values decreased with increasing frequency. Conductivity increased with increasing frequency due to the decrease in the effect of interface states. In parallel, the real part of the impedance Z and the imaginary part of Z decrease with increasing frequency. The electric modulus values also increase with increasing frequency. As a result, the frequency and voltage-dependent dielectric properties confirm that R_s and N_{ss} are important parameters that strongly affect the electrical parameters for Au/n-CdTe Schottky diode.

ACKNOWLEDGMENT

This work was studied by Yozgat Bozok University Scientific Laboratory.

References

- Barış, B. (2013). Frequency dependent dielectric properties in Schottky diodes based on rubrene organic semiconductor. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 54, 171-176.
- Bhujbal, P. K., et al. (2020). Temperature dependent studies on RF Sputtered Al:ZnO thin films. *Eng. Sci.*, 10, 58-67.
- Deivanayaki, S., Jayamurugan, P., Mariappan, R., and Ponnuswamy, V. (2010). Optical and structural characterization of CdTe thin films by chemical bath deposition technique. *Chalcogenide Lett.*, 7(3), 159-163.
- Dhruv, D. K. et al. (2022). Fabrication and transport properties of thermally evaporated cadmium selenide thin films for photovoltaic applications. *Materials Today: Proceedings*, 55 (1), 67-72.
- Feldman, S. D., Collins, R. T., Kaydanov, V., and Ohno, T. R. (2004). Effects of Cu in CdS/CdTe solar cells studied with patterned doping and spatially resolved luminescence. *Appl. Phys. Lett.*, 85, 1529-1531.
- Gilmore, A. S., Kaydanov, V., and Ohno, T. R. (2003). *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 763, 453-458.
- Han, M. S., Kang, T. W., Leem, J. H., Lee, M. H., Kim, K. J., and Kim, T. W. (1998). Strain effects in CdTe/Si heterostructures. *J. Appl. Phys.*, 82, 6012.

- Hernández-Contreras, H., Contreras-Puente, G., Aguilar-Hernández, J., Morales-Acevedo, A., et al. (2002). CdS and CdTe large area thin films processed by radio-frequency planar-magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 403(404), 148–152.
- Hill, W. A., Coleman, C.C. (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid State Electronics*, 23(9), 987-993.
- Kestner, J. M. et al. (2004). An experimental and modeling analysis of vapor transport deposition of cadmium telluride. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 83(1), 55–65.
- Khan, N. A., Rahman, K. S., Aris, K. A., et al. (2018). Effect of laser annealing on thermally evaporated CdTe thin films for photovoltaic absorber application. *Sol. Energy*, 173, 1051-1057.
- Mc Candless, B. E., and Sites, J. R. (2003). *Handbook of PV Science and Engineering*, Edited by Legue A and Hegudus S (Wiley West Sussex, England), 633.
- Moutinho, H. R., Albin, D., Yaan, Y., Dhere, R. G., Li, X., Perkis, C., et al. (2003). Deposition and properties of CBD and CSS CdS thin films for solar cell application. *Thin Solid Films*, 436, 175-180.
- Nishino, H., and Nishijima, Y. (1996). CdTe(111)B/Si(100) structure grown by metalorganic vapor phase epitaxy with Te adsorption and annealing. *J. Cryst. Growth*, 167(3–4), 488-494.
- Rhoderick, E. H., and Williams, R. H. (1988). *Metal–Semiconductor Contacts*, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford.
- Rose, D., Powell, R., Jayamaha, U., and Maltby, M. (2002). Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 555-558.
- Savadogo, O. (1998). Chemically and electrochemically deposited thin films for solar energy materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 52(3-4), 361-388.
- Singh, S., Kumar, R., and Sood, K.N. (2010). Structural and electrical studies of thermally evaporated nanostructured CdTe thin films. *Thin Solid Films*, 519(3), 1078-1081.
- Sittinger, V. F., et al. (2008). High power pulsed magnetron sputtering of transparent conducting oxides. *Thin Solid Films*, 516, 5847-5859.
- Shaikh, S. S., et al. (2020). Exploration of the spray deposited Cadmium Telluride thin films for optoelectronic devices. *Physica B: Condensed Matter*, 580, 411831.
- Sharma, R. K., Jain, K., and Rastogi, A. C. (2003). Growth of CdS and CdTe thin films for the fabrication of n-CdS/p-CdTe solar cell. *Current Appl. Phys.*, 3, 199-204.
- Surabhi, S., Anurag, K., and Kumar, S. R. (2021). Effect of annealing on the structural, compositional and optical properties of CdTe films. *Mater. Today: Proc.*, 45, 6, 4477- 4482.
- Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Tatsuoka, H., Kuwabara, H., Nakanishi, Y., and Fujiyasu, H. (1993). CdTe(111) growth on misoriented Si(100) substrates by hot-wall epitaxy. *J. Cryst. Growth*, 129(3–4), 686–690.
- Ubale, A. U., Dhokne, R. J., et al. (2006). Characterization of nanocrystalline cadmium telluride thin films grown by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *Bull Mater Sci.*, 29, 165-168.



ÇİFT YÜZEYLİ PANELLERDE KİRLENME KAYBI VE YAPI GÖLGELENME FAKTÖRÜNÜN PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİ

Emre ÖZER

Öğr. Gör., Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye
(Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0001-5881-2253

Furkan DİNÇER

Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
ORCID: 0000-0001-6787-0850

Özet

Çift yüzeyli paneller her iki yüzeyinden de elektrik enerjisi üretebilmesi sebebiyle giderek yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu panellerin performansı her bir yüzeyi için üzerine düşen ışınım miktarına doğrudan bağlıdır. Panel yerleşimi, yansıtıcı yüzeyler, çevresel koşullar gibi birçok parametre ışınımı dolayısıyla çift yüzeyli panellerin elektrik enerjisi üretimini etkiler. Bu çalışmada PVsyst simülasyon programı kullanılarak çift yüzeyli panellerin performansını etkileyen yapı gölgeleme faktörü ve kirlenme kaybı faktörüne odaklanılmıştır. Kayseri ili koşullarında gerçekleştirilen çalışmada, her iki parametre için de %5, %10 ve %15 şekilde belirlenen değişkenler ile toplam 9 farklı senaryo incelenmiştir. En yüksek enerji üretimi hem kirlenme hem de yapı gölgelemenin en az olduğu %5 değeri için 89,1 MWh/Yıl olarak elde edilmiştir. Bu parametrelerin elektrik enerjisi üretimine olan etkileri detaylı olarak analiz edilip karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çift yüzeyli panel, Yapı gölgeleme faktörü, Kirlenme kaybı, PV enerji üretimi, Performans.

EFFECT OF SOILING LOSS AND STRUCTURE SHADING FACTORS ON THE PERFORMANCE OF BIFACIAL PANELS

Abstract

The use of bifacial panels is becoming increasingly prevalent due to their ability to generate electrical energy from both surfaces. However, the performance of these panels is dependent on the amount of radiation falling on each surface. The electricity production of bifacial panels is influenced by a number of factors, including the placement of the panel, the reflective surfaces used, and the surrounding environmental conditions. These factors affect the irradiance, which plays a crucial role in determining the electricity production of bifacial panels. In this study, the PVsyst simulation program is utilized to concentrate on the structure shading and soiling loss factor, which impact the performance of bifacial panels. A total of nine different scenarios were analyzed, with variables set at 5%, 10%, and 15% for both parameters in the Kayseri province. The highest energy production was observed for the 5% value, which exhibited the lowest levels of both soiling and structure shading, with an estimated annual generation of 89,1 MWh. The impact of these parameters on electrical energy generation was analyzed and compared in detail.

Keywords: Bifacial, Structure shading factor, Soiling loss, PV energy generation, Performance.

Giriş

Güneş ışınımından elektrik enerjisi elde etmeyi sağlayan fotovoltaik paneller tek yüzeyli (ing. monofacial) veya çift yüzeyli (ing. bifacial) olarak üretilebilir. Çift yüzeyli paneller (BPV), güneş ışığını hem ön yüzeyinden hem de arka yüzeylerden yakalayabildiğinden tek yüzeyli panellere göre daha fazla enerji

üretebilmektedirler (Mahim ve ark.,2024). Son yıllarda kullanımı giderek artan çift yüzeyli panellerin pazar payı oranının 2029 için % 60'a ulaşacağı öngörülmektedir (Deline ve ark.,2019).

Çift yüzeyli panellerin performansını temelde albedo etkisi, montaj yüksekliği, panel eğim açısı faktörlerinin etkilediği görülmektedir (Ganesan ve ark.,2023),(Yusufoglu ve ark.,2014). Literatürde yapılan çalışmaların çoğunun bu faktörlere odaklandığı görülmektedir. Bu çalışmada ise daha az incelenen yapı gölgeleme faktörü ve kirlenme kaybı faktörlerinin çift yüzeyli panellerin enerji üretimi üzerindeki etkilerini incelenmiştir.

Panellerin üreteceği elektrik miktarında ışık kaynaklı bozulma, kirlenme vb. nedenlerle kayıplar yaşanabilir (Dincer ve Ozer, 2023). Kirlenme kaybı faktörü panel yüzeyinde meydana gelen özellikle tozlanmaya bağlı kayıpları ifade etmektedir. Gölgeleme faktörü ise panelin arka yüzeyinde elektrik üretecek hücreler ile zemin arasına giren herhangi bir engeli ifade eder (PVsyst, 2024) . Örneğin panelin montajında kullanılan kontroksiyon malzemesine bağlı zeminde oluşacak gölge arka yüzey elektrik enerjisi üretimini etkiler. Gölgeleme miktarına bağlı olarak zeminde oluşan gölge zeminden yansıyan ışınımı azaltacağından dolayısıyla panelin arka yüzeyinin üreteceği elektrik miktarını azaltır.

Bu çalışmada PVsyst simülasyon programı kullanılarak Kayseri ili koşullarında çift yüzeyli panellerin performansı analiz edilmiştir. Performansı etkileyen yapı gölgeleme faktörü ve kirlenme kaybı farklı oranlarda belirlenerek sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmaya ait ayrıntılar materyal ve yöntem bölümünde sunulmuştur. Kullanılan materyal ve yöntemlere göre elde edilen bulgular tartışılmıştır. Ardından sonuç ve değerlendirme yapılmıştır.

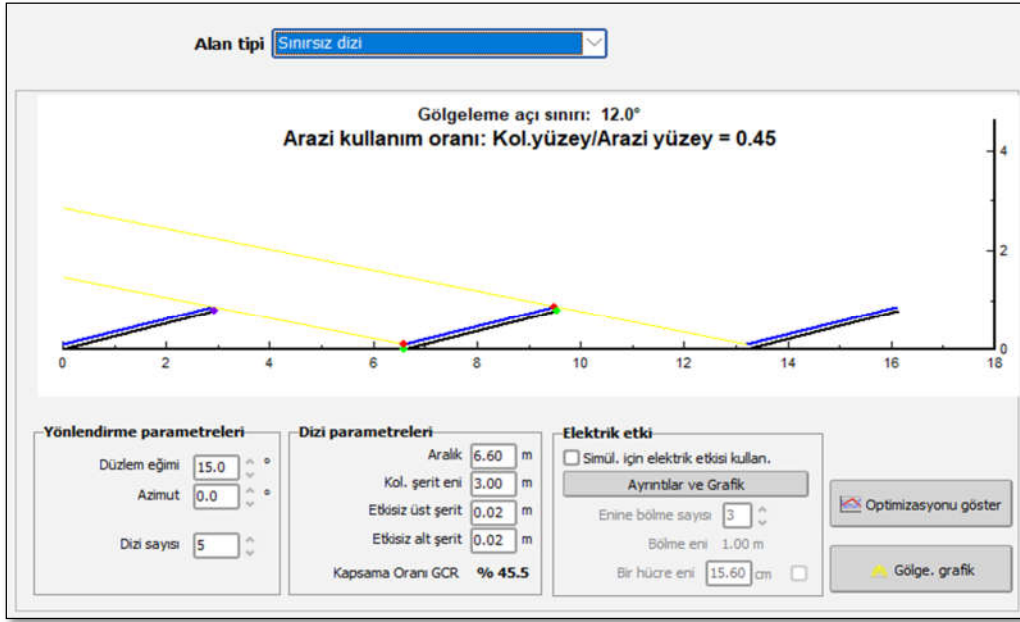
Materyal ve Yöntem

Çift yüzeyli yani hem güneş panelinin önünde hem de arkasında hücre olan bu panellerin kirlenme ve yapı gölgeleme faktörleri için performans analizi yapılabilmesi amacıyla öncelikle lokasyon seçimi yapılmıştır. Çalışma lokasyonu için Türkiye'nin İç Anadolu bölgesinde yer alan Kayseri ili belirlendi. Seçilen nokta 1054 m rakıma sahip, 38.77 ° Kuzey Enlemi ve 35.50° doğu boylamında yer alır. Sistemin tasarımı ve optimizasyonunda PVsyst yazılımı kullanıldı. Simülasyon programında belirlenen konum için Metenorm veri tabanından oluşturulmuş aylık meteorolojik veriler Şekil 1'de yer almaktadır.

Konum Kayseri/Erkilet (Türkiye)						
Veri kaynağı <input type="text" value="Kayseri/Erkilet_MN81.SIT -- Meteororm 8.1 (2005-2013)"/>						
	Global yatay ışınlama	Yatay difüz ışınlama	Sıcaklık	Rüzgar hızı	Linke bulanıklığı	Bağıl nem
	kWh/m ² /ay	kWh/m ² /ay	°C	m/s	[-]	%
Ocak	65.3	29.7	-1.6	2.20	3.158	78.6
Şubat	87.3	33.3	0.7	2.40	3.532	74.0
Mart	123.7	50.9	5.8	2.70	4.124	63.4
Nisan	156.9	63.7	10.4	2.50	4.719	57.3
Mayıs	203.8	73.0	15.1	2.40	4.281	56.5
Haziran	224.1	62.8	19.6	2.50	3.719	52.7
Temmuz	236.4	62.8	23.5	2.50	3.575	42.3
Ağustos	222.1	45.8	23.5	2.30	3.577	44.1
Eylül	173.1	38.9	17.9	1.99	3.398	49.6
Ekim	116.7	38.1	12.0	1.70	3.643	60.4
Kasım	74.4	28.7	5.2	1.59	3.298	70.1
Aralık	62.0	24.7	0.5	1.90	3.109	77.2
Yıl	1745.8	552.4	11.0	2.2	3.678	60.5
Global yatay ışınlama yıldan yıla değişkenlik 4.4%						

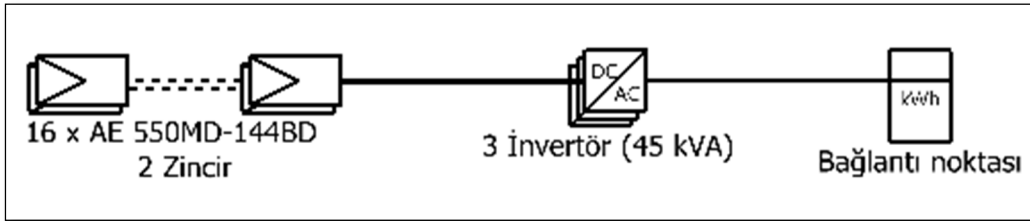
Şekil 1. Belirlenen lokasyona ait aylık meteorolojik veriler

Şebekeye bağlantılı sistemde, Şekil 2’de görüleceği üzere paneller 15° eğim açısı ve 0° azimut açısı ile sınırsız bir dizi halinde konumlandırılmıştır. Paneller arasındaki mesafe 6,60 m iken, panelin şerit eni 3,0 m olarak modelleme parametreleri oluşturulmuştur.



Şekil 2. Panel konumlandırma parametreleri

Şekil 3’de önerilen sisteme ait tek hat şeması gösterilmiştir. Sistem, 2 zincir halinde, 16 seri ve 6 paralel bağlı modül bir araya gelmesiyle toplam 96 adet PV panelden oluşur.



Şekil 3. Önerilen sistem için tek hat şeması

Sistemin en önemli bileşenleri panel ve invertöre ait detayların belirlenmesi önemlidir. Şekil 4’de tercih edilen PV modülü ve İntöröre ait ayrıntılar görünmektedir. Panellerin 250 m² alanda kurulması planlanmıştır. Metrekare başına yüksek enerji üretimi sebebiyle seçilen iki yüzeyli (bifacial) fotovoltaik panel, 550 Watt peak (Wp) nominal güce sahip, silikon mono-kristal yarı hücre teknolojisine sahiptir. Paneller 2022 yılında üretilmiştir ve akım-voltaj karakteristikleri Şekil 5’te gösterilmiştir. Ayrıca sistemde kullanılan BYD model invertör, 380V çıkış voltajı, 1000V maksimum giriş voltajı ve % 97.50 maksimum verime sahip 45 kW AC güçtedir.

Alt dizinin ismi ve yönü
İsim: PV Array
Yön: Sınırsız dizi
Eğim: 15°
Azimut: 0°

Ön boyutlandırma yardımı
 Boyutlandırmasız
 Boyutlandır
Planlanan güç: 53 kWp
... veya mevcut alan(modül): 250 m²

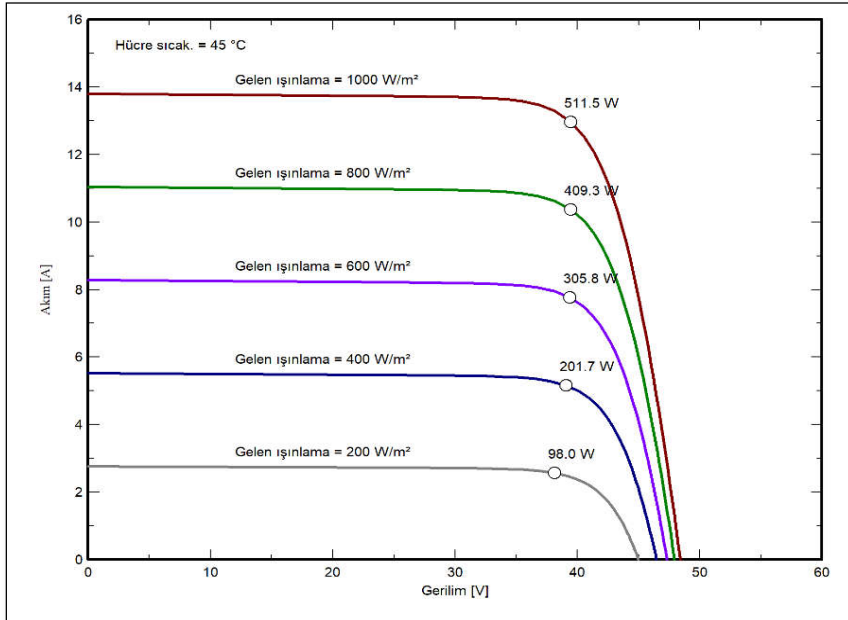
PV modül seçimi
Mevcut: AE Solar
Filtre: Tüm PV modüller
Çift yüzü modül: Çift yüzü sistem
550 Wp 36V Si-mono AE 550MD-144BD 2022 yılından beri Manufacturer 2020
 Optimizer kullan
Gerilim boyutlama : Vmpp (60°C) 37.1 V
Voc (-10°C) 56.5 V

İnvertör seçimi
Mevcut: BYD
Çıkış gerilimi 380 V 50Hz
15 kW 360 - 800 V TL 50/60 Hz BSG15KTL-E 2011 yılından beri
İnvertör sayısı: 3
Çalışma gerilimi: 360-800 V İnvertör global gücü: 45.0 kWac
Maksimum giriş gerilimi: 1000 V

Dizi boyutlandırması
Modül ve zincir sayısı
Seri mod. sayısı: 16 (10 ile 17 arasında)
Zincir sayısı: 6 (5 ile 6 arasında)
Aşırı yük kaybı: 0.1 %
Nom. güç oranı: 1.17
Panel sayısı: 96 Yüzey: 248 m²

İşletme koşulları
Vmpp (60°C): 593 V
Vmpp (20°C): 692 V
Voc (-10°C): 904 V
Yüzey ışınım: 1000 W/m²
İmpp (STC): 77.5 A
Isc (STC): 82.0 A
İsc (STC'de): 82.0 A
Veri maks: Veri maks STC
Maksimum işletme gücü: 51.6 kW (1073 W/m² için ve 50°C)
Alan nominal gücü (STC): 52.8 kWp

Şekil 4. Kullanılan PV panel ve invertöre ait elektriksel özellikler



Şekil 5. Seçilen iki yüzeyli FV panelin akım-gerilim karakteristikleri

Şekil 6'da çift yüzeyli panel parametrelerinin ayarlanmasına imkân tanıyan bölüm görülmektedir. Sistemin performansı etkileyen yapı gölgeleme faktörü Pvsyst yardım dokümanında "zemin ile hassas arka taraf arasındaki herhangi bir engelin gölgesinin faktörü" şeklinde tanımlanmıştır (PVsyst, 2024).

Bifacial modeli

Simülasyonda kullanma
 2D modeli kullan, sınırsız dizi
 2D modeli kullan, sınırsız takipçi

?

Pedagojik araçlı 2B modeller
 Diğer modeller geliştiriliyor:
 - 3B sahneye göre genel model
 - Arka yüzde ışınım dağılımı

Zemine yansıyan ışınım

Direkt'in zeminde oranı Güneş konumuna göre, model

Zemin üzerinde difüz oranı % 2B modeline göre

Masanın şeffaf kesiri % hassas değil

Zemin albedosu Aylık değerler

Arka yüze yansıyan ışınım

Görüş faktörü % 2B modeline göre

Yapı gölgeleme faktörü % (0 = gölgeleme yok)

PV Dizi davranışı

Uyumsuzluk kaybı faktörü %

Modül bifaciality faktörü % PV modüle göre

Şekil 6. Bifacial modül parametreleri

Hiç gölgeleme olmadığı durumda bu faktör sıfır iken kontroksiyon ya da araya giren bir nesneye bağlı olarak oran değişebilir. Gölgeleme yapı faktörü etkisini incelemek amacıyla Şekil 6'da görülen arka yüze yansıyan ışık kısmında yer alan yapı gölgeleme faktörü %5, %10 ve %15 olarak değiştirilmiştir. Diğer parametreler ise herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Simülasyonda kirlenme kaybı ise detaylı kayıplar kısmında tanımlanır. Yıllık kirlenme faktörü senaryolara bağlı olarak %5, %10 ve %15 belirlenmiştir.

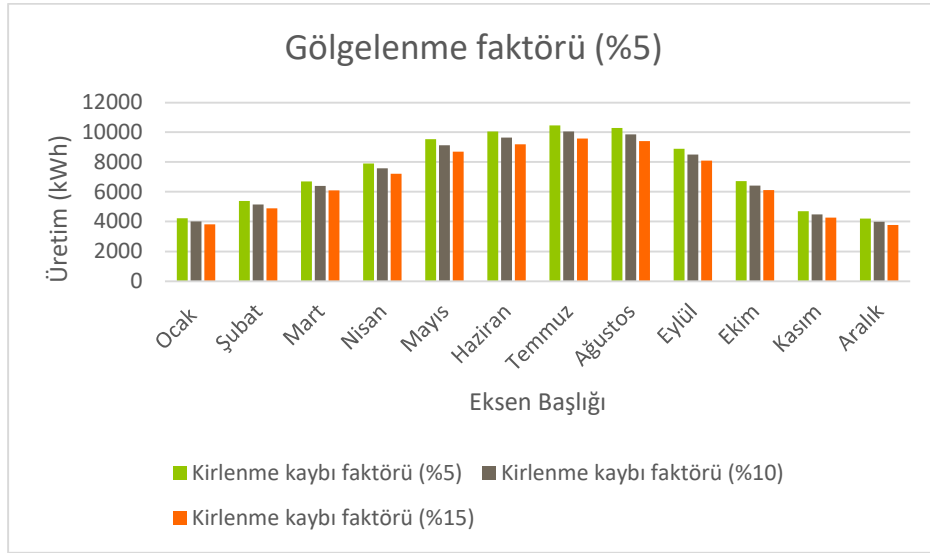
Bulgular ve Tartışma

Sistem materyal ve yöntem bölümünde belirlenen bileşenlerle oluşturulmuş sonrasında farklı modelleme parametreleri altında üretim senaryoları oluşturularak enerji üretim performansları incelenmiştir. İlk senaryo gölgeleme faktörünün %5 ve kirlenme kaybı faktörünün %5 olduğu durumdur. İkinci senaryoda gölgeleme faktörünün %5 ve kirlenme kaybı faktörünün %10'dur. Üçüncü senaryo ise gölgeleme faktörünün %5 ve kirlenme kaybı faktörünün %15 olduğu durumdur. Gölgeleme faktörünün % 5 olduğu, kirlenme kaybı faktörünün ise %5, %10 ve %15 olarak değiştiği üretim senaryoları oluşturulmuştur. Senaryo 1, 2 ve 3'e ait aylık üretim değerleri ve performans oranları tablo halinde Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. % 5 Gölgeleme faktörü altında kirlenme kaybı faktörünün etkisi

Ay	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3	
	Üretim (kWh)	Performans oranı	Üretim (kWh)	Performans oranı	Üretim (kWh)	Performans oranı
Ocak	4.221	0,937	4.018	0,892	3.814	0,847
Şubat	5.397	0,935	5.147	0,891	4.894	0,848
Mart	6.698	0,909	6.407	0,870	6.099	0,828
Nisan	7.905	0,894	7.570	0,856	7.211	0,815
Mayıs	9.527	0,871	9.123	0,834	8.701	0,795
Haziran	10.052	0,852	9.633	0,817	9.192	0,779
Temmuz	10.471	0,832	10.042	0,801	9.589	0,765
Ağustos	10.299	0,832	9.868	0,797	9.417	0,760
Eylül	8.881	0,855	8.496	0,818	8.099	0,780
Ekim	6.727	0,889	6.424	0,849	6.114	0,808
Kasım	4.706	0,910	4.484	0,867	4.260	0,823
Aralık	4.194	0,915	3.989	0,871	3.784	0,826
(Yıl) Toplam	89.076	0,875	85.202	0,837	81.176	0,797

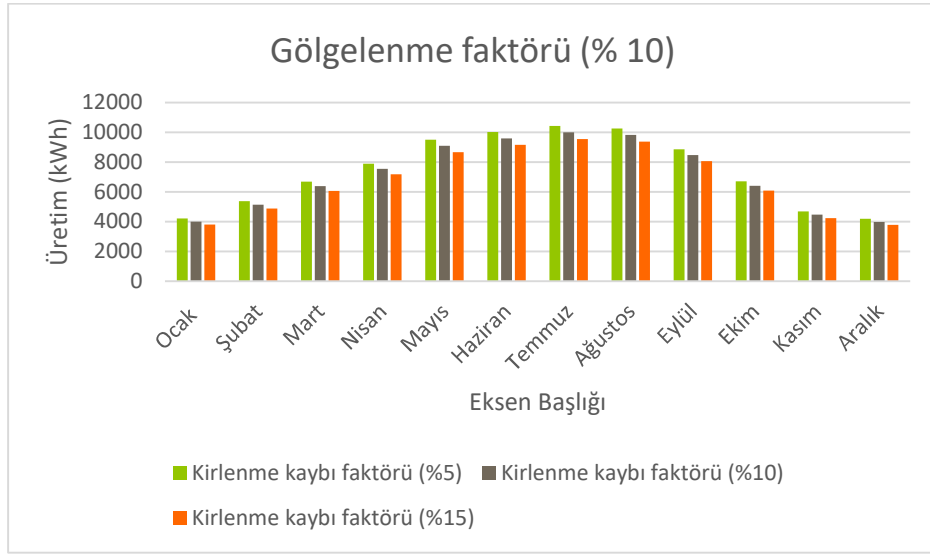
Şekil 7’de ise gölgeleme faktörünün %5 olduğu durumda 3 farklı kirlenme oranı (%5, %10 ve %15) altında aylık üretilen enerji miktarları görülmektedir. En yüksek üretim yaz aylarında (Haziran, Temmuz, Ağustos) gerçekleşmektedir.

**Şekil 7.** %5 gölgeleme faktörü ve %5, %10 ve %15 kirlenme kaybı altında aylık enerji üretimi

Senaryo 4, 5 ve 6 da ise gölgeleme faktörünün %10 olduğu, sırasıyla kirlenme kaybı faktörünün %5, %10 ve %15 olduğu durumlar incelenmiştir. Tablo 2’de % 10 gölgeleme durumunda, kirlenme kaybı faktörünün %5, %10 ve %15 değiştiği senaryolara ait aylık üretim değerleri ve performans oranları görülmektedir. Şekil 8’de ise %10 gölgeleme faktörü ve %5, %10 ve %15 kirlenme kaybı altında aylık enerji üretim miktarları görülmektedir.

Tablo 2. % 10 Gölgeleme faktörü altında kirlenme kaybı faktörünün etkisi

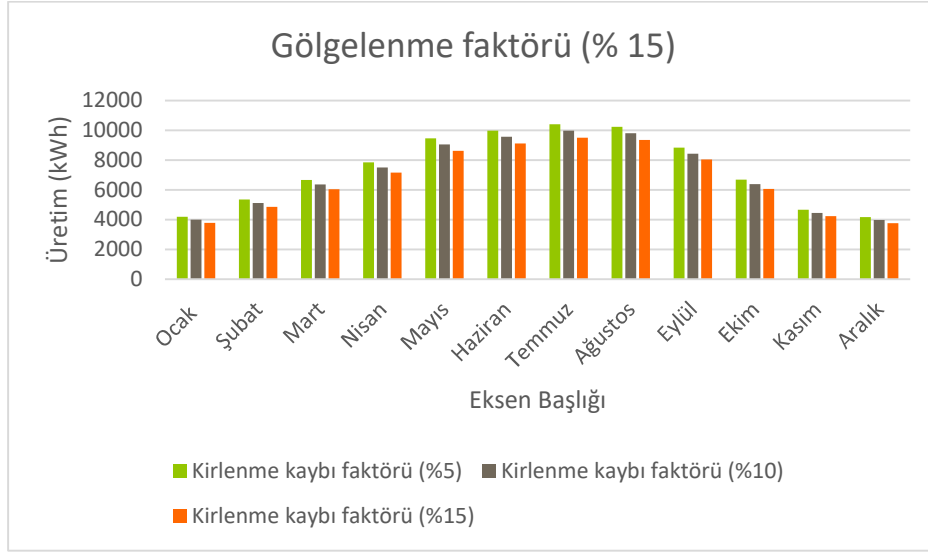
Ay	Senaryo 4		Senaryo 5		Senaryo 6	
	Üretim (kWh)	Performans oranı	Üretim (kWh)	Performans oranı	Üretim (kWh)	Performans oranı
Ocak	4.207	0,934	4.004	0,889	3.801	0,844
Şubat	5.377	0,931	5.126	0,888	4.873	0,844
Mart	6.674	0,906	6.379	0,866	6.071	0,824
Nisan	7.878	0,891	7.537	0,852	7.178	0,811
Mayıs	9.492	0,868	9.083	0,830	8.660	0,792
Haziran	10.015	0,849	9.590	0,813	9.148	0,776
Temmuz	10.434	0,832	9.999	0,798	9.544	0,761
Ağustos	10.264	0,829	9.827	0,794	9.375	0,757
Eylül	8.851	0,852	8.461	0,814	8.064	0,776
Ekim	6.703	0,886	6.397	0,846	6.087	0,805
Kasım	4.691	0,907	4.468	0,864	4.244	0,820
Aralık	4.182	0,913	3.978	0,868	3.774	0,824
(Yıl) Toplam	88.767	0,872	84.851	0,833	80.819	0,794

**Şekil 8.** %10 gölgeleme faktörü ve %5, %10 ve %15 kirlenme kaybı altında aylık enerji üretimi

İncelenen son üç senaryoda (senaryo 7, 8 ve 9) gölgeleme faktörünün %15 ve kirlenme kaybı faktörünün %5, %10 ve %15 olarak değiştiği durumlar göz önüne alınmıştır. Gölgeleme faktörünün % 15, kirlenme kaybı faktörünün ise %5, %10 ve %15 olarak değiştiği sırasıyla Senaryo 7, 8 ve 9'a ait aylık üretim değerleri ve performans oranları tablo halinde Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. % 15 Gölgeleme faktörü altında kirlenme kaybı faktörünün etkisi

Ay	Senaryo 7		Senaryo 8		Senaryo 9	
	Üretim (kWh)	Performans oranı	Üretim (kWh)	Performans oranı	Üretim (kWh)	Performans oranı
Ocak	4.192	0,931	3.989	0,886	3.786	0,841
Şubat	5.358	0,928	5.108	0,885	4.855	0,841
Mart	6.653	0,903	6.357	0,863	6.048	0,821
Nisan	7.855	0,888	7.512	0,849	7.153	0,809
Mayıs	9.461	0,865	9.051	0,827	8.628	0,789
Haziran	9.982	0,846	9.556	0,810	9.113	0,773
Temmuz	10.400	0,830	9.964	0,795	9.508	0,759
Ağustos	10.235	0,826	9.796	0,791	9.344	0,755
Eylül	8.825	0,849	8.434	0,812	8.037	0,774
Ekim	6.680	0,883	6.375	0,843	6.065	0,802
Kasım	4.674	0,904	4.452	0,861	4.228	0,817
Aralık	4.169	0,910	3.965	0,866	3.760	0,821
(Yıl) Toplam	88.484	0,869	84.559	0,830	80.523	0,791

**Şekil 9.** %15 gölgeleme faktörü ve %5, %10 ve %15 kirlenme kaybı altında aylık enerji üretimi

Şekil 9'da %15 gölgeleme faktörü ve %5, %10 ve %15 kirlenme kaybı altında aylık enerji üretim miktarları görülmektedir.

Sistemi enerji üretimini etkileyen iki parametreye ait incelenen bütün senaryoların yıllık üretim miktarları özetle Tablo 4'te verilmiştir. Yıllık enerji üretimi en yüksek 89,1 MWh ile hem kirlenme hem de yapı gölgelemenin % 5 olduğu durumda gerçekleşirken; en düşük 80,5 MWh ile hem kirlenme hem de yapı gölgelemenin % 15 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

Tablo 4. Gölgeleme faktörü ve kirlenme kaybı faktörüne bağlı yıllık enerji üretim miktarı

Senaryo	Gölgeleme faktörü	Kirlenme kaybı faktörü	Üretim (MWh/yıl)
1	%5	%5	89,1
2	%5	%10	85,2
3	%5	%15	81,2
4	%10	%5	88,8
5	%10	%10	84,9
6	%10	%15	80,8
7	%15	%5	88,5
8	%15	%10	84,6
9	%15	%15	80,5

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada çift yüzeyli panellerde performansını etkileyen kirlenme kaybı ve yapı gölgeleme faktörünün enerji üretimine etkisi incelenmiştir. Her iki faktörde enerji üretimini olumsuz etkilemektedir. İki parametrede aylık üretim miktarlarını belirli oranda azaltmakla panelin yıllık üretim örüntüsünü bozmamaktadır. Kirlenme kaybı faktörü çoğunlukla panel yüzeyinde meydana gelen özellikle tozlanmaya bağlı kayıpları ifade ettiğinden panelin temiz tutulması üretimin artması açısından önemlidir. Gölgeleme faktörüne bağlı kayıplardan kaçınmak için ise panelin arka yüzeyinin montajında kullanılan malzeme mümkün olduğunca ince ve zeminde gölge oluşturmayacak özellikte olmalıdır.

Ayrıca, çalışmada belirlenen konum olan Kayseri ilinin meteorolojik koşullarında çift yüzeyli panellerin incelenmesi, benzer özelliklerine sahip diğer iller için de fikir vericidir. Bu yönüyle çalışma, özellikle İç Anadolu Bölgesi gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek alanlarda çift yüzeyli paneller kullanımında yatırımcılara önemli veriler sağlamaktadır.

Teşekkür ve Bilgi Notu

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: 2024/6-5 D.

Kaynaklar

Deline, C. A., Ayala Pelaez, S., Marion, W. F., Sekulic, W. R., Woodhouse, M. A., & Stein, J. (2019). Bifacial PV system performance: separating fact from fiction (No. NREL/PR-5K00-74090). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Dincer, F. & Ozer, E. (2023). Assessing the Potential of a Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System for Gaziantep Islamic Science and Technology University/ Turkey. *Jordan Journal of Electrical Engineering*, 9(2), 149-165. DOI: <https://dx.doi.org/10.5455/jjee.204-1670146602>

Ganesan, K., Winston, D. P., Sugumar, S., & Jegan, S. (2023). Performance analysis of n-type PERT bifacial solar PV module under diverse albedo conditions. *Solar Energy*, 252, 81-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.020>

Mahim, T. M., Rahim, A. H. M. A., & Rahman, M. M. (2024). Review of Mono-and Bifacial Photovoltaic Technologies: A Comparative Study. *IEEE Journal of Photovoltaics*. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2024.3366698

PVsys. (2024). Bifacial system procedure. Access Address (21.11.2024): https://www.pvsys.com/help-pvsys7/bifacial_procedure.htm

Yusufoglu, U. A., Pletzer, T. M., Koduvelikulathu, L. J., Comparotto, C., Kopecek, R., & Kurz, H. (2014). Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(1), 320-328. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2364406.

PVSYST İLE GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDE PEAK SHAVING MODELLEMESİ**Emre ÖZER**

Öğr. Gör., Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Gaziantep-Türkiye
(Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0001-5881-2253

Furkan DİNÇER

Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
ORCID: 0000-0001-6787-0850

Özet

Güneş enerji santrallerinin kurulu gücü tüm dünyada günden güne artmaktadır. Ancak bu gücün etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için santrallerin panel gücü yüklenme değerlerinin iyi şekilde analiz edilerek belirlenmesi önem arz etmektedir. Yeterli analizlerin yapılmadığı durumlarda şebeke elektriksel kurulu güç sınırlamasından dolayı faydalanamayan bir elektrik enerjisi meydana gelmektedir. Bu fazladan enerjinin depolanıp daha sonra kullanılması enerji üretim performansını arttırmak açısından etkili bir çözümdür. Bu çalışmada farklı panel yüklenme değerlerine göre üç farklı üretim santrali senaryosu PVsyst 8 simülasyon programında incelenmiştir. Şebeke elektriksel güç sınırı 1.000 kW olarak belirlenmiş ve daha yüksek üretim değerlerinde şebekeye elektrik enerjisi verilmesi güç limitlemesi ile kısıtlanmıştır. Üretilen fazla elektrik enerjisi 2 MWh kapasite değerine sahip lityum iyon bataryada depolanmaktadır. Panel kurulu güç değerleri sırasıyla 1.403 kWp, 1.598 kWp ve 1.797 kWp olan santrallerde, şebekeye depolama ile verilen elektrik enerjisi sırasıyla 37.616 kWh, 130.337 kWh ve 228.653 kWh olarak hesaplanmıştır. Çalışmada belirtilen yöntemin benimsenmesi santrallerde enerji üretim performansı ve süreklilik yönünden önemli katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Enerji depolama, Enerji performansı, Panel yüklenme analizi.

PEAK SHAVING MODELING IN SOLAR POWER PLANTS WITH PVSYST**Abstract**

The installed capacity of solar power plants is increasing on a daily basis on a global scale. Nevertheless, in order to utilize this power in an effective and efficient manner, it is crucial to conduct an analysis and determine the panel power load values of the power plants. In instances where comprehensive analysis is lacking, a portion of the electrical energy generated is unable to be utilized due to the constraints imposed by the grid's installed electrical power capacity. The storage of this excess energy and its later utilisation represents an effective solution for the enhancement of power generation performance. In this study, three distinct generation plant scenarios are examined in the PVsyst 8 simulation program, with varying panel load values. The grid electrical power limit is set as 1.000 kW and the supply of electrical energy to the grid at higher generation values is restricted by power limitation. The generated excess electrical energy is stored in a lithium-ion battery with a capacity of 2 MWh. In power plants with installed panel power values of 1.403 kWp, 1.598 kWp, and 1.797 kWp, the electrical energy supplied to the grid with storage is calculated to be 37.616 kWh, 130.337 kWh, and 228.653 kWh, respectively. The implementation of the methodology detailed in the study will considerably enhance energy generation performance and continuity in power plants.

Keywords: Photovoltaics, Energy storage, Energy performance, Panel loading analysis.

Giriş

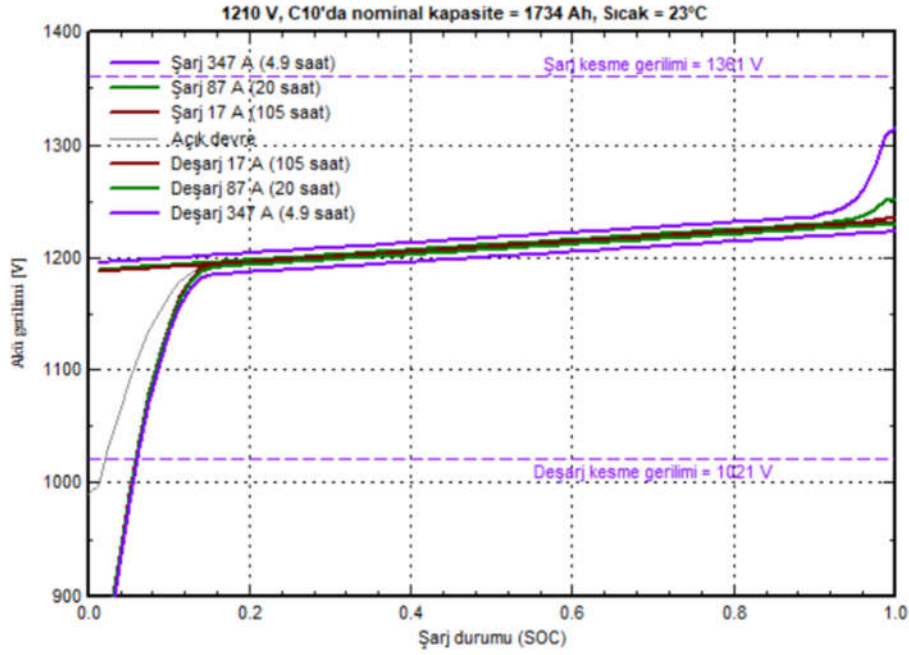
Günümüzde elektrik enerjisi üretimi için en çok kullanılan kaynaklardan biri güneş enerjisidir. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücü hızlı bir şekilde artmaktadır. Güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücü hızlı bir şekilde artarken performansları da bir yandan sorgulanmalıdır. Santraller alınan bağlantı görüşlerine göre elektriksel kurulu güçleri belirlenmekte ve bu güç değerlerine göre mekanik yani panel kurulu güç değerleri yaklaşım şeklinde kabaca belirlenmektedir. Burada panel güçleri belirlenirken santrallerin yüklenme değerleri fayda ve maliyet durumuna göre iyi şekilde analiz edilmelidir (Dincer ve Ozer, 2023), (Dincer, 2011) . Panel güç değerinde fazla yüklenme olduğu zaman şebeke elektriksel kurulu güç sınırlaması olduğundan ötürü faydalınamayan bir enerji meydana gelmektedir. Çünkü santraller için alınan bağlantı görüşündeki elektriksel kurulu güç değerinin üzerinde şebekeye enerji verilmesi ilgili mevzuatlar gereği yasaktır. Dolayısı ile santrallerde panel yüklemesi yapılırken analizlerin yapılarak karar verilmesi yatırımın amortisman süresi açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada farklı panel yüklenme değerlerine göre üç farklı üretim santrali senaryosu PVsyst 8 simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. Bağlantı görüşü ile alınan elektriksel kurulu güç değerinin 1000 kW olduğu varsayılmıştır. Dolayısı ile simülasyon programında 1000 kW güç değerinin üzerinde şebekeye elektrik enerjisi verilmesi kısıtlanmıştır. Fazla üretilen elektrik enerjisi için ise simülasyon programında depolama ünitesi modellenmiştir. Depolama ünitesinin seçimi PVsyst 8 simülasyon programında yapılmıştır. Şekil 1’de kullanılan depolama sistemine ait teknik özellikler paylaşılmıştır. 2 MWh kapasite değerine sahip bir depolama ünitesi simülasyon programında seçilmiştir. Program içerisinde depolama ünitesine ait standart teknik özellikler belirtilmiştir. Şarj kesme gerilimi, deşarj kesme gerilimi, maksimum şarj akımı, maksimum deşarj akımı ve sıcaklık değerleri gibi detay özellikler ifade edilmiştir.

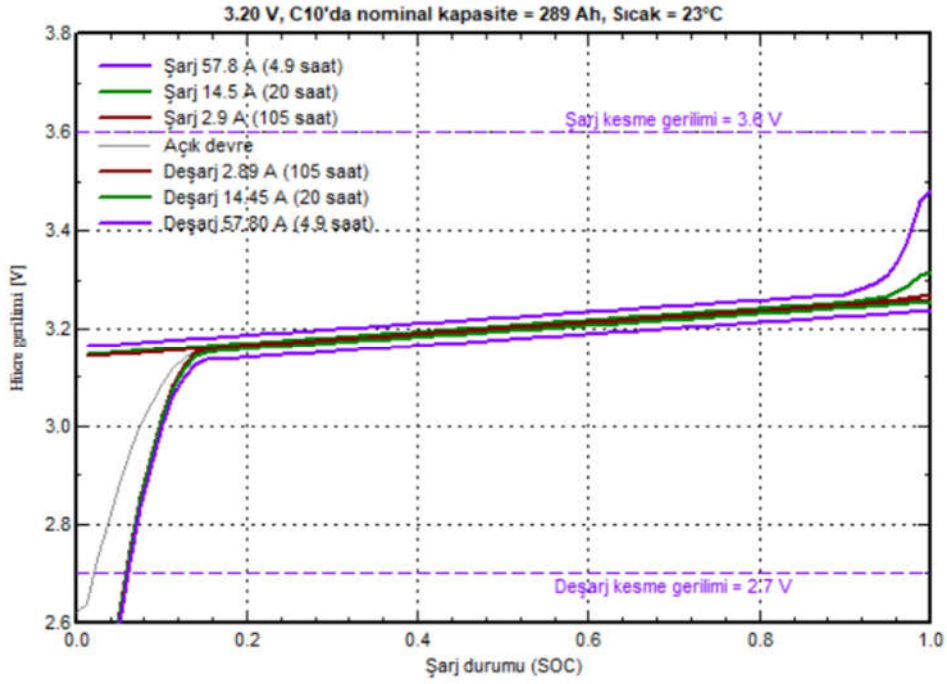
Kullanıcı tarafından belirlenen parametreler		Üret. son. tarihi 2023	
Model	Luna2000 - 2.0 MWh - 2H0	Üretici	Huawei
Dosya adı	Huawei_Luna2000_2_0MWh_2H0.BTR	Veri kaynağı	Datasheet 2023
Teknoloji	Lityum iyon, LFP	<input checked="" type="radio"/> Komple akü	<input type="radio"/> Öğe başına
Kategori	Kabin		
Seri, paralel blok sayısı	21 6		
Ana parametreler			
Seri/paralel hücre sayısı	18 1	yani 2268 hücre	
Nominal gerilim	1209.6	V	
C10 kapasite	1734.0	Ah	
İç direnç @ ref sıcak.	25.20	mΩ	
Referans sıcaklık	23.0	°C	
Coulomb verimi	95.3	%	
Bilgi : C10'a renormalizasyon			
Verilen nominal kapasite	1680.0	Ah	
Deşarj oranı	2.00	Saat	
=>Tekabül eden C10, Peukert modeli 1735 Ah			
Sınırlarda davranım			
Şarj kesme gerilimi	1360.8	V	
Deşarj kesme gerilimi	1020.6	V	
Maksimum şarj akımı	870	A	
Maksimum deşarj akımı	870	A	
Minimum şarj sıcaklığı	-30	°C	
Minimum deşarj sıcaklığı	-30	°C	
Dolu akü göstergeleri			
DOD'da depolanan enerji	95	% 2020 kWh	
Toplam depolanan enerji (4187 devir)		8458.0 MWh	
Özel enerji		67 Wh/kg	
Özel ağırlık		15 kg/kWh	

Şekil 1. Kullanılan depolama sistemine ait teknik özellikler

Şekil 2 ve 3’te ise simülasyon programında seçilen depolama ünitesi için şarj kesme gerilimi ve deşarj kesme gerilim değerleri grafik olarak gösterilmektedir. Şarj durumunda göre kullanılan kapasite miktarı ile akü gerilim değişimi belirtilmiştir. Burada depolama ünitesinde sıcaklık değeri 23 °C olarak sabit tutulmuştur. Depolama ünitesinde iklimlendirme sisteminin var olduğu göz önünde bulundurularak sıcaklık değeri sabit tutulmuştur. Bilindiği üzere sıcaklık değeri yüksekliği zaman depolama ünitesi verimi de düşmektedir.



Şekil 2. Kullanılan bataryaya ait kapasite için şarj-deşarj akü gerilim ve şarj durum grafiği



Şekil 3. Kullanılan batarya hücresine ait kapasite için şarj-deşarj akü gerilim ve şarj durum grafiği

Materyal ve Yöntem

Şebeke güç sınırı 1000 kW değerinde tutulmuş olup depolama sistemi için “peak shaving” modeli seçilmiştir. Yani 1000 kW üzeri demand gücünde santralin depolama yapması, santralin demand gücünün 1000 kW üzerine çıktığında üretilen enerjinin boşa gitmemesi amaçlanmıştır. Bu sistemde maksimum şarj gücü 1000 kW olarak belirlenmiş olup deşarj gücü ise 500 kW olarak girilmiştir. Yani depolama sisteminin 20.00-06.00 saatleri arasında bir nevi kademeli olarak akşam saatlerinde şebekeye enerji vermesi amaçlanmıştır. Akü sistemi için klimalı iklimlendirme sistemi olduğu varsayılmış ve depolama sisteminin sıcaklığı 20 °C değerinde tutulması istenmiştir. Modelleme parametreleri bu şekilde oluşturulmuştur.

Peak shaving modellemesi uygulanarak, 1000 kW demand üzerinde üretilen elektrik enerjisi üretim miktarı depolama ünitesine aktarılmıştır. Böylece bu enerji boşa gitmemiş şebekeye aktarımı sağlanmıştır. Depolama sistemi aynı zamanda şebekenin yönetimi ve dengelenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Depolama ünitesi ile kesikli bir kaynak olan güneş enerjisi santralleri primer baz yük gibi hareket ederek stabil bir kaynak haline dönüştürülebilir.

Tablo 1’de santral kurulum senaryosu-1 için teknik özellikler sunulmuştur. Santralin elektriksel gücü sabit kalmak kaydı ile panel gücünün artırılması sayesinde “peak shaving” modellemesi ile demand üstü üretilen enerjinin boşa gitmesi yerine depolanması amaçlanmıştır.

Maksimum demand değerleri ve şebekeye verilmesi gereken üretim miktarları simülasyon programı üzerinde istenilen şekilde ayarlanabilmektedir. Böylece elektrik enerjisinin en pahalı olduğu puant zamanlarda şebekeye elektrik enerjisi verilmesi sağlanabilir.

Tablo 1. Santral kurulum senaryosu-1 için teknik özellikler

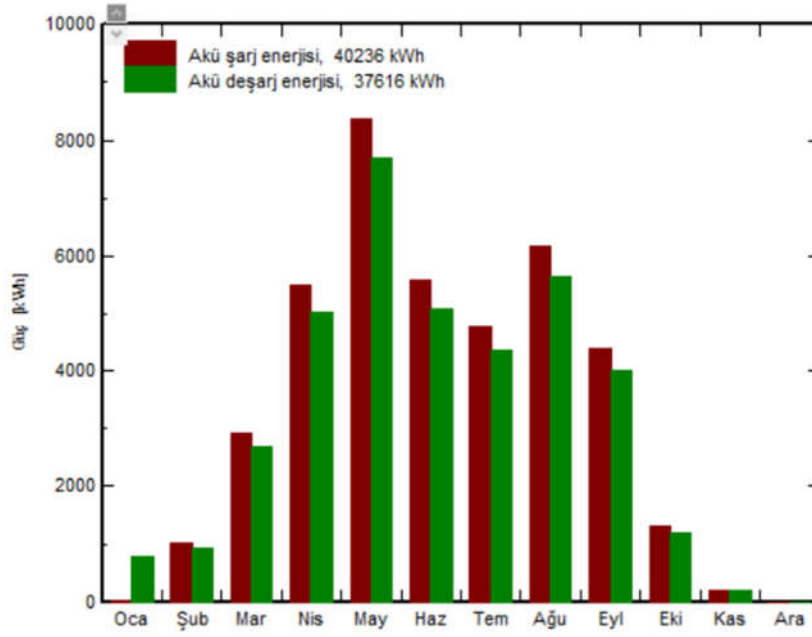
Panel Sayısı	2.550
Panel Yüzeyi	6.529 m ²
PV Nominal Gücü	1.403 kW _p
Şebeke Güç Sınırlama Değeri	1.000 kW _e
Şebeke Sınırı Pnom Oranı	1,403

Tablo 2’de santral kurulum senaryosu-1 için üretim değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Aylara göre veri seti paylaşılmıştır. Bu üretim senaryosuna göre toplam yıllık üretilen elektrik enerjisi üretim miktarı 2.172.792 kWh olmuştur. Depolama sistemi tarafından gün batımı sonrasında ise şebekeye verilen elektrik enerjisi miktarı ise 37.616 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 2. Santral kurulum senaryosu-1 için üretim değerleri

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	EBatDis	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	90.2	82.5	113840	112381	789	0.888
Şubat	79.3	34.97	2.23	102.2	93.4	127347	124701	927	0.870
Mart	123.8	56.20	6.94	143.8	131.8	175128	171401	2683	0.850
Nisan	160.2	66.33	11.30	173.3	158.8	206343	201816	5042	0.830
Mayıs	204.8	64.57	16.35	207.5	190.8	241413	235505	7691	0.809
Haziran	219.1	66.79	20.90	214.6	197.5	245038	239639	5097	0.796
Temmuz	224.3	68.41	25.03	222.1	204.4	249113	243822	4347	0.783
Ağustos	204.3	61.09	24.94	216.7	199.8	242932	237609	5656	0.782
Eylül	163.8	48.59	19.52	189.7	174.3	218145	213728	4013	0.803
Ekim	111.2	45.92	13.42	139.5	128.0	165932	162860	1189	0.832
Kasım	74.1	27.55	6.79	104.4	95.3	127331	125000	182	0.854
Aralık	58.0	25.06	1.96	85.1	77.3	106400	104330	0	0.875
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1889.2	1733.9	2218962	2172792	37616	0.820

Şekil 4’te santral kurulum senaryosu-1 için aylara göre depolama sisteminin şarj ve deşarj enerji değerleri detaylı olarak verilmiştir. Özellikle bahar ve yaz aylarında enerji üretiminin fazla olduğu zaman diliminde peak shaving modeli ile daha fazla elektrik enerjisi depolama ünitesi ile depolanabilmiş ve gün batımı sonrası akşam vaktinde şebekeye verilmesi sağlanabilmiştir. Depolama şarj işleminin en çok gerçekleştiği ay ise Mayıs ayı olmuştur. Mayıs ayında 9.000 kWh’e yakın akü şarjı gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 4. Santral kurulum senaryosu-1 için aylara göre depolama sisteminin şarj ve deşarj enerji değerleri

Tablo 3'te santral kurulum senaryosu-1 için aylara ve saatlere göre maksimum demand değerleri detaylı olarak verilmiştir. Tablo incelendiğinde akşam saati 20.00'den sonra depolanan elektrik enerjisi şebekeye verilerek akşam saatinde de üretim sağlanmıştır. Akşam saati 20.00'den sonra şebekeye verilen elektrik enerjisi üretim toplamı 37.616 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 3. Santral kurulum senaryosu-1 için aylara ve saatlere göre maksimum demand değerleri

E_Grid için saatlik maksimum değerler [kW]																								
	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
Ocak	0	0	0	0	0	0	0	0	14	444	810	933	1000	1000	942	782	495	116	0	0	500	239	0	0
Şubat	0	0	0	0	0	0	0	0	217	599	951	1000	1000	1000	1000	907	651	301	0	0	329	0	0	0
Mart	0	0	0	0	0	0	0	74	432	775	1000	1000	1000	1000	1000	987	746	440	94	0	500	146	0	0
Nisan	0	0	0	0	0	0	19	213	554	897	1000	1000	1000	1000	1000	984	737	473	131	0	500	162	0	0
Mayıs	0	0	0	0	0	0	58	293	625	890	1000	1000	1000	1000	1000	1000	763	484	194	23	500	223	0	0
Haziran	0	0	0	0	0	0	71	301	629	943	1000	1000	1000	1000	1000	989	775	500	197	53	500	201	0	0
Temmuz	0	0	0	0	0	0	43	267	615	864	1000	1000	1000	1000	1000	979	779	524	277	46	500	7	0	0
Ağustos	0	0	0	0	0	0	20	225	561	896	1000	1000	1000	1000	1000	949	778	531	201	18	500	9	0	0
Eylül	0	0	0	0	0	0	0	153	548	861	1000	1000	1000	1000	1000	930	675	367	82	0	490	0	0	0
Ekim	0	0	0	0	0	0	0	75	486	811	1000	1000	1000	1000	1000	860	578	244	0	0	409	0	0	0
Kasım	0	0	0	0	0	0	0	8	394	703	932	1000	1000	1000	928	719	408	11	0	0	149	0	0	0
Aralık	0	0	0	0	0	0	0	84	490	729	904	961	966	856	649	336	0	0	0	0	0	0	0	0
Yıl	0	0	0	0	0	0	71	301	629	943	1000	1000	1000	1000	1000	1000	779	531	277	53	500	239	0	0

Tablo 4'te santral kurulum senaryosu-2 için teknik özellikler sunulmuştur. Bu üretim senaryosunda panel sayısı 2.905 adede çıkartılarak toplam panel kurulu güç değeri 1.598 kWp olmuştur.

Tablo 4. Santral kurulum senaryosu-2 için teknik özellikler

Panel Sayısı	2.905
Panel Yüzeyi	7.438 m ²
PV Nominal Gücü	1.598 kWp
Şebeke Güç Sınırlama Değeri	1.000 kWe
Şebeke Sınırı Pnom Oranı	1,598

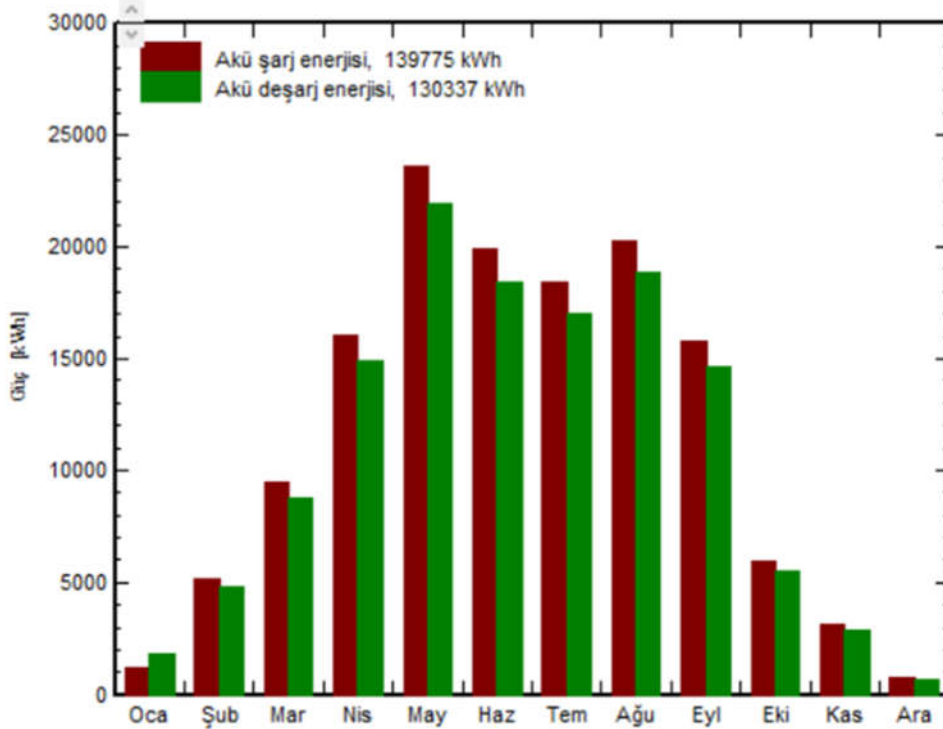
Tablo 5'te santral kurulum senaryosu-2 için üretim değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Aylara göre veri seti paylaşılmıştır. Bu üretim senaryosuna göre toplam yıllık üretilen elektrik enerjisi üretim miktarı 2.457.660

kWh olmuştur. Depolama sistemi tarafından gün batımı sonrasında ise şebekeye verilen elektrik enerjisi miktarı ise 130.337 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5. Santral kurulum senaryosu-2 için üretim değerleri

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	EBatDis kWh	PR oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	90.2	82.5	129688	127320	1845	0.883
Şubat	79.3	34.97	2.23	102.2	93.4	145076	141117	4775	0.864
Mart	123.8	56.20	6.94	143.8	131.8	199519	194015	8758	0.844
Nisan	160.2	66.33	11.30	173.3	158.8	235095	228245	14898	0.824
Mayıs	204.8	64.57	16.35	207.5	190.8	275066	266111	21952	0.803
Haziran	219.1	66.79	20.90	214.6	197.5	279176	270533	18466	0.789
Temmuz	224.3	68.41	25.03	222.1	204.4	283827	275732	17041	0.777
Ağustos	204.3	61.09	24.94	216.7	199.8	276827	268671	18835	0.776
Eylül	163.8	48.59	19.52	189.7	174.3	248527	241747	14650	0.798
Ekim	111.2	45.92	13.42	139.5	128.0	189038	184428	5519	0.827
Kasım	74.1	27.55	6.79	104.4	95.3	145058	141437	2905	0.848
Aralık	58.0	25.06	1.96	85.1	77.3	121213	118305	692	0.870
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1889.2	1733.9	2528110	2457660	130337	0.814

Şekil 5'te santral kurulum senaryosu-2 için aylara göre depolama sisteminin şarj ve deşarj enerji değerleri detaylı olarak verilmiştir. Özellikle bahar ve yaz aylarında enerji üretiminin fazla olduğu zaman diliminde peak shaving modeli ile daha fazla elektrik enerjisi depolama ünitesi ile depolanabilmiş ve gün batımı sonrası akşam vaktinde şebekeye verilmesi sağlanabilmiştir. Depolama şarj işleminin en çok gerçekleştiği ay ise Mayıs ayı olmuştur. Mayıs ayında 25.000 kWh'e yakın akü şarjı gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 5. Santral kurulum senaryosu-2 için aylara göre depolama sisteminin şarj ve deşarj enerji değerleri

Tablo 6’da santral kurulum senaryosu-2 için aylara ve saatlere göre maksimum demand değerleri detaylı olarak verilmiştir. Tablo incelendiğinde akşam saati 20.00’den sonra depolanan elektrik enerjisi şebekeye verilerek akşam saatinde de üretim sağlanmıştır. Akşam saati 20.00’den sonra şebekeye verilen elektrik enerjisi üretim toplamı 130.337 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 6. Santral kurulum senaryosu-2 için aylara ve saatlere göre maksimum demand değerleri

E_Grid için saatlik maksimum değerler [kW]																								
	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
Ocak	0	0	0	0	0	0	0	0	16	505	923	1000	1000	1000	1000	868	563	131	0	0	500	239	0	0
Şubat	0	0	0	0	0	0	0	0	247	682	1000	1000	1000	1000	1000	1000	741	342	0	0	500	404	0	0
Mart	0	0	0	0	0	0	0	84	491	883	1000	1000	1000	1000	1000	1000	849	501	106	0	500	500	396	0
Nisan	0	0	0	0	0	0	22	242	630	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	839	538	148	0	500	500	396	0
Mayıs	0	0	0	0	0	0	65	333	711	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	869	551	220	26	500	500	396	0
Haziran	0	0	0	0	0	0	79	342	716	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	883	569	224	60	500	500	396	0
Temmuz	0	0	0	0	0	0	48	303	700	984	1000	1000	1000	1000	1000	1000	888	596	315	51	500	500	316	0
Ağustos	0	0	0	0	0	0	22	255	638	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	886	604	228	20	500	500	184	0
Eylül	0	0	0	0	0	0	173	624	981	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	768	417	92	0	500	500	213	0
Ekim	0	0	0	0	0	0	85	553	924	1000	1000	1000	1000	1000	1000	980	658	277	0	0	500	500	105	0
Kasım	0	0	0	0	0	0	8	449	800	1000	1000	1000	1000	1000	1000	818	464	12	0	0	500	133	0	0
Aralık	0	0	0	0	0	0	0	95	558	830	1000	1000	1000	1000	975	739	382	0	0	0	177	0	0	0
Yıl	0	0	0	0	0	0	79	342	716	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	888	604	315	60	500	500	396	0

Tablo 7’de santral kurulum senaryosu-3 için teknik özellikler sunulmuştur. Bu üretim senaryosunda panel sayısı 3.267 adede çıkartılarak toplam panel kurulu güç değeri 1.797 kWp olmuştur.

Tablo 7. Santral kurulum senaryosu-3 için teknik özellikler

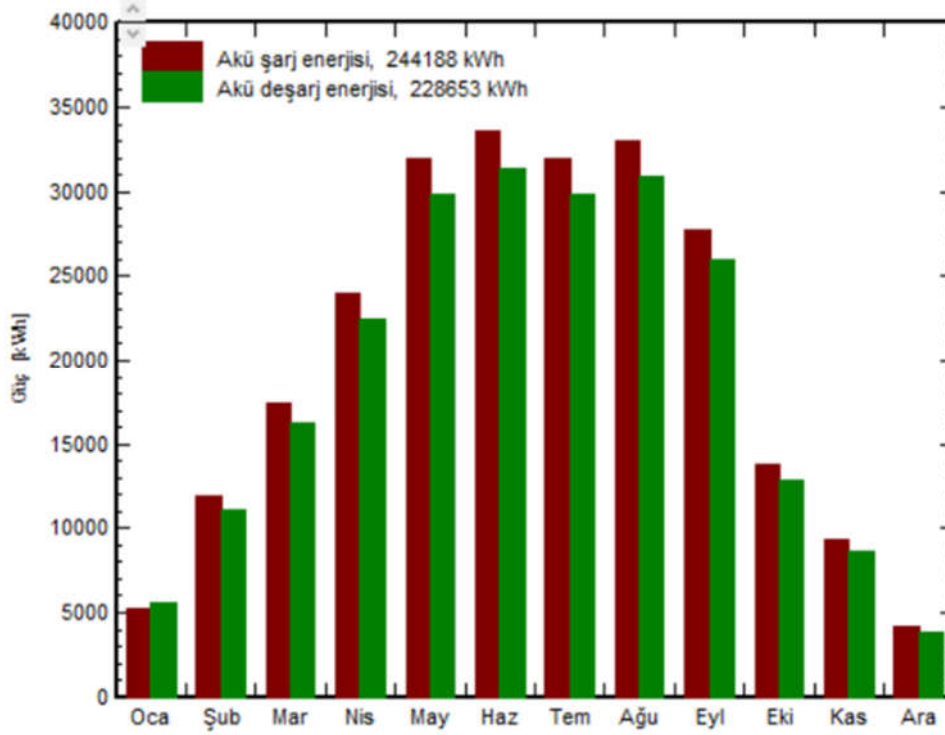
Panel Sayısı	3.267
Panel Yüzeyi	8.365 m ²
PV Nominal Gücü	1.797 kWp
Şebeke Güç Sınırlama Değeri	1.000 kWe
Şebeke Sınırı Pnom Oranı	1,797

Tablo 8’de santral kurulum senaryosu-2 için üretim değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Aylara göre veri seti paylaşılmıştır. Bu üretim senaryosuna göre toplam yıllık üretilen elektrik enerjisi üretim miktarı 2.711.993 kWh olmuştur. Depolama sistemi tarafından gün batımı sonrasında ise şebekeye verilen elektrik enerjisi miktarı ise 228.653 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 8. Santral kurulum senaryosu-8 için üretim değerleri

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	EBatDis	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	90.2	82.5	145849	142681	5563	0.880
Şubat	79.3	34.97	2.23	102.2	93.4	163155	157768	11104	0.859
Mart	123.8	56.20	6.94	143.8	131.8	224353	214798	16224	0.831
Nisan	160.2	66.33	11.30	173.3	158.8	262961	249348	22446	0.801
Mayıs	204.8	64.57	16.35	207.5	190.8	309172	288016	29895	0.772
Haziran	219.1	66.79	20.90	214.6	197.5	313874	297070	31412	0.770
Temmuz	224.3	68.41	25.03	222.1	204.4	319037	303935	29878	0.762
Ağustos	204.3	61.09	24.94	216.7	199.8	311047	294789	30878	0.757
Eylül	163.8	48.59	19.52	189.7	174.3	279444	266598	25940	0.782
Ekim	111.2	45.92	13.42	139.5	128.0	212574	205773	12851	0.821
Kasım	74.1	27.55	6.79	104.4	95.3	163134	158548	8632	0.845
Aralık	58.0	25.06	1.96	85.1	77.3	136318	132669	3830	0.868
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1889.2	1733.9	2840917	2711993	228653	0.799

Şekil 6'da santral kurulum senaryosu-3 için aylara göre depolama sisteminin şarj ve deşarj enerji değerleri detaylı olarak verilmiştir. Özellikle bahar ve yaz aylarında enerji üretiminin fazla olduğu zaman diliminde peak shaving modeli ile daha fazla elektrik enerjisi depolama ünitesi ile depolanabilmiş ve gün batımı sonrası akşam vaktinde şebekeye verilmesi sağlanabilmiştir. Örneğin, Haziran ayında 35.000 kWh'e yakın depolama şarj enerjisi sağlanabilmiştir.



Şekil 6. Santral kurulum senaryosu-3 için aylara göre depolama sisteminin şarj ve deşarj enerji değerleri

Tablo 9'da santral kurulum senaryosu-3 için aylara ve saatlere göre maksimum demand değerleri detaylı olarak verilmiştir. Tablo incelendiğinde akşam saati 20.00'den sonra depolanan elektrik enerjisi şebekeye verilerek akşam saatinde de üretim sağlanmıştır. Akşam saati 20.00'den sonra şebekeye verilen elektrik enerjisi üretim toplamı 228.653 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 9. Santral kurulum senaryosu-3 için aylara ve saatlere göre maksimum demand değerleri

E_Grid için saatlik maksimum değerler [kW]																								
	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
Ocak	0	0	0	0	0	0	0	0	19	569	1000	1000	1000	1000	1000	977	634	149	0	0	500	349	0	0
Şubat	0	0	0	0	0	0	0	0	279	767	1000	1000	1000	1000	1000	1000	834	396	0	0	500	500	396	0
Mart	0	0	0	0	0	0	0	96	554	993	1000	1000	1000	1000	1000	1000	955	564	121	0	500	500	396	0
Nisan	0	0	0	0	0	0	25	274	710	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	945	607	168	0	500	500	396	0
Mayıs	0	0	0	0	0	0	75	376	801	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	977	621	249	30	500	500	397	0
Haziran	0	0	0	0	0	0	91	386	806	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	993	641	253	69	500	500	396	0
Temmuz	0	0	0	0	0	0	55	342	788	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	998	671	356	59	500	500	396	0
Ağustos	0	0	0	0	0	0	26	288	719	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	997	680	258	23	500	500	396	0
Eylül	0	0	0	0	0	0	0	196	703	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	865	470	105	0	500	500	396	0
Ekim	0	0	0	0	0	0	0	97	623	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	741	313	0	0	500	500	396	0
Kasım	0	0	0	0	0	0	0	10	506	901	1000	1000	1000	1000	1000	1000	921	523	14	0	500	500	283	0
Aralık	0	0	0	0	0	0	0	0	108	628	934	1000	1000	1000	1000	1000	832	431	0	0	500	110	0	0
Yıl	0	0	0	0	0	0	91	386	806	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	996	680	356	69	500	500	397	0

Sonuç ve Değerlendirme

Çalışmada, farklı panel yüklenme değerlerine sahip üç güneş enerji santrali senaryosu PVsyst 8 simülasyon programında incelenerek, 1000 kW olarak belirlenen şebeke güç sınırını aşan fazla enerjinin lityum iyon

bataryalarda depolanması analiz edilmiştir. Tablo 10’ da her üç santrale ait kurulu panel gücü, panel yüklenme oranı, şebekeye doğrudan ve depolama yoluyla sağlanan enerji miktarları özet halinde verilmiştir.

Tablo 10. Simülasyon ile gerçekleştirilen üretim santrallerine göre analiz sonuçları

Şebeke Güç Limit Değeri	Santral Panel Kurulu Güç Değeri	Panel Yüklenme Oranı	Şebekeye Doğrudan Verilen Elektrik Enerjisi	Şebekeye Depolama ile Verilen Elektrik Enerjisi	Toplam Üretilen Elektrik Enerjisi
1.000 kW	1403 kWp	1,403	2.172.792 kWh	37.616 kWh	2.210.408 kWh
1.000 kW	1.598 kWp	1,598	2.457.660 kWh	130.337 kWh	2.587.997 kWh
1.000 kW	1.797 kWp	1,797	2.711.993 kWh	228.653 kWh	2.940.646 kWh

Elde edilen sonuçlar santral panel kurulu güç değeri ve panel yüklenme oranı arttıkça şebekeye doğrudan ve depolama yoluyla sağlanan elektrik enerjisi arttığını göstermektedir. Örneğin 1.797 kWp kurulu güç ve 1,797 panel yüklenme oranına sahip santralde toplam elektrik enerjisinin % 7,78’i de şebekeye depolama ile sağlanan elektrik enerjisidir.

Bu çalışmada şebeke elektriksel kurulu güç sınırlamasından dolayı faydalanılamayan fazladan enerjinin bataryalar yoluyla depolanıp üretimin özellikle üretimin gerçekleşmediği gece saatlerinde şebekeye enerji sağlaması yönünden önemlidir. Şebeke elektriğinin bu şekilde sağlanması enerji verimliliği ve sürekliliği açısından kritik bir katkı sunmaktadır.

Kaynaklar

Dincer, F. & Ozer, E. (2023). Assessing the Potential of a Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System for Gaziantep Islamic Science and Technology University/ Turkey. *Jordan Journal of Electrical Engineering*, 9(2), 149-165. DOI:<https://dx.doi.org/10.5455/jjee.204-1670146602>

Dincer, F. (2011). The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1), pp. 713-720. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.026>

AN EVALUATION OF THE APPLICATION OF PHOTOBIOREACTORS IN BUILDINGS**Selin Rüya ÇAKIR**

Lecturer, Istanbul Gelisim University, Vocational School, Interior Design Program, İstanbul-Türkiye, Responsible Author) ORCID: ORCID 1: 0000-0002-4493-2091

Ümit Turgay ARPACIOĞLU

Associate Professor, Mimar Sinan Fine Arts University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, İstanbul-Türkiye, ORCID: 0000-0001-8858-7499

Abstract

Economic conditions, especially after wars and pandemics, have led states and individuals to search for alternative renewable energy sources. Buildings that consume little energy or can produce their own energy are important in reducing energy dependency. In this context, the use of active energy systems enables buildings to produce their own energy completely independent of the grid. This ensures complete independence in terms of energy. One of these active energy systems is photobioreactors, which produce alternative energy through photosynthesis by the microalgae inside them. These photobioreactors can be divided into types such as biocoil, vertical column, tubular, flat plate, and plastic bag according to their production systems. The aim of this study is to evaluate the applicability of photobioreactors in buildings by revealing the parameters that affect their use in buildings. In the study, buildings with photobioreactor and buildings that were designed but not implemented were examined. Buildings with photobioreactors are classified under subheadings such as building and system life, structure type, building scale, photobioreactor type, material, the building element they are adapted to, surface area of the system, integration type, cost, aesthetics, sustainability. The findings obtained from the study are expressed in a table. In the study, it was determined that the initial investment cost affects photobioreactors as a negative parameter and is the most important parameter preventing the widespread use of the system. In order to reduce the cost and make photobioreactors widespread, plastic bags should be chosen as production systems; However, this must be done by taking into account parameters such as aesthetics and sustainability.

Keywords: Photobioreactors, renewable energy, sustainability

1. Introduction

While the economy, tourism, transportation and production sectors were negatively affected after the Covid 19 epidemic, the energy sector was also negatively affected. However, renewable energy sources have created an alternative to eliminate the negative effects after this epidemic and have been more successful in this process than other energy sources (Ören Bogoçlu & Varbak Neşe, 2022). In addition to the Covid 19 epidemic, wars have also led to changes in the orientation of energy resources. The European Union differentiated its energy policy after the Russia-Ukraine war, reduced energy imports from Russia, and adopted the REPowerEU plan to become more independent in energy and increase renewable energy sources. The main items of this plan are; accelerating the transition to renewable energy, saving energy and diversifying energy sources (Özel Özcan & Şahin, 2023). Renewable energy sources play a serious role in the search for energy independence and diversification of energy sources. Solar energy, wind energy and geothermal energy can be counted as renewable energy sources. Systems that produce energy using these energy sources are called active energy systems.

Although photovoltaic systems are the more commonly used systems among systems that use solar energy, photobioreactors can also be used to produce electrical energy.

The aim of this study is to determine the parameters that affect the use of photobioreactors in buildings and to reveal the applicability of photobioreactors in buildings by examining these parameters through examples.

2. Photobioreactors

Photobioreactors (PBR) are the name given to microalgae grown in closed systems. It is used in many areas such as cosmetics, medicine, pharmacy, fish and larva farming, food industry and energy sector (Kargin, 2020). Building integrated photobioreactors were first in Hamburg in 2013 (Kükdamar & Tokuç, 2015).

Photobioreactors are divided into 5 types according to their production systems:

- Tubular
- Biocoil
- Flat Plate
- Plastic Bag
- Vertical Column.

2.1 Tubular Photobioreactors

Tubular photobioreactors can also be called biofences. They consist of very rigid or flexible, transparent plastic tubes and pipes. Production increases as the number and diameter of pipes increases. Microalgae circulate in the tubes with the help of a pump. They can be arranged horizontally or vertically indoors or outdoors (Gezici, 2012).

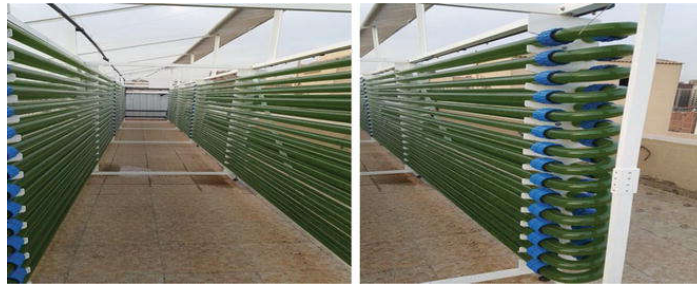


Figure 1. Tubular Photobioreactor Example (El Baz & Baky, 2018)

2.2 Biocoil Photobioreactors

It is a type of photobioreactor that progresses in a tower-like spiral. Small diameter transparent plastic pipes are in a helical shape. This shape helps the algae to mix evenly, minimizing their adhesion to the tube. They are automatic production systems that are easily portable and reduce labor force. They are not systems that can be used for every microalgae type (Gezici, 2012).

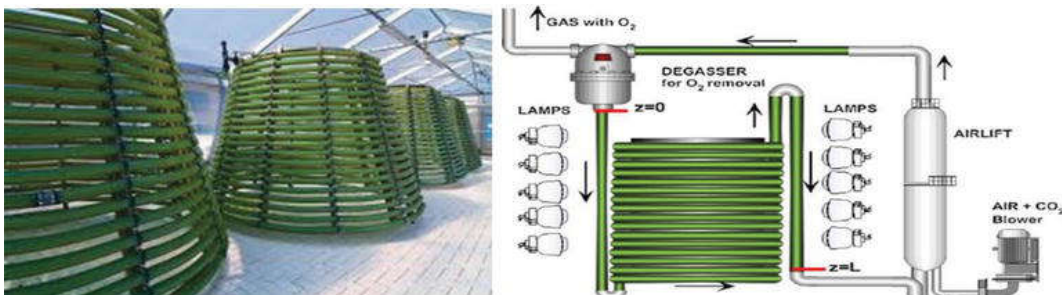


Figure 2. Biocoil Photobioreactor Example (El Baz & Baky, 2018)

2.3 Flat Sheet Photobioreactors

It takes its name from the plate-shaped containers. The surface width is large so that light can be used more effectively. They are made entirely of glass or entirely of plastic material. The diameter of the tubes in tubular photobioreactors is greatly reduced and turned into a flat plate (Gezici, 2012).

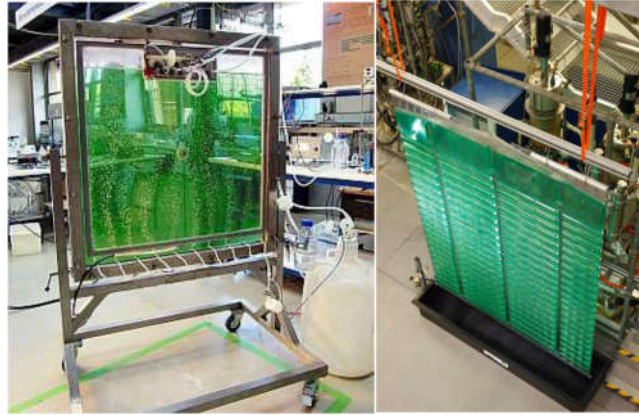


Figure 3. Flat Sheet Photobioreactor Examples (Gezici, 2012)

2.4 Plastic Bag Photobioreactors

There is a possibility that production of plastic bags may be interrupted. The increase in volume due to bags can also be a disadvantage. In large-scale production, the effective use of light may decrease and quality may decrease (Gezici, 2012). However, the cost of the production system is lower than other systems.

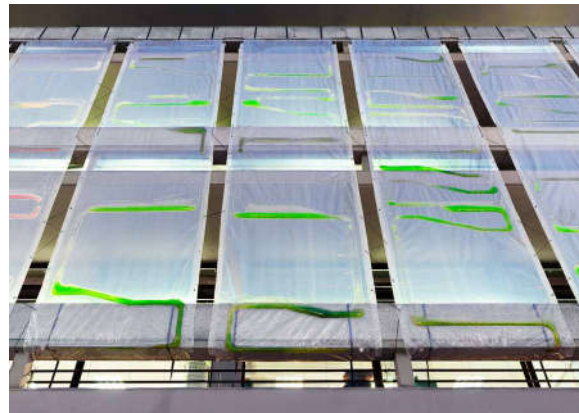


Figure 4. Plastic Bag Photobioreactor Example (Abrigo, 2019)

2.5 Vertical Column Photobioreactors

Dış mekânlardan çok iç mekânlarda tercih edilmektedirler. Dikey kolonlar şeklinde olan bu fotobiyoreaktörlerin havalandırması tabandan yapılmaktadır. 20 cm'e yakın çapa sahip karanlık bir alan dikey kolon fotobiyoreaktörlerin merkezinde bulunmaktadır. Etkin kullanım için daylight lamba ile ışık verilir. Çoğunlukla 40 ve 50 cm'lik dikey kolonlardan oluşmaktadırlar (Kargın, 2020).



Figure5. Vertical Column Photobioreactor Example (Burgess, 2021)

3 Materials and Methods

The stages of the study are summarized in the flow diagram in Figure 6. In the study, 6 structures designed with photobioreactors were examined. Both the photobioreactor structures that have been designed and implemented and the designed; However, structures that were not realized were examined.

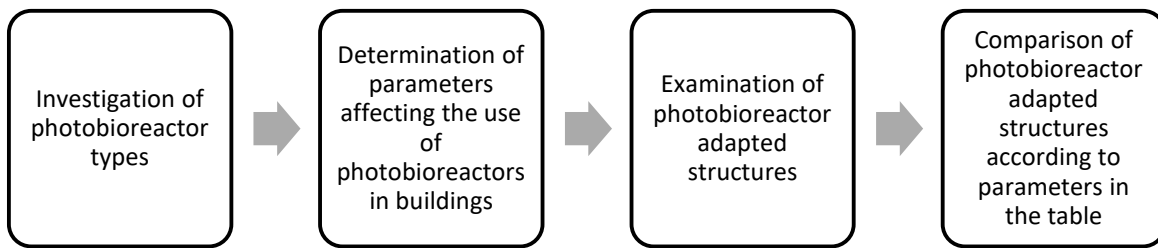


Figure 6. Flow Diagram of the Study

While examining the examples in the study, the parameters were grouped under the following headings: environmental, structure-related and system-related parameters. All parameters affecting the use of photobioreactors in structures are given as a diagram in Figure 7.

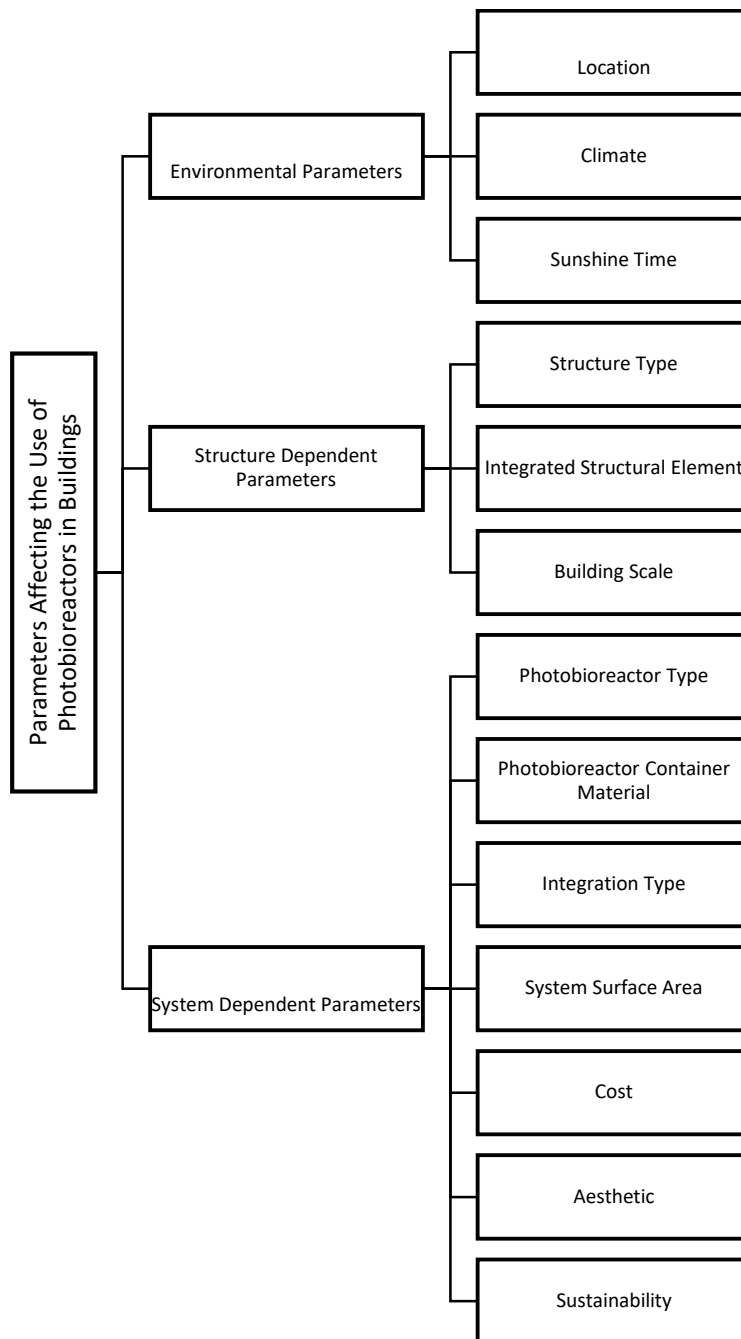


Figure 7. Parameters Affecting the Use of Photobioreactors in Buildings

Findings

The findings of the study are presented as tables in Table 1.1 and Table 1.2.

Table 1.1 Examination of Sample Structures According to Parameters Affecting the Use of Photobioreactor





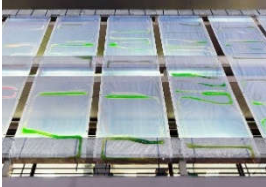

Structure Information	Environmental Parameters			System Dependent Parameters						
	Location	Climate	Sunshine Time (annual)	PBR Type	PBR Container Material	Integration Type	System Surface Area	Cost	Aesthetic	Sustainability
 BIQ House (FEED)	Hamburg/ Germany	Warm and Temperate	2252.18 hours (Climate Data, 2024)	Flat Plate Type	Laminated Safety Glass (FEED)	Built together with the structure	200 m ² (FEED)	5.000.000 euro (FEED)	Attention has been paid to both visual comfort and aesthetic performance.	System and material sustainability Produces more energy than it consumes 6 tonnes reduction in annual CO2 emissions (FEED)
	Structure Dependent Parameters									
	Building Type	Integrated Building Element	Building Scale							
Residential - Permanent	Façade	Medium								
 Feeding the Planet, Energy for Life (Çam, 2015)	Milan / Italy	Warm and Temperate	3053.37 (Climate Data, 2024)	Plastic Bag Type	Plastic (Ethylene tetrafluoroethylene) (Çam, 2015)	Built together with the structure	<5 m ²	-	Attention has been paid to both visual comfort and aesthetic performance.	System sustainability
	Structure Dependent Parameters									
	Building Type	Integrated Building Element	Building Scale							
Temporary	Structure Shell	Small								
 PBR Trees (Villalba et al., 2023)	Not implemented	-	-	Tubular Type	Plastic Methacrylate (Villalba et al., 2023)	Designed with the structure	<10 m ²	-	Attention has been paid to both visual comfort and aesthetic performance.	System sustainability
	Structure Dependent Parameters									
	Building Type	Integrated Building Element	Building Scale							
Street Furniture	Shading Element	Small								

Table 1.2 Examination of Sample Structures According to Parameters Affecting the Use of Photobioreactor

Structure Information	Environmental Parameters			System Dependent Parameters						
	Location	Climate	Sunshine Time (annual)	PBR Type	PBR Container Material	Integration Type	System Surface Area	Cost	Aesthetic	Sustainability
 SymbIO2 (Bernard, 2011)	Not implemented	-	-	Tubular Type	-	Designed with the structure	-	-	Attention has been paid to both visual comfort and aesthetic performance.	System sustainability
	Structure Dependent Parameters									
	Building Type	Integrated Building Element	Building Scale							
	Office	Façade	Large							
 Photo.Synth.Etica (Abrigo, 2019)	Dublin/ Ireland	Warm and Temperate	1823.4 hours (Climate Data, 2024)	Plastic Bag Type	Bio Plastic	Integrated later	2 x 7= 14 m ² 16 modules Total 224 m ² (Abrigo, 2019)	300 – 2000 euro per m ² EcoLogic Studio, 2019) 67200-448000 euro	Attention was paid to aesthetic performance	System + Material Sustainability It collected 1 kg of CO ₂ per day. Made from bioplastic. (Abrigo, 2019)
	Structure Dependent Parameters									
	Building Type	Integrated Building Element	Building Scale							
	Printwork Building	Façade	Large							
 AlgoNOMAD Pavyonu (Tokuç et al., 2019)	Paris	Warm and Temperate	2338.09 hours (Climate Data, 2024)	Flat Plate Type	Plastic	Designed with the structure	<10 m ²	-	Attention has been paid to both visual comfort and aesthetic performance.	System sustainability
	Structure Dependent Parameters									
	Building Type	Integrated Building Element	Building Scale							
	Pavilion-Temporary	Façade	Small							

4 Conclusion and Recommendations

Although photobioreactors are seen as newly developing systems in architecture, microalgae have been used in various sectors for years and are constantly being developed. By producing energy, photobioreactors can meet all the energy needs of a building and even produce more energy. They reduce the amount of greenhouse gases such as carbon dioxide through photosynthesis.

The biggest obstacle to the widespread use of photobioreactors is the high initial investment cost. Although the efficiency of the plastic bag type photobioreactor is lower, its initial investment cost and applicability are easier.

It is a possible material to be used in architecture in Turkey with the increase in architectural studies on photobioreactors and the incentives and supports provided by state institutions such as TUBITAK.

If interdisciplinary studies are carried out on the relevant material, the potential of the relevant material can be revealed more clearly.

It should be considered that photobioreactors have not only economic but also ecological properties and that they are living microorganisms, and the sustainability of both the mold material and the microorganisms should be considered.

Thanks and Information Note

The study was conducted in accordance with publication ethics. No ethics committee approval was required in the study.

5 References

- Abrigo, A. (13.02.2019). Designed by ecoLogicStudio, Photo.Synth.Etica fights climate change. Retrieved from <https://bluprint-onemega.com/news/bio-digital-urban-curtain-ecologicstudio/>
- Burgess, M. (16.02.2021). Microalgae identified as clean source for hydrogen production Retrieved from <https://www.leadingtec.cn/nengyuan.html>
- Bernard, M. (2011). "HOK / Vanderweil Process Zero Concept Building: As Green As... Algae?", 2011, (<http://buildipedia.com/aec-pros/featured-architecture/hok-vanderweil-process-zero-concept-building-as-green-asalgae>)
- Climate Data. (2024). Dublin'de güneşli saatler. Retrieved from <https://tr.climate-data.org/avrupa/irlanda/dublin/dublin-6011/>
- Climate Data. (2024). Hamburg'de güneşli saatler. Retrieved from <https://tr.climate-data.org/avrupa/almanya/hamburg/hamburg-69/>
- Climate Data. (2024). Milan'de güneşli saatler. Retrieved from <https://tr.climate-data.org/avrupa/italya/lombardy/milan-1094/>
- Climate Data. (2024). Paris'de güneşli saatler. Retrieved from <https://tr.climate-data.org/avrupa/fransa/ile-de-france/paris-44/>
- Çam, S. (02.06.2015) 4 Hektarlık Orman Kadar Oksijen Üreten Yosun Çadırı. Gaia Dergi. Retrieved from <https://gaiadergi.com/4-hektarlik-orman-kadar-oksiyen-ureten-yosun-cadiri/>
- EcoLogicStudio. (2019). Photosynthetica_Hortus Wired-UK-May-June-2019
- El-Baz, F. K., & Baky, H. H. A. E. (2018). Pilot Scale of Microalgal Production Using Photobioreactor. InTech. doi: 10.5772/intechopen.78780
- FEED (n.d.) Smart Cities, BIQ House+SolarLeaf –the use of microalgae. Retrieved from https://pocacito.eu/sites/default/files/BIQhouse_Hamburg.pdf
- Gezici, M. (2012). Biyodizel Üretimine Uygun Mikroalgelerin Gelişimine Bazı Yetiştirme Parametrelerinin Etkisinin Belirlenmesi, Master Thesis

- Kargın, H. (2020). Akuakültürde Mikroalg Üretim Sistemleri ve Fotobiyoreaktörler Dünyada ve Ülkemizde Kullanımı. *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 3(3), 112-130. <https://doi.org/medfar.v3i56990.756666>
- Kükdamar, İ. & Tokuç, A. (2015). , Sıfır Karbon Binalara Ulaşmada Anahtar Bir Cephe Önerisi, İzmir.
- Ören Bogoçlu, G., & Varbak Neşe, S. (2022). COVID 19'un Yenilenebilir Enerji Üzerine Etkileri: Sistemik Bir Analiz. *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 3(1), 10-17.
- Tokuç, A., Köktürk, G. & Savaşır, K. (2019). Alglerle Yeşeren Cepheler. *Mimarlık Dergisi* 408 July- August 2019.
- Villalba, M. R., Cervera, R., & Sánchez, J. (2023). Green Solutions for Urban Sustainability: Photobioreactors for Algae Cultivation on Façades and Artificial Trees. *Buildings*, 13(6), 1541. <https://doi.org/10.3390/buildings13061541>

**TÜRKİYE’NİN FARKLI İKLİM KOŞULLARINDA PV/T VE YAKIT HÜCRESİ DESTEKLİ HİBRİT SU ISITMA SİSTEMİNİN ENERJİ ANALİZİ****Ahmet Eren AKKOÇ¹**¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye¹ ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1979-2733>**Müjdat ÖZTÜRK²**² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksekokulu, Kırşehir, Türkiye² ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1800-2234>**Gamze GENÇ³**³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Departmanı, Kayseri, Türkiye³ ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-2161>**Özet**

Bu çalışmada, Türkiye’nin farklı iklim koşullarında konumlandırılan (Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari) entegre bir fotovoltaik-termal ve hidrojen destekli sıcak su üretim sistemi analiz edilmiştir. Çalışmada ele alınan sistem tasarımının amacı bir mahalin 45°C’lik sıcak su ihtiyacı için gerekli olan elektrik enerjisinin ek enerji kaynaklarına ihtiyaç duymadan yıl boyunca kesintisiz olarak güneş ve hidrojen enerjisinden sağlanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda ele alınan sistemde hidrojen depolama tanklarının doluluk oranları ve suya aktarılan ısı enerjisi gibi sistem parametreleri incelenmiştir. Yıl sonunda, 0 °C ve 1 bar koşullarında hidrojen depolama tankındaki doluluk oranları şehirler arasında değişiklik göstermiştir. En yüksek depolanan hidrojen miktarı 1163.63 Nm³ ile Konya’da iken, Ankara’da 1023.47 Nm³, Hakkari’de 1016.12 Nm³ ve Trabzon’da 77.12 Nm³’dür. İncelenen şehirlerde fotovoltaik-termal sistem enerji verimliliği yaz aylarında maksimum seviyelere ulaşmış, yıllık ortalamalar Ankara, Konya ve Hakkari’de %50 iken Trabzon’da %53 olarak kaydedilmiştir. Yakıt hücrelerinin yıllık ortalama verimlilik değerleri ise %60’a kadar yükselmiş, özellikle Konya ve Ankara’da en yüksek seviyede performans göstermiştir. Bu bulgular şehirlerin iklim ve güneş ışınımı seviyelerine bağlı olarak arasında performanslarında farklılıkların oluştuğunu göstermektedir. Önerilen sistemin, geleneksel doğal gaz yakıtlı sistemlere kıyasla enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik bakımından önemli avantajlar sunduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: PV/T, Sıcak Su Üretimi, Hidrojen Üretimi, Yakıt hücresi, Enerji Verimliliği, Karbon salınımı.

ENERGY ANALYSIS OF PV/T AND FUEL CELL SUPPORTED HYBRID WATER HEATING SYSTEM IN DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS OF TURKEY**Abstract**

In this study, a photovoltaic-thermal and hydrogen-supported hot water production system which is located in different climatic regions of Turkey (Ankara, Konya, Trabzon, and Hakkari) was analyzed. The aim of the investigated system is to provide the electrical energy required for 45°C hot water demand uninterruptedly throughout the year from solar and hydrogen energy without additional energy sources. In line with this aim, system parameters such as the fill rates of the hydrogen storage tanks and the heat energy transferred to the water were investigated. At the end of the year, the fill rates in the hydrogen storage tanks at 0 °C and 1 bar conditions showed the differences. The highest stored hydrogen amount was in Konya with 1163.63 Nm³, while this amount was 1023.47, 1016.12, and 77.12 Nm³ in Ankara, Hakkari, and Trabzon, respectively. In the cities examined, photovoltaic-thermal system energy efficiency reached maximum levels in the summer months, and annual averages were recorded as 50% in Ankara, Konya, and Hakkari, and 53% in Trabzon. The annual efficiencies of fuel cells were increased up to 60%, and especially they showed the highest level of performance in Konya and Ankara. The results show the differences in performance between cities depending

on climate and solar radiation levels. It can be stated that the proposed system offers significant advantages in terms of energy efficiency and environmental sustainability compared to traditional natural gas-fueled systems.

Keywords: PV/T, Hot Water Production, Hydrogen Production and Storage, Fuel Cell, Energy Efficiency, Carbon emissions.

Giriş

Artan nüfus, enerji arz güvenliğine ilişkin kaygılar, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve çevresel etkilerin daha görünür hale gelmesi, yeni ve temiz enerji kaynaklarına olan talebi giderek artırmıştır. Fosil yakıt rezervlerinin giderek tükenmesi, maliyetlerin artmasına neden olmakta ve bu durum, sürdürülebilir kalkınmanın önemini daha da vurgulamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma, ekonomik ve çevresel iyileştirmeleri içeren uzun vadeli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu hedefe ulaşabilmek içinde yeni ve temiz enerji kaynaklarının keşfi ve kullanımı gereklilik haline gelmiştir. Bunun yanı sıra, toplumun çevreye yönelik bilinç düzeyinin artması, temiz enerji alternatiflerine olan talebi de önemli ölçüde yükseltmiştir. Sonuç olarak alternatif enerji kaynakları, ülkeler için stratejik öneme sahip olup, enerji politikalarının hem kısa hem de uzun vadede şekillendirilmesi gereken temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Enerji sektöründe gerçekleşmesi muhtemel bu dönüşüm, yalnızca teknolojik yeniliklerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda politika yapıcılarının desteğini ve toplumsal kabulü de gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş çapta benimsenebilmesi için teşvik edici politikalar geliştirilmesi, toplumsal farkındalığın artırılması ve yeni enerji paradigmalarına adaptasyon için eğitim faaliyetlerinin yaygınlaştırılması önem taşımaktadır. Bu şekilde, dünya enerji talebini karşılamak amacıyla sürdürülebilir ve çevre dostu bir geleceğe adım atılabilir. Özellikle güneş enerjisi ve hidrojen enerjisi gibi çevreci kaynaklar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeli ile önemli bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.

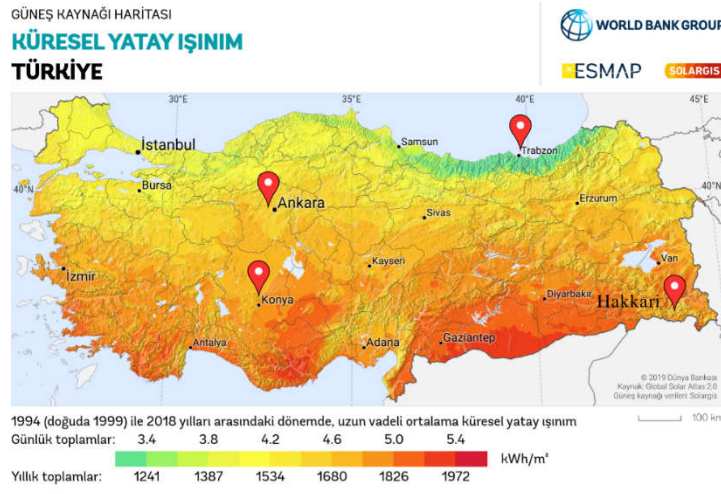
Elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan çeşitli enerji kaynakları, dönüştürülebilirlik özelliklerine göre birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi gibi birincil enerji kaynaklarının fotovoltaiik güneş panelleri aracılığıyla kullanımı, çevre dostu bir seçenek olarak ön plana çıkmaktadır. Fotovoltaiik teknolojiler, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerji kaynağı sunmaktadır. Ancak bu esnada üretildikleri malzemelerin özelliklerine bağlı olarak farklı ısı yükleri de oluştururlar. Oluşan bu ısı yükleri panellerin anlık verimini düşürmekte ve uzun sürede malzemenin yapısını bozabilmektedir. PV/T sistemlerinde sıcaklık yönetimine yönelik alınacak önlemler, bu olumsuz etkileri en aza indirebilir. Panelde biriken termal enerji PV/T sisteminden etkin bir şekilde uzaklaştırıldığında, sistemin elektrik üretim performansı da iyileşecektir (Ghadikolaei, 2021). Bu maksatla fotovoltaiik panellerin elektrik üretimi esnasında verim düşüşüne neden olan etkenler ve termal kolektörlerin ısı enerjisi üretimindeki avantajları düşünülerek fotovoltaiik-termal (PV/T) hibrit sistemler geliştirilmiştir. Fotovoltaiik-termal kolektörler, bir PV modülü ve arkasına yerleştirilen bir emici plaka içermektedir. Emici plakalar, fotovoltaiik hücrelerin sıcaklığını kontrol altında tutarak PV modülünün soğutulmasını sağlar ve bu sayede elektrik üretim performansını artırır. Ayrıca, bu sistemin bir diğer avantajı, PV/T sistemi tarafından çevreye salınan atık ısının faydalı bir şekilde yeniden kullanılabilmesidir (Benli, 2018). Bu konu üzerine literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır ve halen pek çok bilim insanı tarafından bu sistemler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalarla, yeni enerji teknolojilerinin ortaya çıkmasına, endüstriler ve pazarların oluşmasına katkı sağlanmış, yenilenebilir enerji teknolojilerinde yeni uygulamalar geliştirilmiştir (Tiwari & Dubey, 2010). Sopian ve arkadaşları (2020), PV/T kolektörlerinde akışkanın kütle akışının artmasının soğutmayı iyileştirdiğini ve böylece elektrik verimliliğinin arttığını belirtmiştir. Bu, PV/T sistem tasarımı kadar soğutmanın da önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Panellerin soğutulması, elektrik üretimini artırabilir ve sistemin genel etkinliğini iyileştirebilir (Muneeshwaran vd., 2020). Assaf ve Shabani (2016) tarafından yapılan TRNSYS simülasyonu, güneş-hidrojen entegre sisteminin yıllık sıcak su ihtiyacının %95'ini karşılayabildiğini göstermiştir. Öztürk vd. (2021), Hakkari ve Trabzon gibi farklı iklim bölgelerinde PV/T destekli ısı pompalı kullanım suyu ısıtma sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizini TRNSYS simülasyon programını kullanarak gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, Hakkari için %68, Trabzon için ise %67 enerji verimliliği göstermiştir. Başka bir enerji kaynağı olan hidrojen ise yüksek enerji içeriğiyle dikkat çekmektedir. 1 kg hidrojenin yaklaşık olarak 2.1 kg doğal gaz veya 2.8 kg petrol ile eşdeğer enerji içerdiği bilinmektedir (Yılmaz, 2013). Hidrojenin bu yüksek enerji yoğunluğu ve çevreci özellikleri, gelecekteki önemini artırmaktadır. Ayrıca, Hidrojenin kimyasal enerjisi yakıt hücreleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Vorontsov & Smirnotis, 2023). Midilli ve ark. (2007),

hidrojen enerjisi kullanımının küresel istikrar ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini inceleyerek, kullanım oranı arttıkça dünya çapında hidrojen enerjisine dayalı stabilite ve sürdürülebilirlik oranının da arttığını belirtmişlerdir. Çiloğulları ve arkadaşları (2017), PV/T sistem ile entegre PEM elektrolizörünün hidrojen üretim performansını incelemiş ve bu entegre sistemin enerji verimliliğini artırarak, ısı ve elektrik üretimini optimize ettiğini, ayrıca 1 Ağustos'ta tek bir PV/T paneliyle 0.018 kg hidrojen üretilbildiğini gözlemlemişlerdir. Mutlubaş ve Özdemir (2023), hidrojenin üretim, depolama ve taşınmasındaki teknolojik zorlukları vurgulamış; elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojenin, yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanmasında kullanılabileceğini belirtmiştir. Ancak, bu potansiyelin tam anlamıyla kullanılabilmesi için bazı teknolojik engellerin aşılması ve altyapının geliştirilmesi gerektiği de ifade edilmiştir. Dezhdar ve diğerleri (2023), İran'da PV/T panelleri, hidrojen üretimi ve depolamayı entegre eden bir enerji sistemini TRNSYS yazılımını kullanarak analiz etmiş ve hidrojen depolama ile pil depolama kombinasyonunun, enerji arz-talep dengesini sağlamada önemli bir rol oynadığını bulmuştur. Bu bulgular, hidrojen enerjisinin küresel düzeyde önemli bir rol oynayabileceğini işaret etmektedir. Hidrojenin endüstriyel süreçler, enerji üretimi, ısıtma sistemleri ve taşıma sektöründeki kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Hidrojen yakıt hücreleri, elektrik üretiminde çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir yapısı ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeli, hidrojenin sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmasını sağlamaktadır. Ancak, hidrojenin üretim ve depolama süreçlerindeki zorluklar göz önüne alındığında, enerji kaynakları arasında yapılacak seçimlerin önemi daha da belirginleşmektedir. Kullanılabilir kaynaklar, enerji maliyetleri, çevresel etkiler ve uygulanabilirlik gibi faktörler, sürdürülebilir bir enerji portföyü oluşturulmasında belirleyici rol oynamaktadır. Bu çerçevede, güneş enerjisi ve hidrojen gibi temiz enerji kaynakları, daha temiz bir çevre ve sürdürülebilir bir enerji geleceği konusunda umut vaat etmektedir.

Bu araştırma, PV/T modüllerinden elde edilen güneş enerjisini elektrik ve termal enerjiye dönüştüren, hidrojen üretimi ve depolanması yoluyla kesintisiz enerji sağlamayı amaçlayan bir sistem tasarımı ve analizini sunmaktadır. Tasarım ayrıca çevresel açıdan doğal gazlı yakıtlı sistemlerle kıyaslanmakta ve Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yer alan şehirleri için enerji verimliliği, çevresel etki ve sürdürülebilirlik açısından literatüre önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir.

Materyal ve Metot

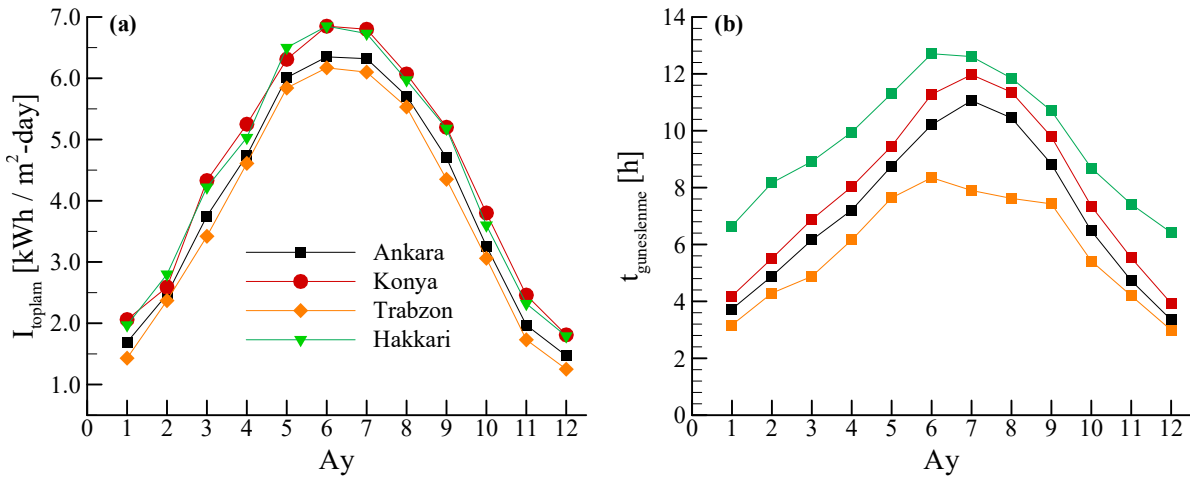
Bu araştırma da, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari şehirlerinde PVT destekli hidrojen üretim sistemlerinin enerji analizi gerçekleştirilmektedir. Bu analiz, her şehirdeki potansiyeli ve performansı belirlemeye yönelik olacaktır. Ayrıca, ele alınan şehirlere göre sıcak su üretimi ve hidrojen verimliliği açısından karşılaştırmalı veriler sunarak, hidrojen teknolojisinin enerji sektöründeki önemini vurgulanmaktadır. Bu maksatla öncelikle Şekil 1'de Türkiye'nin küresel yatay ışınım haritası incelenmiş, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari şehirleri simülasyonda analiz edilmek üzere seçilmiştir. Haritaya göre Türkiye'nin çeşitli bölgeleri fotovoltaik sistemler için dikkate değer bir potansiyele sahiptir.



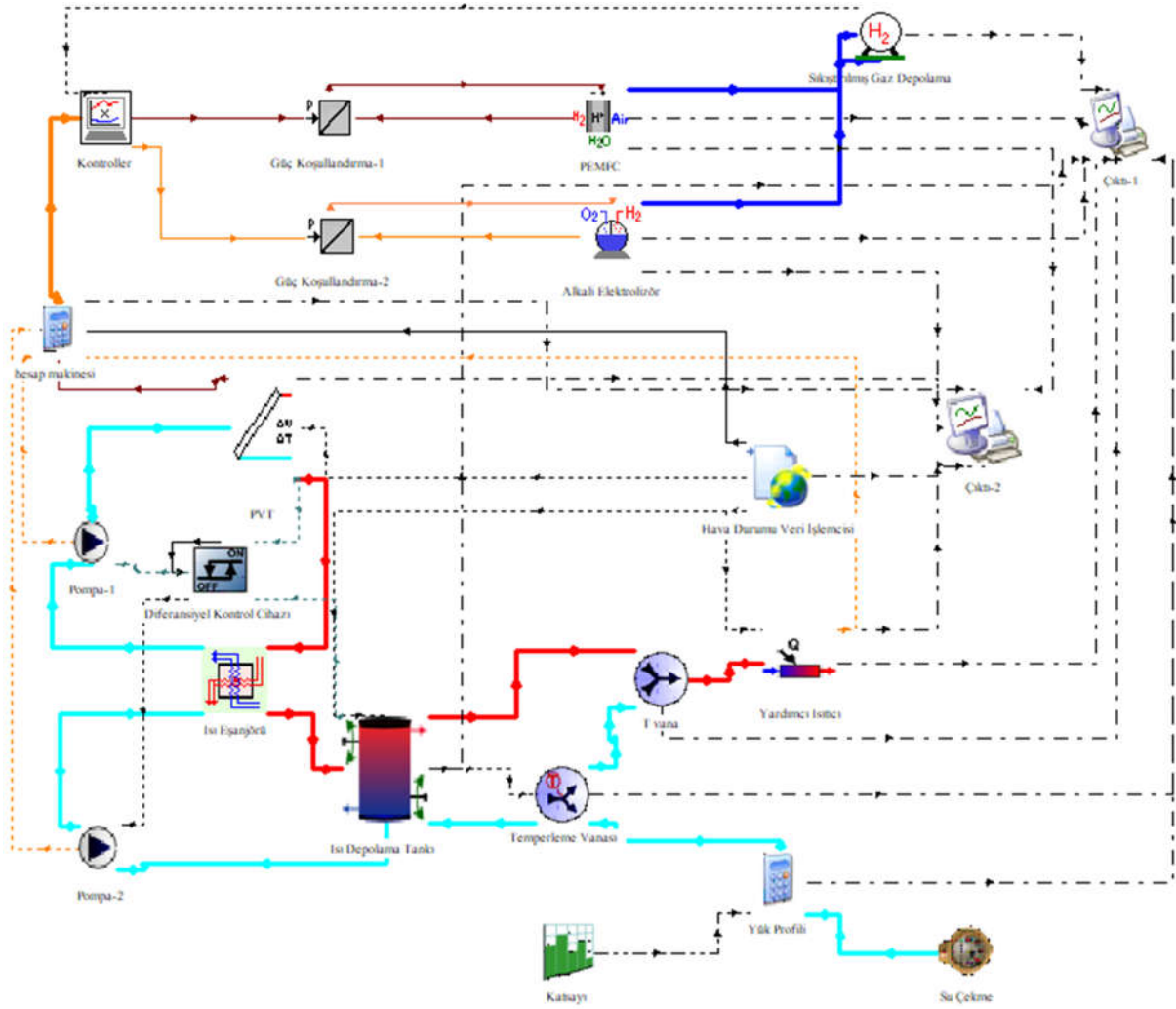
Şekil 1. Türkiye'nin Küresel Yatay Işınım Haritası (Solargis, 2024)

Türkiye'nin farklı bölgelerindeki ışınım potansiyeli, iklim ve coğrafi faktörlere bağlı olarak büyük değişiklikler göstermektedir. Hakkari, dağlık yapısı ve yüksek rakımıyla güneş ışığını daha uzun süre alabilen bir bölgedir, bu da fotovoltaik enerji üretimi için avantajlı bir konum sağlar. Bununla birlikte, bölgenin kış koşulları enerji üretiminde mevsimsel dalgalanmalara neden olabilir. Konya, geniş düzlükleri ve güneşlenme süresinin uzunluğu ile Türkiye'nin fotovoltaik enerji üretiminde en avantajlı şehirlerinden biridir. Ankara, İç Anadolu'nun ortasında yer alması ve daha ılıman bir karasal iklime sahip olması nedeniyle dengeli bir güneşlenme süresine sahiptir. Yıl boyunca diğer şehirlere nazaran nispeten sabit güneş ışığı alır, bu da fotovoltaik sistemlerin sürekli ve güvenilir enerji üretimini sağlar. Başkent olmasının verdiği avantajla enerji altyapısı da güçlüdür, bu da yenilenebilir enerji projelerine yatırım için cazip bir alan oluşturur. Trabzon ise daha düşük güneş ışınımına sahip olmasına rağmen, bölgesel fotovoltaik projeler için belirli bir potansiyel barındırmaktadır. Bu şehirler, farklı coğrafi ve iklimsel avantajları nedeniyle fotovoltaik enerji üretimi için stratejik olarak seçilmiştir. Şekil 2'de ele alınan iller için yatay düzleme gelen toplam ışınım ve güneşlenme sürelerinin değişimi grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu entegre tasarım, yalnızca elektrik enerjisi üretimiyle sınırlı kalmayıp, fotovoltaik panellerin soğutulmasıyla elde edilen ısı enerjisi sayesinde bir kullanım suyunun ısıtma ihtiyacını da karşılayabilmektedir. Elektrolizör ise PV/T de üretilen tüketim fazlası elektrik enerjisini kullanarak suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayırmaktadır. Üretilen hidrojen, ihtiyaç duyulduğunda yakıt hücreleri aracılığıyla yeniden elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. PV/T destekli elektrolizör sistemi, fotovoltaik panellerin soğutulmasından kaynaklanan verim artışı, hidrojen üretimi ve elde edilen ısı enerjisinin çeşitli ısıtma yüklerini karşılama yetenekleri ile enerji dönüşümünü ve kullanımını etkili bir şekilde entegre ederek sürdürülebilir bir enerji çözümü sunmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 3'te TRNSYS programında oluşturulan devre şeması yer almaktadır.

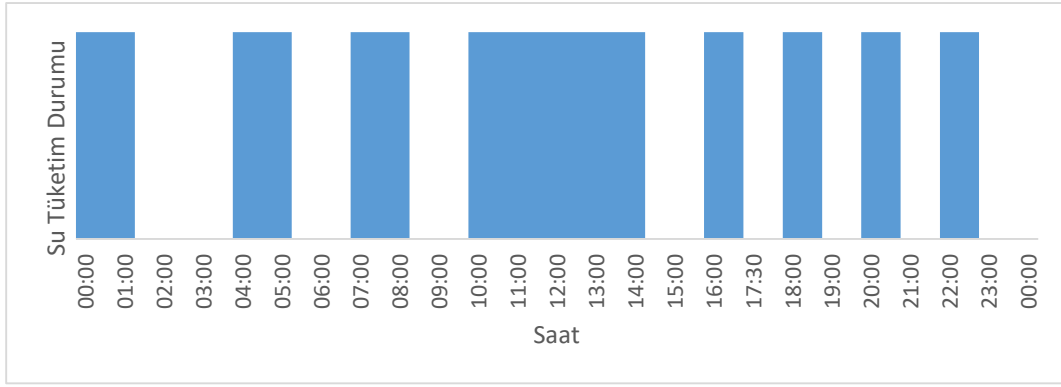


Şekil 2. Ele Alınan İller İçin Yatay Düzleme Gelen Toplam Işınım ve Güneşlenme Sürelerinin Değişimi

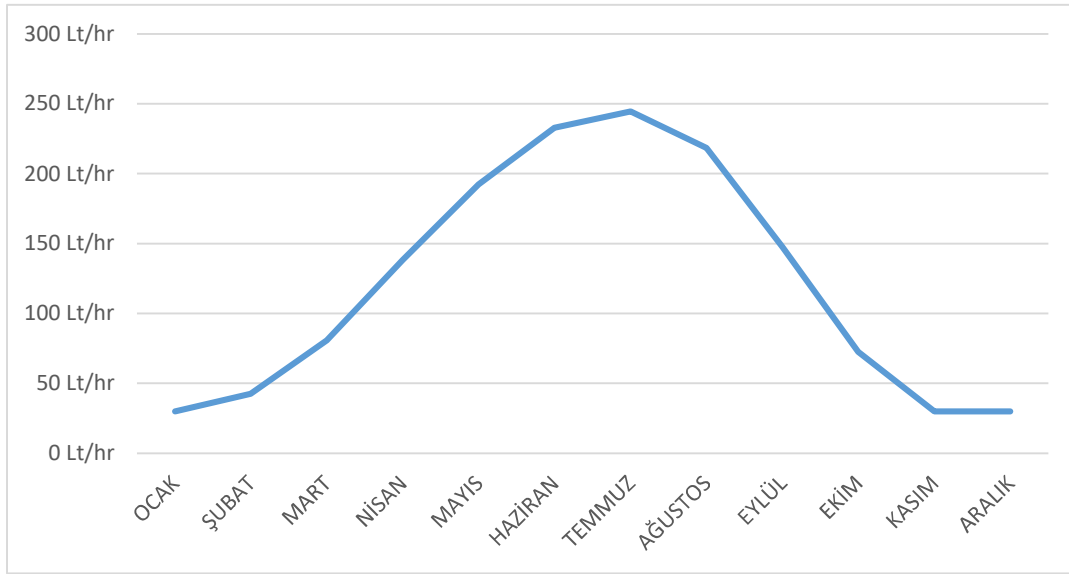


Şekil 3. TRNSYS Programında Simülasyonda Kullanılan Tasarım

TRNSYS simülasyonunda kullanılan PV/T paneli 35° eğime, 25 m^2 yüzey alanına ve 0.96 kolektör kanadı verimlilik faktörüne sahiptir. Soğutma için 3.542 kJ/kgK özgül ısı kapasitesine sahip etilen glikol-su karışımı kullanılırken, termal enerjinin depolanması için 2.5 m^3 hacimli sıcak su tankı kullanılmıştır. Tankın sıcaklığı, şebekeden alınan 15°C 'lik suyu 45°C 'ye çıkarmaya yetmediğinde ek ısıtıcı devreye girmekte, yeterli olduğu durumlarda ise elektrikli su ısıtıcısına duyulan ihtiyaç azalmaktadır, böylece enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Her üç şehirde gün içerisindeki su çekim zamanları sabit tutulmuş ve su tüketimi saatlik olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Günlük toplam 9 saat su tüketimi varsayılmış, aylık debi değişimi ise Şekil 5'te sunulmuştur. Kışın günde en az 315 litre ile yaz aylarına nispeten daha az su tüketimi olduğu, yaz aylarında ise Haziran, Temmuz aylarında günde 2200 litreye varan sıcak su ihtiyacı ile maksimum seviyelere ulaştığı varsayılmıştır.



Şekil 4. Günlük Su Tüketim Durumu



Şekil 5. Su Debisinin Aylara Göre Değişimi

Fotovoltaik-termal modüllerden üretilen elektriğin fazlası, elektrolizör kullanılarak hidrojene dönüştürülerek 55 bar basınç altında, 25 m³ kapasiteli yüksek basınçlı tanklarda depolanır. Güneş ışığının olmadığı, yetersiz olduğu veya elektrik talebinin artıp PV/T'nin bu talebi karşılayamadığı durumlarda, depolanan hidrojen yakıt hücresi aracılığıyla yeniden elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu sayede, güneş enerjisinin mevsimsel dalgalanmaları ve günlük döngüsü dengelenir ve kesintisiz enerji temini sağlanır. Simülasyonun çalışabilmesi amacıyla tankın başlangıçta %5 dolu olduğu varsayılarak simülasyon yapılmıştır.

Alkali elektroliz, suyun (H₂O) elektroliz yoluyla hidrojen (H₂) ve oksijen (O₂) gazlarına ayrılmasını sağlayan bir elektrokimyasal süreçtir. Elektroliz hücresinde, reaksiyonlar anot ve katot arasında yürütülür; anot tarafında oksijen, katot tarafında ise hidrojen gazı üretilir. Bu elektrokimyasal süreç, enerji depolamada kullanılan hidrojenin üretilmesini sağlayarak yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırır.

Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt hücreleri ise hidrojen ve oksijen arasındaki elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla elektrik üretimi sağlayan cihazlardır. Düşük çalışma sıcaklıkları ve hızlı başlangıç gibi avantajlara sahip olan PEM yakıt hücreleri, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Hidrojen gazı, anot tarafında, oksijen gazı ise katot tarafında reaksiyona girer. Reaksiyon sırasında protonlar, elektrolit boyunca hareket ederken bir elektrik akımı oluşturur.

Enerji Analizi

Enerji analizleri, enerji sistemlerinin performansını değerlendirmek için kritik bir araçtır. Fotovoltaik-termal panellerde enerji analizi, panelin hem elektrik hem de ısı üretim yeteneklerini inceleyerek, güneş ışığını

elektrik enerjisine çevirme verimliliğini ve üretilen ısının sistem üzerindeki etkilerini değerlendirir. Bu analiz, panelin enerji verimliliğini, güneş ışınımı ve tasarım koşullarına göre belirlemeye odaklanır. Elektrolizörün enerji analizi ise, suyu hidrojen ve oksijene ayıran bu cihazın enerji girdi, çıktıları ve termodinamik etkinliğini değerlendirir. Analiz, elektrolizörün harcadığı elektriğin ne kadarının hidrojen üretimine dönüştüğünü ve çevresel koşulların bu süreç üzerindeki etkilerini inceler. Bu çalışmada, literatürdeki varsayımlar doğrultusunda, Enerji çıkışının yalnızca hidrojen enerjisi olduğu, hidrojenin ideal gaz olarak kabul edildiği ve reaktanların kinetik ve potansiyel enerjilerinin ihmal edildiği kabul edilmiştir (Çalışkan vd., 2013). Hidrojen yakıt hücresi, hidrojen gazı ve oksijen/havanın elektrokimyasal reaksiyon yoluyla birleştirilerek elektrik enerjisi ürettiği bir cihazdır. Yakıt hücresi için yapılan enerji analizi, hücrenin enerji girdileri, çıktıları ve verimliliğini değerlendirir.

Bu çalışmada PV/T destekli hidrojen üretim sisteminin termal ve elektriksel verimliliği sistemin performansını ortaya koymak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

PV/T'nin toplam enerji denkliği şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{E}_G = \dot{E}_{el} + \dot{E}_{th} \quad (1)$$

Burada \dot{E}_{el} elektrik enerjisini ve \dot{E}_{th} ise termal enerjiyi ifade eder. Panelin enerji verimliliği şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{PV/T} = \frac{\dot{E}_G}{\dot{E}_S} = \frac{\dot{E}_{el} + \dot{E}_{th}}{\dot{E}_S} \quad (2)$$

Burada \dot{E}_S panel yüzeyine gelen Güneş ışınımından elde edilen toplam enerjidir. PV/T panelinin elektriksel ve termal enerji denklemleri şu şekildedir:

$$\dot{E}_{th} = \dot{m}_{akışkan} c_p (T_{çıkış} - T_{giriş}) \quad (3)$$

$$\dot{E}_{el} = FF (V_{OC} I_{SC}) \quad (4)$$

$$\dot{E}_S = \dot{I}_T \cdot A_{PV/T} \quad (5)$$

Burada, \dot{I}_T birim m² gelen ışınım, $A_{PV/T}$ PV/T Panelinin Yüzey Alanı, FF güneş panelinin dolun faktörü, V_{oc} açık devre gerilimi, I_{sc} ise kısa devre akımıdır. $\dot{m}_{akışkan}$ PV/T de dolaşan akışkanın kütleli debisi, c_p ise akışkanın özgül ısıdır. $T_{çıkış}$ ve $T_{giriş}$ sırasıyla PV/T'den çıkan ve giren akışkanın sıcaklığıdır. Böylece enerji verimliliği denklemi şu şekilde yazılabilir (Joshi vd., 2009):

$$\eta_{PV/T} = \frac{FF(V_{OC} I_{SC}) + \dot{m}_{akışkan} c_p (T_{çıkış} - T_{giriş})}{\dot{I}_T \cdot A_{PV/T}} \quad (6)$$

Yapılan tasarım için elektrolizörün enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{E}n_{Elz,giren} - \dot{E}n_{Elz,çıkan,H2} - \dot{E}n_{Elz,kayıp} = 0 \quad (7)$$

Burada " $\dot{E}n_{Elz,giren}$ ", " $\dot{E}n_{Elz,çıkan,H2}$ " ve " $\dot{E}n_{Elz,kayıp}$ " sırasıyla elektrolizörün enerji girişi, faydalı hidrojen enerjisi çıkışı ve enerji kaybıdır.

Su elektrolizinde, teorik olarak 1.23 V minimum hücre voltajı gerekir. Ancak tersinmezlikler hesaba katıldığında elektroliz olayının gerçekleştiği minimum potansiyel farka termonötr voltaj (U_{tn}) adı verilmektedir. Termonötr voltaj, reaksiyonun endotermik veya ekzotermik doğasını dengeleyen değerdir ve genellikle tersinmezlikler nedeniyle 1.48 V civarındadır.

Suyun parçalanması reaksiyonunda açığa çıkan toplam enerji miktarı entalpi değişimine (ΔH) eşdeğerdir. Toplam enerji talebi ΔH aşağıdaki ifadeyle termonötr hücre voltajıyla ilişkilidir:

$$U_{tn} = \frac{\Delta H}{n \cdot F} \quad (8)$$

Burada n, H₂ molekülü başına elektron sayısını (su için 2), F ise faraday sabitini (96,485 C/mol) ifade eder.

Elektrolizörlerde, hücre voltajı termonötr voltajdan büyüktür çünkü kimyasal reaksiyonu enerji harcayan bir endotermik süreçtir. Bir elektrolizörde ısı üretimi temel olarak elektriksel verimsizliklerden kaynaklanmaktadır. Enerji verimliliği termonötr voltajdan ve hücre voltajından ($U_{hücre}$) yararlanarak hesaplanabilir:

$$\eta_{Elz} = \frac{U_{tn}}{U_{hücre}} \quad (9)$$

Yapılan tasarım için yakıt hücresi'nin enerji dengesi aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\dot{E}n_{FC,giren,H_2} - \dot{E}n_{FC,çıkan,faydalı} - \dot{E}n_{FC,kayıp} = 0 \quad (10)$$

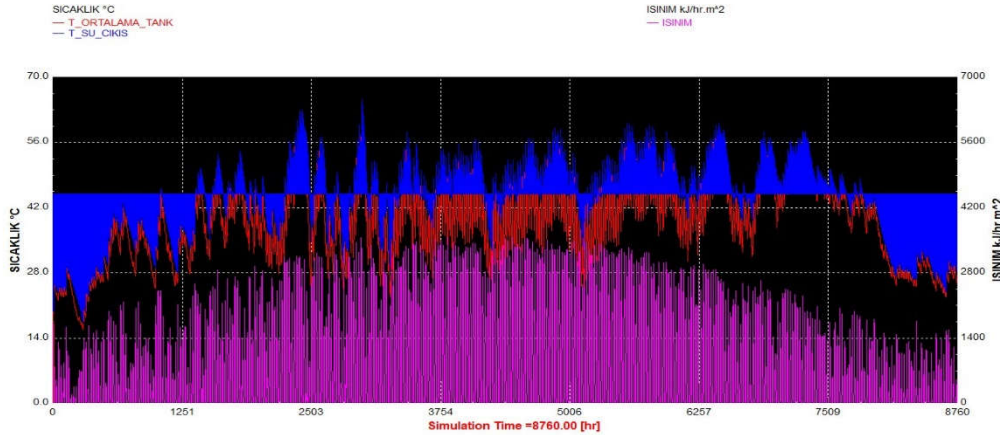
Burada " $\dot{E}n_{FC,giren,H_2}$ ", " $\dot{E}n_{FC,çıkan,kullanışlı}$ " ve " $\dot{E}n_{FC,kayıp}$ " sırasıyla yakıt hücresi'nin enerji girişi, faydalı enerji çıkışı ve enerji kaybı oranlarıdır.

Yakıt hücrelerinde, hücre voltajı termonötr voltajdan küçüktür çünkü enerji üreten bir ekzotermik süreçtir. Yakıt hücresinin enerji verimliliği termonötr voltajdan ve hücre voltajından yararlanarak şu ifadeyle hesaplanabilir:

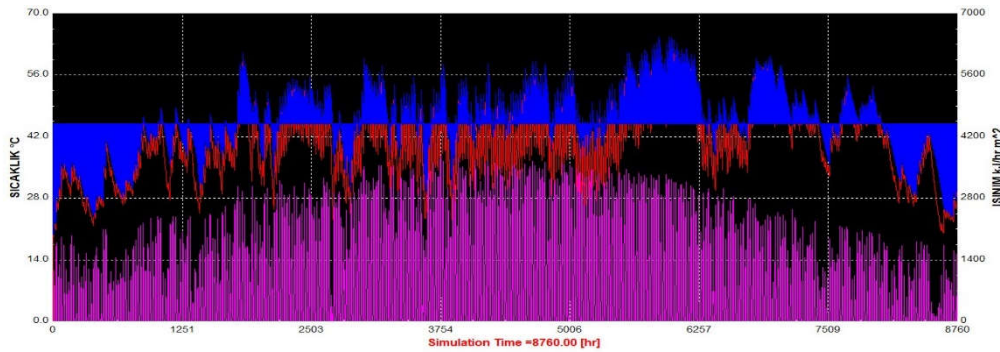
$$\eta_{YH} = \frac{U_{hücre}}{U_{tn}} \quad (11)$$

Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

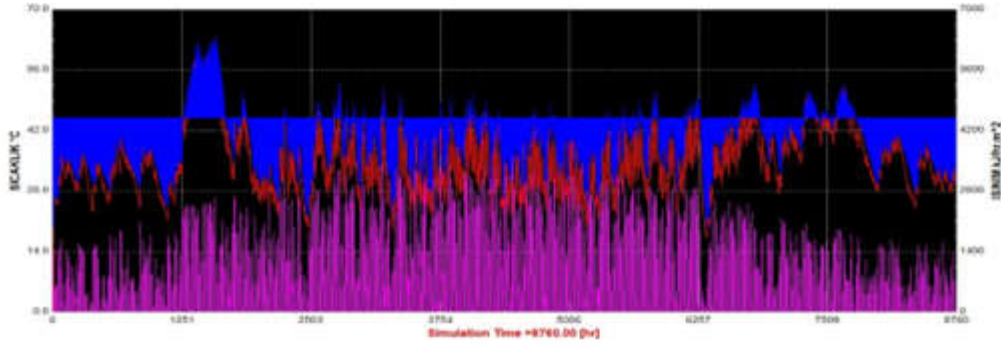
Bu bölümde, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari şehirleri için tasarlanan sistemin aylık performans verileri incelenmiştir. Sistem, güneş enerjisi kullanarak PV/T modülleri aracılığıyla elektrik ve termal enerji üretir. Üretilen elektriğin ihtiyaç fazlası elektrolizörde suyun hidrojene ayrılması için kullanılır ve elde edilen hidrojen, yüksek basınçlı tanklarda depolanır. Elektrik enerjisine ihtiyaç duyulması ve PV/T'nin yeterli gelmediği durumlarda yakıt hücresi yardımıyla depolanan hidrojen enerjisi tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu sayede tasarım harici bir ek kaynak olmaksızın kesintisiz bir şekilde enerji ihtiyacını karşılamaktadır.



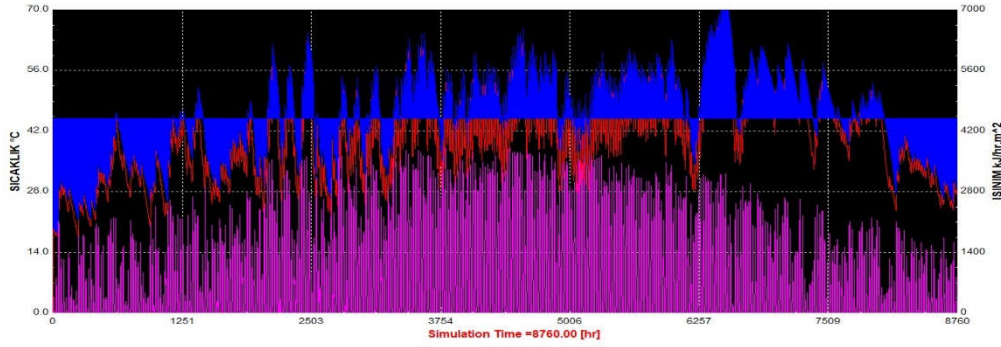
(a)



(b)



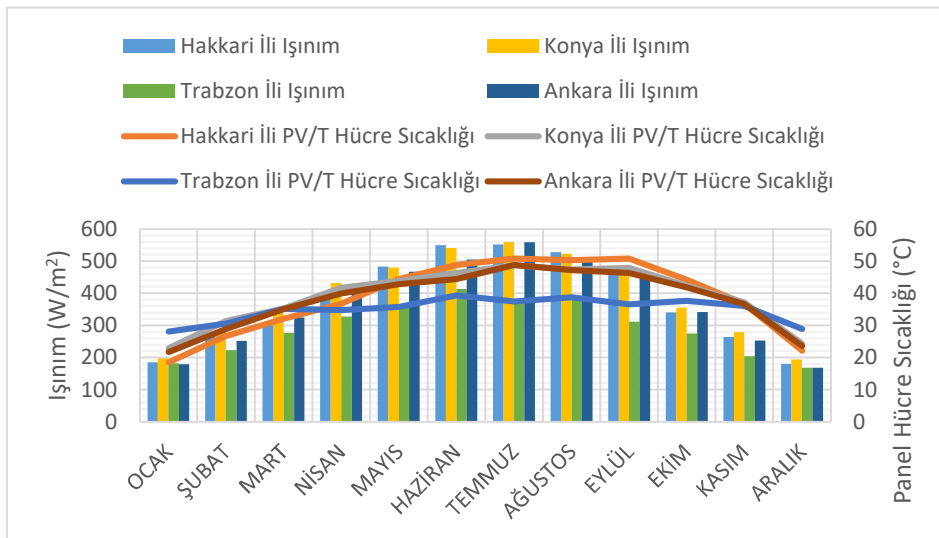
(c)



(d)

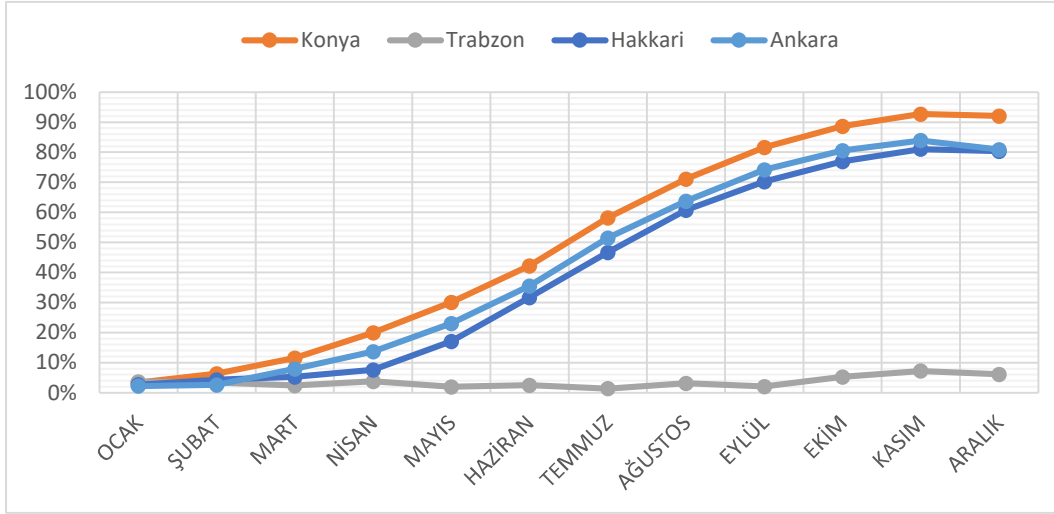
Şekil 6. Şehirlerin Yıllık Işınım, Ortalama Tank Sıcaklığı ve Sıcak Su Çıkış Sıcaklık Değerleri (a) Ankara (b) Konya (c) Trabzon (d)Hakkari

Simülasyon programının sağlıklı çalışabilmesi için başlangıç olarak atfedilen ocak ayında hidrojen depolama tankı %5 dolu olarak ele alınmıştır. Işınım değerleri, güneş ışığının mevsimsel değişimine bağlı olarak tüm şehirlerde Ocak ve Aralık aylarında en düşük seviyede yaz aylarında ise zirve yapmaktadır. Ele alınan şehirlerin yıllık ışınlam, ortalama tank sıcaklığı ve sıcak su çıkış sıcaklık değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'da sunulan saatlik ışınlam değerlerinin daha iyi karşılaştırılabilmesi için, bu verilerden hesaplanan aylık ortalama ışınlam değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7, her dört şehirdeki PV/T sistemlerinin hücre sıcaklığının, bölgesel mevsim değişimlerine bağlı olarak nasıl değiştiğini daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. İklim değişiklikleri, güneş ışınlamının mevsimsel dağılımına doğrudan etki ederek, sistemin hem elektrik hem de termal enerji üretim verimliliğini etkilemektedir.



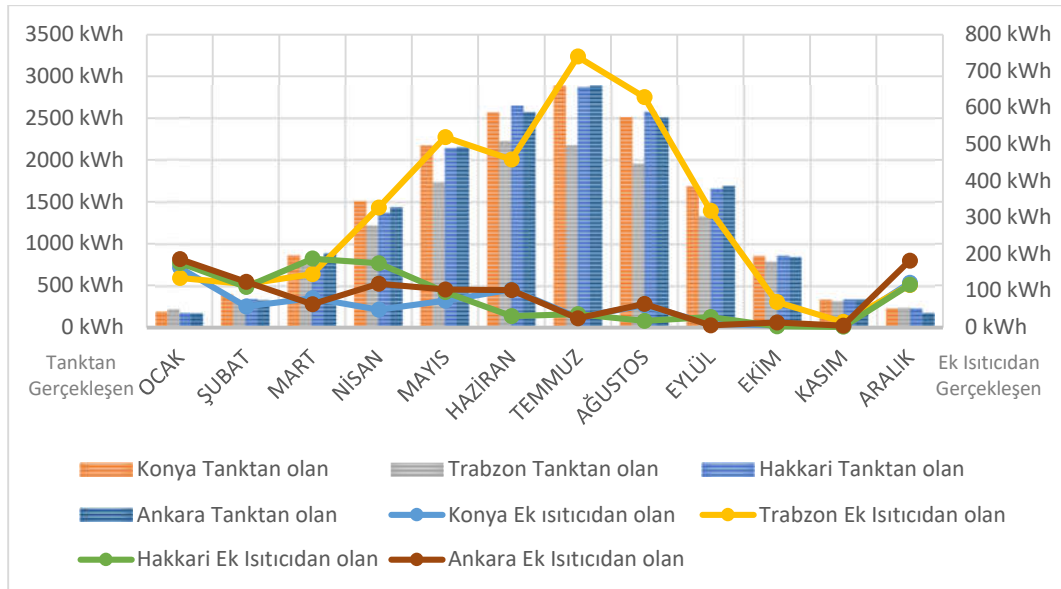
Şekil 7. İllere Göre Işınım-PV/T Hücre Sıcaklıkları

Şekil 8, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari'deki hidrojen depolama tanklarının aylık doluluk oranlarını karşılaştırarak, farklı iklim bölgelerindeki dolayısıyla farklı güneş enerjisi potansiyeline sahip şehirlerin hidrojen üretimi üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Hidrojen Depolama Tankı Şarj Durumu

Şekil 9, ele alınan şehirlerde suya aktarılan ısı enerjisinin kaynağını ve miktarını aylık bazda analiz etmektedir. Su ısıtmak için gereken enerji, hem PV/T sisteminden sağlanan hem de ihtiyaç halinde kullanılan ek ısıtıcılardan aktarılan ısı enerjisi olarak ikiye ayrılmıştır. 15°C sıcaklığındaki suyun, 45°C'ye çıkarılması için gerekli ısı enerjisi, şehirlerin iklim koşulları, günün saatleri ve su tüketim zamanlarındaki değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Bu analiz, farklı bölgelerdeki şehirlerin su ısıtma kapasitelerini değerlendirme açısından önemli bir veri sunmaktadır. Sonuçlar, güneş enerjisi destekli su ısıtma potansiyelinin bölgesel iklim farklılıkları doğrultusunda önemli ölçüde değiştiğini, ek ısıtıcıya bağımlılığın ne derecede olduğunu ortaya koymaktadır.

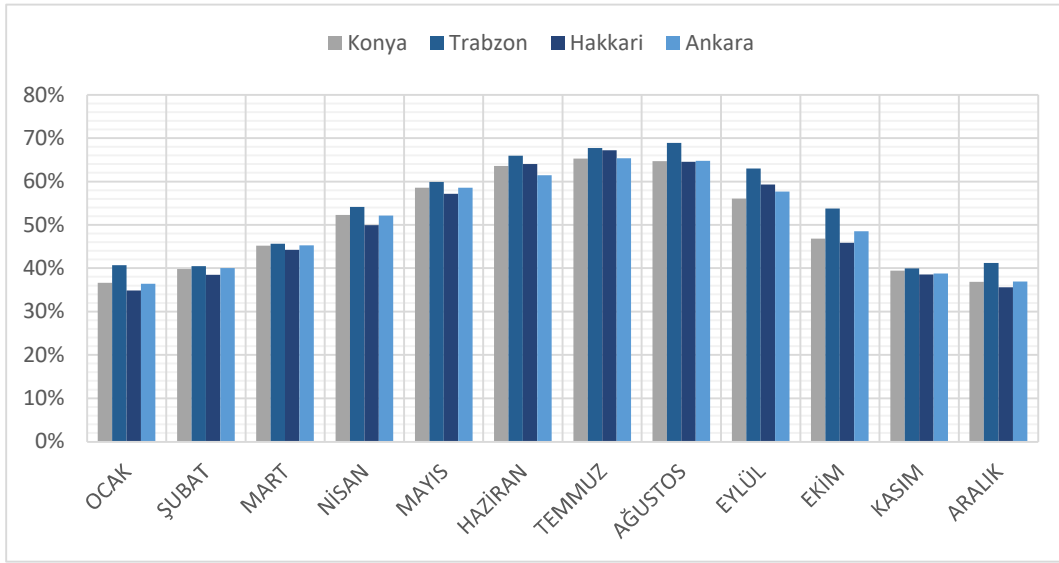


Şekil 9. Suya Aktarılan Isı Enerjisi

Trabzon için yapılan simülasyonda, yıl içinde yaklaşık olarak toplam 24 gün boyunca belirlenen su yük profiline PV/T sistemi tarafından tam olarak karşılanamadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu açığı kapatması

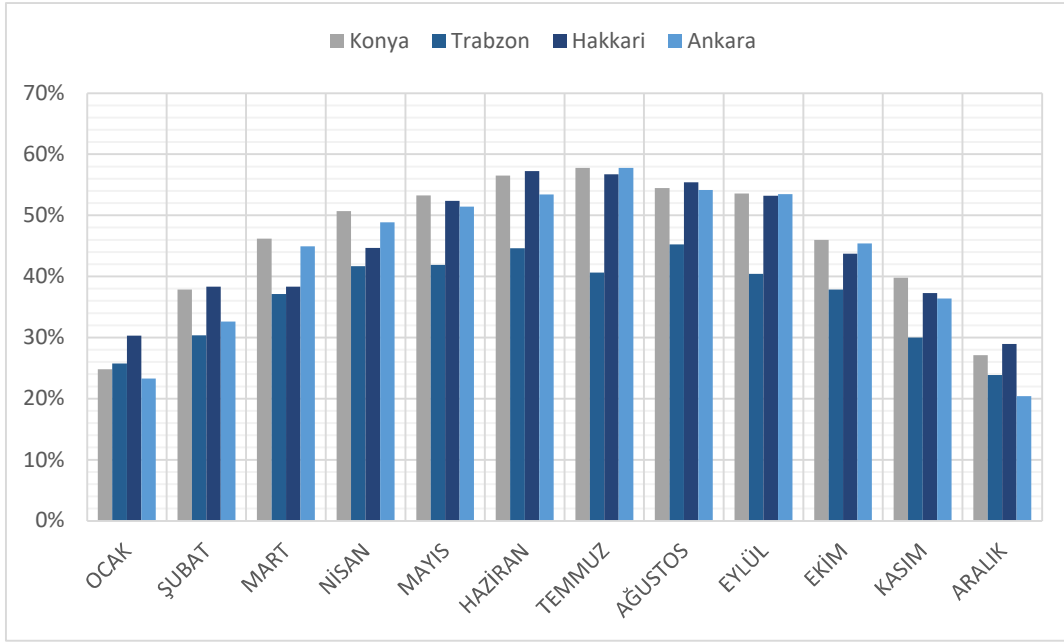
beklenen ek ısıtıcı da talebi karşılamada yetersiz kalmıştır. Buna karşın, Konya, Ankara ve Hakkari’de sistem yıl boyunca kesintisiz olarak çalışmıştır.

Şekil 10, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari şehirlerindeki PV/T sisteminin aylık enerji verimliliklerini göstermektedir. Verilere göre, tüm şehirlerde enerji verimliliği mevsimsel değişikliklere bağlı olarak dalgalanmaktadır. Yaz aylarında daha yüksek ışınım değerleriyle PV/T sistemlerinin verimliliği artarken, kış aylarında ışınımın azalmasıyla birlikte enerji üretimi de düşmektedir. Bu nedenle, bölgesel iklim şartları, sistemin yıl boyunca istikrarlı ve yüksek verimle çalışabilmesi açısından kritik rol oynamaktadır. Ayrıca Trabzon’da kurulduğu varsayılan sistemin diğer illerle aynı miktarda su tüketim profiline sahip olmasına rağmen sahip olduğu düşük ışınım değeri, ısı tankı ile PV/T arasında daha sık akışkan sirkülasyonu gerçekleştirmesine ve PV/T’de bu nedenle daha etkin bir soğutma sağlanmasına neden olmuştur. Trabzon’daki bu termal verim yüksekliği onu toplam PV/T veriminde diğer illere kıyasla daha yüksek verimli kılmıştır. Bu durum, PV/T sistemlerinin kurulumuna yönelik yerel iklim koşullarının dikkate alınması gerektiğini ve sistem tasarımının buna göre optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



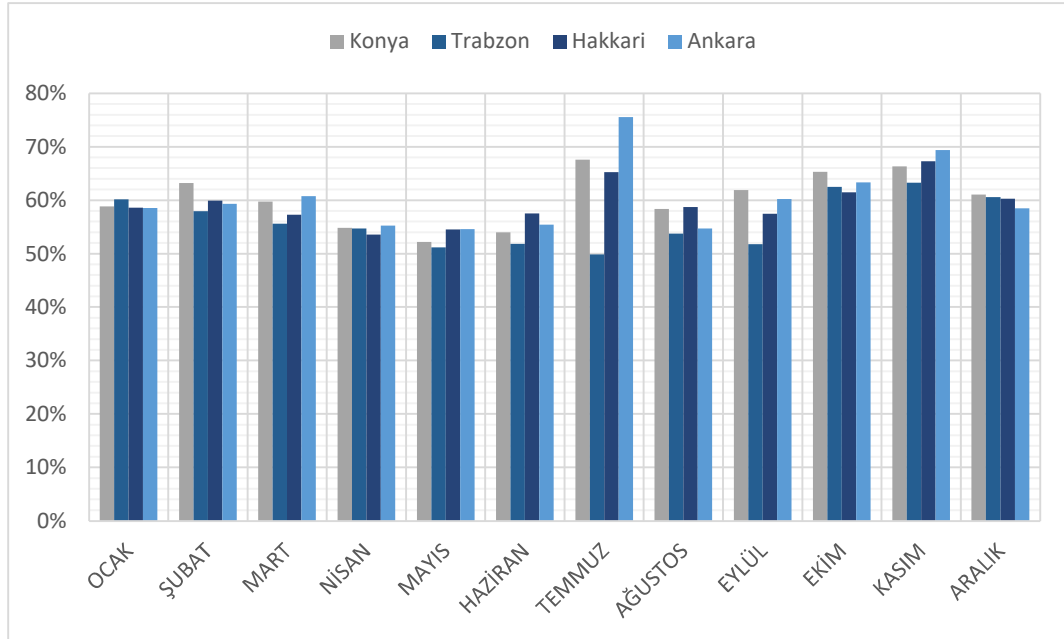
Şekil 10. PV/T Verimlilikleri

Şekil 11, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari'deki elektrolizörlerin aylık verimliliklerini karşılaştırmaktadır. Tüm şehirlerde elektrolizör verimliliğinin yıl boyunca belirgin dalgalanmalar gösterdiği gözlemlenmiştir. Özellikle yaz aylarında, artan güneş ışınımıyla birlikte PV/T sistemlerinin daha yüksek miktarda elektrik enerjisi üretmesi, elektrolizörlerin verimini artırmaktadır. Buna karşın, düşük güneş ışınımı nedeniyle elektrik üretimi azalmakta, bu da elektrik talebi karşılandıktan sonra hidrojen üretimi için DC/DC güç düzenleyiciye gönderilen elektrik enerjisinin sınırlı kalmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, elektrolizöre iletilen akım-gerilim miktarı değişmekte ve verimlilik farklılık göstermektedir. Bu durum, tasarlanan sistemdeki elektrolizör performansının doğrudan güneşten elde edilen elektrik enerjisine ve elektrik yük talebine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle özellikle Trabzon'da düşük güneş ışınımı nedeniyle elektrolizör verimliliği, diğer illere kıyasla daha düşük seyretmektedir.



Şekil 11. Elektrolizör Verimlilikleri

Şekil 12'de, Ankara, Konya, Trabzon ve Hakkari şehirlerindeki yakıt hücresi verimlilikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 12. Yakıt Hücresi Verimlilikleri

Doğalgazın %70-90'a varan büyük bir bölümü metandan oluşur. Bir molekül metanın yanması ise bir molekül karbon dioksit üretimine ve atmosfere karbon dioksit salınımına neden olur. Bu da iklim değişikliği ve sera gazı etkisinin artmasına sebep olur. Metanın yanma reaksiyonu sonucu açığa çıkan karbon dioksit miktarı hesaplandığında, 16 gram metanın yanmasıyla 44 gram karbon dioksit üretilir. Bu bağlamda, yoğunlukları göz önüne alınırsa 1 m³ metan yanması yaklaşık 1.98 kg karbon dioksit üretir. Dolayısıyla, çalışmada 15°C de gelen su sıcaklığını 45°C'ye çıkarmak için gereken aylık ortalama ısı enerjisi ihtiyacı, bu hesaplamalar temelinde doğal gazla karşılanmış olsaydı, oluşacak karbon dioksit salınımı ve %95 verimli doğal gaz yakıtlı bir kazan kullanıldığında oluşacak doğal gaz tüketimi m³ biriminden yaklaşık olarak Tablo 1'de sunulmuştur.

Veriler, yaz aylarında artan su tüketimine bağlı olarak suyun istenilen sıcaklığa ulaşması için doğal gaz kullanımında bir artış olduğunu göstermektedir. Mevcut tasarımda, su ısıtma için gereken ısı enerjisinin büyük kısmı güneşten elde edilse de, doğal gaz kazanı kullanıldığında, doğal gaz tüketimi zorunlu hale gelmektedir. Bu durum, geleneksel yöntemlerin kullanılması halinde ekonomik yükün artacağına işaret etmektedir. Güneş enerjisi destekli sistemden sağlanan ısı enerjisinin, doğal gaz kullanımını azaltarak maliyet tasarrufları sağlayabileceği de böylece vurgulanmaktadır.

Bu analiz, yenilenebilir enerji kullanımının çevresel faydalarını daha net ortaya koymaktadır. PV/T sistemleri ve hidrojen üretimi gibi çevreci sistemlerde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sonucu doğrudan karbon dioksit salınımı gerçekleşmez. Güneş enerjisi gibi temiz kaynaklardan elde edilen enerji, depolama ve tüketim aşamalarında atmosfere zararlı gazların yayılmasını engelleyerek çevresel etkiyi minimuma indirir. Bu nedenle, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin uzun vadede fosil yakıt kullanımına dayalı sistemlere göre önemli avantajlar sunduğu açıktır.

Tablo 1. Aylık Tüketilen Eşdeğer Doğal Gaz Miktarı ve Karbon Dioksit Salınımı

	Eş Değer Tüketilen Doğal Gaz Miktarı (m ³ /Ay)	Karbon Dioksit Salınımı (kg/Ay)
OCAK	39	78
ŞUBAT	50	99
MART	105	209
NİSAN	175	346
MAYIS	251	498
HAZİRAN	294	583
TEMMUZ	320	633
AĞUSTOS	285	565
EYLÜL	187	369
EKİM	95	188
KASIM	38	75
ARALIK	39	78

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular, farklı iklim ve çevre koşullarına sahip şehirlerde enerji üretiminde belirgin mevsimsel dalgalanmalar olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın öne çıkan sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- Başlangıçta %5 dolu kabulüyle 63.22 Nm³ ile simülasyona başlatılan hidrojen tankında yıl sonunda, 0 °C ve 1 bar koşullarında, şehir bazında farklı miktarlarda hidrojen depolanmıştır: Ankara'da 1023.47 Nm³, Konya'da 1163.63 Nm³, Trabzon'da 77.12 Nm³ ve Hakkari'de 1016.12 Nm³.
- Trabzon simülasyonunda, PV/T sisteminin toplam 24 günlük su yük profilini karşılayamadığı, ek ısıtıcının da yetersiz kaldığı görülmüştür. Buna karşın, Konya, Ankara ve Hakkari'de sistem yıl boyunca kesintisiz bir şekilde yükü karşılamıştır. Bu sonuç, Trabzon gibi değişken güneş ışınımı ve düşük çevresel sıcaklık koşullarına sahip bölgelerde, PV/T sistemi ve ek ısı kaynağının yıl boyunca belirlenen termal yük profilini sürekli karşılayabilmesi için daha fazla optimizasyona ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.
- Fotovoltaik-termal sistemlerin enerji verimleri, her şehirde yaz aylarında en yüksek seviyelere ulaşmış olup yıllık ortalamalar; Ankara, Konya ve Hakkari'de %50, Trabzon'da ise %53 olarak saptanmıştır.
- Elektrolizör verimliliği yıllık ortalama da Hakkari'de %45, Ankara %44, Konya'da %46 ve Trabzon'da ise %37 olarak saptanmıştır.
- Yakıt hücresi verimliliği yıllık ortalama da Konya ve Ankara'da %60, Hakkari'de %59 ve Trabzon'da %56 olarak saptanmıştır.

Bu sonuçlar, enerji üretim ve depolama süreçlerinin bölgesel iklim koşullarına bağlı olarak nasıl değişiklik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu veriler doğrultusunda, enerji projeleri planlanırken her şehrin kendi iklimine özgü avantaj ve dezavantajlar dikkate alınmalıdır. Mevsimsel verimlilik değişimlerine bağlı olarak,

uygun yedekleme sistemleri ve bakım stratejileri geliştirilmeli, böylece sistemin kesintisiz çalışması sağlanmalıdır. Ayrıca, yerel iklim koşulları, güneş ışığı süresi, sıcaklık dalgalanmaları gibi faktörler dikkate alınarak en uygun enerji sistemleri seçilmelidir. Sonuç olarak, bu tasarım, yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırmak, enerji depolama çözümlerini güçlendirmek ve hidrojen teknolojilerini daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir hale getirmek için önemli bilgiler sunar.

Bu tasarımın avantajları, çok yönlü enerji üretimi ve sürdürülebilir enerji yönetimi açısından oldukça dikkate değerdir. Sistemin öne çıkan avantajları:

- PV/T, Güneş enerjisini hem elektrik hem de termal enerjiye dönüştürerek, PV sistemlerinin genel verimliliğini artırır. Böylece, sistem hem elektrik ihtiyacını karşılar hem de sıcak su üretiminde kullanılmak üzere termal enerji ihtiyacını karşılar.
- Üretilen fazla elektrik, hidrojene dönüştürülerek depolanabilir, bu da güneş enerjisinin mevsimsel dalgalanmalarını ve günlük döngüsünü dengelemeye yardımcı olur. Bu şekilde, yıl boyunca kesintisiz enerji temini sağlanabilir.
- Hidrojen depolama sayesinde enerji arz güvenliği artar.
- Sistem, farklı enerji ihtiyaçlarına göre ölçeklendirilebilir ve uyarlanabilir bir yapıya sahiptir. Bu modüler tasarım, sistemin esnek olmasını ve farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesini sağlar.
- Verimlilik oranlarının artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlayarak uzun vadede ekonomik sürdürülebilirliği destekler. Aynı zamanda, çevresel fayda sunan bu sistemler, enerji sektörünün daha temiz ve sürdürülebilir bir geleceğe geçişine katkı sağlar.

Sonuç olarak, sistem yüksek verimliliği, kesintisiz enerji temini, çevre dostu özellikleri ve modüler yapısı ile öne çıkmaktadır. Ancak, sistemin performansı yerel iklim koşullarına, kullanılan bileşenlerin verimliliğine, depolama kapasitesine ve sistem kontrol algoritmalarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Bu tasarım, yenilenebilir enerji sistemleri, enerji depolama ve hidrojen teknolojileri alanlarında daha ileri araştırmalar için önemli bir temel sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, sistemin performansını optimize etmeyi ve farklı iklim koşullarına uyarlamayı hedeflemelidir. Bu, özellikle farklı bölgelerdeki yerel enerji ihtiyaçlarına ve kaynak potansiyeline dayalı enerji çözümlerinin geliştirilmesi açısından kritik önem taşır.

Kaynaklar

- Assaf, J., Shabani, B., 2016. Transient simulation modelling and energy performance of a standalone solar-hydrogen combined heat and power system integrated with solar thermal collectors. *Applied Energy*, 178:66-67.
- Benli, F., 2018, Fotovoltaik (PV) ve Fotovoltaik-termal (PV-T) Kolektörlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye.
- Çalışkan, H., Dinçer, İ., Hepbaşlı, A., 2013. Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: modeling and case study. *Applied Thermal Engineering*, 61: 784–798.
- Ciloğulları, M., Erden, M., Karakilcik, M., Dinçer, İ., 2017. Fotovoltaik ve Termal Sistemin Hidrojen Üretim Performansının Araştırılması. *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi*, 42(4):2547-2552.
- Dezhdar, A., Assareh, E., Agarwal, N., Keykhah, S., Aghajari, M., Lee, M., 2023. Transient optimization of a new solar-wind multi-generation system for hydrogen production, desalination, clean electricity, heating, cooling, and energy storage using TRNSYS. *Renewable Energy*, 208:512-537.
- Ghadikolaie, S.S.C., 2021. Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: an overall review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46:10939-10972.
- Joshi, A. S., Dinçer, I., Reddy, B. V., 2009. Performance analysis of photovoltaic systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 1884–1897.
- Midilli, A., Dincer, I., 2007. Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(5):511-524.
- Midilli, A., Dincer, I., 2007. Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(5):511-524.

- Muneeshwaran, M., Sajjad, U., Ahmed, T., Amer, M., Ali, H.M., Wang, C.C., 2020. Performance improvement of photovoltaic modules via temperature homogeneity improvement. *Energy*, 203:117816.
- Mutlubaş, H., Özdemir, Z.Ö., 2023. Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi. *Yekarum e-Dergi*, 8(2):20-31.
- Öztürk, M., Çalışır, O., Genç, G., 2021. Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145:1431-1443.
- Solargis, n.d. Free maps and GIS data. Solargis. (Web sayfası: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data>), (Erişim tarihi: 8 Ekim 2024).
- Sopian, K., Al-Waeli, A.H., Kazem, H.A., 2020. Energy, exergy and efficiency of four photovoltaic thermal collectors with different energy storage material. *Journal of Energy Storage*, 29:101245.
- Tiwari, G.N., Dubey, S., 2010. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. RSC Publishing, 256 s.
- Vorontsov, A.V., Smirniotis, P.G., 2023. Advancements in hydrogen energy research with the assistance of computational chemistry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(40):14978-14999. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.12.356.
- Yılmaz, G. (2013). Şeker pancarı, mısır ve buğdaydan biyoetanol üretim analizi (Doctoral dissertation, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)].

ENERGY AS AN ECONOMIC DRIVER EXPLORING THE IMPACT OF GREEN TECHNOLOGIES ON GLOBAL MARKETS**Nehayatul Najwa**UTN K.H. Abdurrahman Wahid Pekalongan, Indonesia
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-8394-4339>**Hendri Hermawan ADINUGRAHA**UTN K.H. Abdurrahman Wahid Pekalongan, Indonesia
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8394-5776>**Abstract**

This study explores the economic impact of green technologies on global markets, focusing on renewable energy sources and their role in driving sustainable growth. The transition from traditional fossil fuels to renewable energy, such as wind, solar, and hydropower, has far-reaching economic implications, from job creation in the green sector to technological innovations in energy storage and electric vehicles. The research examines case studies of leading countries and regions investing in renewable energy, such as the European Union's Green Deal and China's commitment to carbon neutrality. Findings indicate that while green technologies foster economic opportunities, they also present challenges for fossil fuel-dependent regions, necessitating effective policies for economic diversification and workforce retraining. The role of government policies is highlighted as crucial in facilitating the shift to a green economy. In conclusion, the adoption of green technologies is reshaping global economies, creating a sustainable economic future that balances innovation, policy support, and environmental goals.

Keywords: green technologies, economic growth, renewable energy, job creation, sustainable development, energy transition, global markets, carbon neutrality.

INTRODUCTION

The global energy sector is undergoing a profound transformation as economies increasingly recognize the need to shift towards sustainable and renewable energy sources. This transition, driven by the imperative to combat climate change, is also reshaping the global economic landscape. Green technologies, particularly those related to renewable energy such as solar, wind, and hydropower, are no longer just environmental priorities but are becoming pivotal economic drivers. This shift offers both challenges and opportunities, influencing not only energy production and consumption but also market structures, investments, and global trade patterns.

The economic impact of green technologies can be seen in several key areas. First, renewable energy industries are driving job creation, particularly in manufacturing, installation, and maintenance. According to the International Renewable Energy Agency (IRENA), renewable energy jobs globally reached 12 million in 2020, and this number is projected to increase as the demand for cleaner technologies rises (IRENA, 2021). Second, the integration of green technologies is fostering innovation in related sectors, such as energy storage, electric vehicles, and energy-efficient infrastructure. These innovations stimulate economic growth by attracting private and public investments, which, in turn, fuel the expansion of green industries.

Furthermore, as countries adopt policies to reduce carbon emissions and meet climate goals, the market dynamics are changing. Nations that invest heavily in green technologies are positioning themselves as leaders in the emerging global green economy. The European Union's Green Deal and China's commitment to becoming carbon-neutral by 2060 are prime examples of how policy frameworks can drive economic transformation (European Commission, 2019; Reuters, 2020). However, the transition is not without its challenges. Traditional fossil fuel industries face economic disruption, and regions heavily dependent on these industries must navigate the complexities of economic diversification and worker retraining.

METHOD

This research employs a mixed-methods approach, combining qualitative and quantitative techniques to explore the economic impact of green technologies on global markets. The study begins with a comprehensive literature review of academic articles, market reports, and policy documents from sources such as the International Renewable Energy Agency (IRENA) and the World Bank, which identify key trends and economic outcomes related to renewable energy. In addition, several case studies of countries like the European Union, China, and the United States are analyzed to illustrate the real-world economic transformations resulting from investments in renewable energy, focusing on job creation and market shifts. Finally, an economic analysis is conducted using data on job growth, financial performance of green companies, and the broader impact on GDP, sourced from the International Energy Agency (IEA) and other industry reports. By combining these methods, the research offers a comprehensive examination of how green technologies are reshaping global economies and fostering innovation.

FINDING

The economic implications of green technologies are far-reaching and multifaceted, influencing various sectors globally. One of the most significant impacts is on job creation. The renewable energy sector is a major driver of employment, with solar and wind energy industries seeing substantial growth in job numbers. According to the International Renewable Energy Agency (IRENA), the renewable energy sector employed over 12 million people globally in 2020, and this number is expected to continue rising as countries invest in green infrastructure and technologies. The expansion of green technologies is not only creating direct jobs in energy generation but also in related industries such as electric vehicles (EVs), energy storage, and energy-efficient construction, making renewable energy a key pillar of the modern economy.

Moreover, green technologies are fostering innovation in multiple sectors, with technological advancements contributing to economic growth. One example is the development of energy storage technologies, which are crucial for managing the intermittency of renewable energy sources like wind and solar power. These innovations create new markets and opportunities for investment, which, in turn, stimulate economic activity. The shift to green technologies is also encouraging businesses to adopt more sustainable practices, thus contributing to the green economy's expansion.

However, while the transition to green energy brings economic opportunities, it also presents challenges, particularly for regions dependent on fossil fuel industries. For example, countries that rely heavily on coal or oil for energy generation may face economic disruption as the demand for these fuels decreases. To mitigate these challenges, a transition plan is essential, one that includes retraining programs for workers in traditional energy sectors and support for regions facing economic losses. Economic diversification efforts are key to ensuring that communities dependent on fossil fuels can successfully pivot to new opportunities in the green economy.

Government policies play a crucial role in shaping the success of green technologies in driving economic growth. Policies like the European Union's Green Deal and China's commitment to carbon neutrality by 2060 serve as examples of how public sector leadership can guide the global economy towards a sustainable future. These policies not only drive investments in clean technologies but also create frameworks for international collaboration and trade in renewable energy technologies. For instance, China's aggressive investment in solar energy has positioned it as a global leader in renewable energy production and export, contributing to its growing economic influence in global markets.

CONCLUSION

The integration of green technologies into the global energy landscape has profound economic implications. The shift towards renewable energy sources like wind, solar, and hydropower has not only contributed to environmental sustainability but has also emerged as a major driver of economic growth. Green technologies stimulate job creation across multiple sectors, from energy production to innovation in energy storage and electric vehicles. Furthermore, these technologies encourage investments in sustainable infrastructure and foster market opportunities for new industries. However, the transition is not without challenges, particularly for regions reliant on fossil fuel industries, which may face economic disruption. Mitigating these challenges

requires targeted policies and programs that support economic diversification and workforce retraining. Government initiatives, such as the European Union's Green Deal and China's commitment to carbon neutrality, highlight the importance of policy frameworks in driving the green economy forward. Overall, while the shift to green technologies involves complex transitions, the long-term economic benefits, including sustainable job creation, technological innovation, and economic resilience, present a promising future for a low-carbon global economy. Through careful planning and international collaboration, green technologies will continue to play a pivotal role in shaping global economic dynamics.

REFERENCES

- IRENA (2021). *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021*.
- European Commission (2019). *The European Green Deal*.
- Reuters (2020). *China aims for carbon neutrality by 2060*.

DOES ENERGY UTILIZATION AFFECT THE DEGREE OF STICKY COSTS? AN INVESTIGATION OF ENERGY CHANGES

Sarah Essam Hasan, shubbar Hussein jaafar, Marwah Abdulkareem Mahmood, and Dr.Karrar Abdullellah Azeez*

Collage of Administration and Economics, University of Kufa, P.O 54001.Iraq.

ORCID NO: 0000-0003-2392-5025

Abstract

Despite the increasing attention in the accounting literature about energy utilization, little is known about the mechanisms and effects conditions that explains cost responses to energy utilization changes. Drawing on asymmetric cost theory, we develop a moderation model that explains how and under which conditions perceived energy utilization affects the degree of sticky costs. We test the model by an industry-specific energy study on costs data of industrial companies in Iraq. The findings indicated that perceived energy utilization interacts with energy changes to predict costs stickiness. The study clarifies and advances some of the energy decisions surrounding the professional understanding of energy utilization and has key implications for management practices.

Keywords: energy utilization, sticky costs, energy changes, asymmetry behavior, nonlinear relationship.

INTRODUCTION

The traditional behavior model considers cost behavior to be fixed and variable with activity level, otherwise the magnitude of cost change depends on the change extent in activity level only; this is called mechanical behavior between cost and activity (Nematollahi, 2013). While recent cost accounting research found costs that responds asymmetrically to increases and decrease in activity (Anderson et al., 2003), many studies noted variances between the cost response and activity rise or fall, implying that the cost rise higher with activity increase than they fall with a decrease of this cost behavior called "asymmetry" as sticky, or anti-stick costs (Labro and Soderstrom, 2010). Despite a hurriedly growing stream of researchers seeking to document sticky cost phenomenon, the evidence has generated a validity of the generalizability of asymmetric cost behavior (Anderson and Lanen, 2007, Labro and Soderstrom, 2010). Energy decisions affect cost behavior in two ways; either managers retain unused energy when demand falls or managers match energy with demand but incur greater cost when adding energy than they save when reducing energy (Cannon, 2014, Banker and Byzalov, 2014).

The study uses data collected from the financial and performance statements of Iraqi companies in the period 2006-2015. We conducted several test of stickiness behavior of proposed variables for stationary and cointegration of determinants. Our findings document the response of costs is sticky to energy changes. More central to our analysis, the results find a significant interaction with energy utilization that the degree of stickiness of selling and administrative and total costs arises when energy utilization moderated the relationship between energy change and cost behavior, whereas the degree of stickiness of the manufacturing costs decreases. This evidence explains the effect of energy decisions on asymmetric cost behavior when managers adjust and retain energy for energy utilization. The above results are qualitatively strong for capacities, costs and energy utilization changes relationship.

This research contributes to the literature on sticky costs in three central ways. First, prior research has investigated the impact of internal variables, general and specific characteristics on stickiness cost behavior. These studies are of limited utility to the extend the prediction of integrating among proposed variables for supporting the initial finding of Anderson et al. (2003). We document the relationship between asymmetric cost behavior and energy changes by cointegration tests and the evidence reports a large run linking in the literature of costs asymmetry. Second, in addition to selling, general and administrative costs extensively

examined by previous studies, we extend the analysis to the stickiness behavior of manufacturing and total costs. All these categories of costs are affected to a different extent by managerial behavior.

The paper is organized as follows. Section 2 shows literature review and hypotheses development aimed to position our study in the extant debate on costs stickiness. Section 3 describes the study methodology. Section 4 presents the results. Section 5 discuss our findings.

HYPOTHESES DEVELOPMENT

Anderson et al. (2003) proposed an alternative model that estimates selling, general and administrative (AG&A) costs response to sales volume increase and decrease. Their empirical analysis considered SG&A costs because sales volume drives many of the components in the model proposed. De Medeiros and Costa (2004) tested the relationship between selling and administrative cost and activity volume in Brazilian firms. The results depicted asymmetric behavior of costs increases by 0.59% for 1% sales increase but they decreased only by 0.32% for 1% sales decrease. Argilés and García-Blandón (2009) adopted the ABJ model for examining the sticky cost phenomenon in Japanese firms from 1975 to 2000. The results affirmed that the value change of assets affect cost behavior, especially after the period of asset bubble burst. The degree of asymmetric cost behavior was -0.14% when costs increase by 0.59% for 1% sales increase, and a decrease of 0.45% for a 1% sales decrease. On the other hand, Zanella et al. (2015) tested the changes of SG&A costs to sales revenue in the United Arab Emirates from 2002 to 2011. Their finding explained that AG&A costs for public firms were not sticky and insignificant.

For extending an asymmetric behavior literature, Weidenmier and Subramaniam (2003) added two cost categories: cost of goods sold and total cost as new dependent variables for sticky costs. Their finding argued that sticky cost behavior has large changes as and when activity changes, more than 10% of the cost exhibit asymmetry behavior, whereas when they are less than 10% the cost does not exhibit that behavior. The examining was for an asymmetric behavior of selling and administration, the cost of goods sold and total costs in United States. The results revealed that all of cost categories are sticky, they increase by 0.69%, 1.01%, and 0.92% respectively for a 1% activity increase, but they decrease by 0.57%, 0.94% and 0.84% respectively for 1% activity decrease. Steliaros et al. (2005) used manufacturing costs from the United States, United Kingdom, French, and German companies for examining the sticky cost phenomenon. They indicated that sticky cost in France and Germany is higher than in United States and the United Kingdom. On average, manufacturing costs increased by 0.97% per 1% increase in sales but decreased by 0.91% per 1% decrease in sales.

H1. Change in manufacturing costs to production energy increase is greater than when production energy decrease.

H2. Change in total costs to total energy increase is greater than when total energy decrease.

RESEARCH METHODOLOGY

The data set includes 12 years of monthly data from four sectors in middle and south of Iraq during the period 2010-2022. The final samples consisted of 650 usable observations of each variable.

all changes using the financial and performance statements across periods as indexes of cost, practical energy, actual energy, using OLS estimation for multiple regression models as a nonlinear function of results.

RESULTS

Results of regression analysis show the effect of energy changes on cost behavior (H1a-H1b-H1c). Results show the models are significant as a whole (F-value 43.81, 37.04 for model 1 and 2, p-value <0.01), and reasonably explains the dependent variables (Adj.R² 35 and 40.3 percent for models) as shown in Table 1.

Our results found a sticky behavior between costs and energy changes for all costs categories but in different degrees, the estimates indicated that γ_1 is positive, γ_2 is negative and significant. On average, manufacturing, and total costs are sticky by magnitudes of prior energy increase and decrease.

In model (1), manufacturing costs increase by 0.87 per 0.1 increase in energy (γ_1) and decrease manufacturing costs by 0.41 per 0.1 decrease in energy ($\gamma_1 + \gamma_2$).

While, Second model shows that adjusted R^2 is 40% at $p < 0.001$. Total costs asymmetrically associated with a prior energy change. Total costs increase by 0.93 per 0.1 increase in energy (γ_1), but costs decrease by 0.36 per 0.1 decrease in energy ($\gamma_1 + \gamma_2$). Overall, manufacturing and total costs response to energy changes greater than another costs.

Table 1. regressing test of relationships between costs and energy changes

Variable	Estimate of effect	Std. Error	(t-statistics)
Intercept	3.25	0.43	0.03** (7.57)
Energy changes	0.87	0.26	0.02*** (3.36)
Dummy of energy	(+) -0.46	0.08	0.05** (-5.71)
Adjusted R^2	0.35		
F-value	43.806		
Model 1	0.000		
Intercept	0.1	0.01	0.04** (9.54)
Total energy changes	0.93	0.08	0.01** (12.08)
Dummy of total energy	(+) -0.57	0.1	0.02** (-5.96)
Adjusted R^2	(-)		
F-value	0.40		
Model 2	37.04		
	0.001		

DISCUSSION

This paper shows that all energy is an important factor for asymmetric behavior measuring of costs. The effect varies across different cost categories on the costs behavior because of management practices.

Despite significant studies, research on what happens after energy empirically proposed as independent variable for asymmetry phenomenon. This suggestion focus on the changes of production reflects a similar literature within the energy changes. In addition, interaction terms are used on stickiness costs for explicit asymmetry behavior that classified as prospectors exhibit cost stickiness and classified as defenders exhibit cost anti-stickiness (Weidenmier and Subramaniam, 2003, Ballas et al., 2015, Bugeja et al., 2015).

CONCLUSION

Sticky cost phenomenon is a new research area found by Anderson et al. (2003) still under discussion. Most studies involved their findings used sales revenues change only and ignored a physical output data for two reasons: physical data was not available, and sales revenues typically was more an appropriate empirical measure for activity than physical data (Banker and Byzalov, 2014). The current study analysed the costs categories that respond asymmetrically to energy increases and decrease. Moreover, it also found a significant effects of these categories with moderation role of energy utilization. More specifically, our findings provide an insight as how and under which conditions perceived energy utilization affects the degree of sticky costs in different models. Future study may improve our findings about other factors of sticky behavior and the moderating effects with energy utilization.

The findings of this study revealed predictions explained the influence of managerial expectations to adjust and retain energy that impacts on the degree of sticky behavior between cost and energy change, interaction energy utilization effects with prior energy decrease can converse the asymmetry degree from sticky to anti-sticky for selling and administrative and total costs. While the degree of stickiness behavior of manufacturing

costs is increased. The results of moderation are unique and would provide productive avenues for future studies.

REFERENCES

- ANDERSON, M. C., BANKER, R. D. & JANAKIRAMAN, S. N. 2003. Are selling, general, and administrative costs “sticky”? *Journal of Accounting Research*, 41, 47-63.
- ANDERSON, M. C., LEE, J. H. & MASHRUWALA, R. 2015. Cost Stickiness and Cost Inertia: A Two-Driver Model of Asymmetric Cost Behavior. *Available at SSRN 2599108*.
- ANDERSON, S. W. & LANEN, W. N. 2007. Understanding Cost Management: What Can We Learn from the Evidence on 'Sticky Costs'? *Available at SSRN 975135*.
- ARGILES, J. M. & GARCÍA-BLANDÓN, J. 2009. Cost stickiness revisited: empirical application for farms. *Spanish Journal of Finance and Accounting/Revista Española de Financiación y Contabilidad*, 38, 579-605.
- ASTERIOU, D., KARAGIANNI, S. & SIRIOPOULOS, C. 2011. Testing The Convergence Hypothesis Using Time Series Techniques: The Case Of Greece 1971-1996. *Journal of Applied Business Research (JABR)*, 18.
- BALAKRISHNAN, R., PETERSEN, M. J. & SODERSTROM, N. S. 2004. Does capacity utilization affect the “stickiness” of cost? *Journal of Accounting, Auditing & Finance*, 19, 283-300.
- BALLAS, A., NAOUM, V.-C. & VLISMAS, O. 2015. Strategy, Managerial Ability and Sticky Behavior of Selling, General and Administrative Expenses. *General and Administrative Expenses (September 8, 2015)*.
- BANKER, R. D. & BYZALOV, D. 2014. Asymmetric cost behavior. *Journal of Management Accounting Research*, 26, 43-79.
- BANKER, R. D., BYZALOV, D., CIFTCI, M. & MASHRUWALA, R. 2014. The moderating effect of prior sales changes on asymmetric cost behavior. *Journal of Management Accounting Research*, 26, 221-242.
- BRADBURY, M. E. & SCOTT, T. 2014. Do Managers Understand Asymmetric Cost Behavior. *Research Paper*.
- BUGEJA, M., LU, M. & SHAN, Y. 2015. Cost Stickiness in Australia: Characteristics and Determinants. *Australian Accounting Review*, 25, 248-261.
- CANNON, J. N. 2014. Determinants of “sticky costs”: An analysis of cost behavior using United States air transportation industry data. *The Accounting Review*, 89, 1645-1672.
- CASKEY, K. R. 2015. Competitive strategies for small manufacturers in high labor cost countries: Boutique ski manufacturers in the US. *Competitiveness Review*, 25, 25-49.
- CHEN, C. X., GORES, T. & NASEV, J. 2013. Managerial overconfidence and cost stickiness. *Available at SSRN 2208622*.
- CHEN, J. V., KAMA, I. & LEHAVY, R. 2015. Management Expectations and Asymmetric Cost Behavior. *Available at SSRN*.
- COHEN, S., KARATZIMAS, S. & NAOUM, V.-C. 2015. The Sticky Cost Phenomenon at the Local Government Level: Empirical Evidence from Greece. *Available at SSRN 2575530*.
- COOPER, R. & KAPLAN, R. S. 1992. Activity-based systems: Measuring the costs of resource usage. *Accounting Horizons*, 6, 1.
- DALLA VIA, N. & PEREGO, P. 2014. Sticky cost behaviour: evidence from small and medium sized companies. *Accounting & Finance*, 54, 753-778.
- DE MEDEIROS, O. R. & COSTA, P. D. S. 2004. Cost stickiness in Brazilian firms. *Available at SSRN 632365*.
- GU, Z., TANG, S. & WU, D. 2015. The political economy of labor cost behavior: Evidence from China. *Available at SSRN 2786533*.
- IBRAHIM, A. E. A. 2015. Economic growth and cost stickiness: evidence from Egypt. *Journal of Financial Reporting and Accounting*, 13, 119-140.

- KALLAPUR, S. & ELDENBURG, L. 2005. Uncertainty, real options, and cost behavior: evidence from Washington State Hospitals. *Journal of Accounting Research*, 43, 735-752.
- KAMA, I. & WEISS, D. 2010. *Do managers' deliberate decisions induce sticky costs?*, Tel Aviv University, Faculty of Management, The Leon Recanati Graduate School of Business Administration.
- KAMA, I. & WEISS, D. 2013. Do earnings targets and managerial incentives affect sticky costs? *Journal of Accounting Research*, 51, 201-224.
- KITCHING, K. A., MASHRUWALA, R. & PEVZNER, M. 2016. Culture and Cost Stickiness: A Cross-Country Study. *International Journal of Accounting, Forthcoming*.
- LABRO, E. & SODERSTROM, N. 2010. Cost structure and sticky costs.
- MACKINNON, J. G. 1996. Numerical distribution functions for unit root and cointegration tests. *Journal of applied econometrics*, 601-618.
- MALIK, M. 2012. A Review and Synthesis of 'Cost Stickiness' Literature. *Available at SSRN 2276760*.
- NEMATOLLAHI, M. 2013. Investigation the relation between Costs and Revenues in Iranian Firms.
- NYAOGA, R. B., WANG, M. & MAGUTU, P. O. 2015. Does Capacity Utilization Mediate the Relationship between Operations Constraint Management and Value Chain Performance of Tea Processing Firms? Evidence from Kenya. *International Strategic Management Review*, 3, 81-95.
- ÖSTERHOLM, P. & HJALMARSSON, E. 2007. *Testing for cointegration using the Johansen methodology when variables are near-integrated*, International Monetary Fund.
- SADEGHI, M., HAJIAGHA, S. H. R. & HASHEMI, S. S. 2013. A fuzzy grey goal programming approach for aggregate production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1715-1727.
- SAROKOLAEI, M. A., SAVIZ, M., MORADLOO, M. F. & DAHAJ, N. S. 2013. Time Driven Activity based Costing by Using Fuzzy Logics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 75, 338-345.
- SHI, S., YIN, Y. & GUO, X. 2016. Optimal choice of capacity, toll and government guarantee for build-operate-transfer roads under asymmetric cost information. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85, 56-69.
- STELIAROS, M. E., THOMAS, D. C. & CALLEJA, K. 2005. Further Evidence on the Sticky Behaviour of Costs. *Cass Business School Research Paper*.
- TAGHAVI, M. & HUANG, K. 2014. Stochastic capacity expansion with multiple sources of capacity. *Operations Research Letters*, 42, 263-267.
- TSAI, W.-H., CHEN, H.-C., LEU, J.-D., CHANG, Y.-C. & LIN, T. W. 2013. A product-mix decision model using green manufacturing technologies under activity-based costing. *Journal of cleaner production*, 57, 178-187.
- VAN MIEGHEM, J. A. 2003. Commissioned paper: Capacity management, investment, and hedging: Review and recent developments. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5, 269-302.
- WEIDENMIER, M. L. & SUBRAMANIAM, C. 2003. Additional evidence on the sticky behavior of costs.
- XUE, S. & HONG, Y. 2015. Earnings management, corporate governance and expense stickiness. *China Journal of Accounting Research*.
- YASUKATA, K. 2011. Are 'Sticky Costs' the Result of Deliberate Decision of Managers? *Available at SSRN 1444746*.
- ZANELLA, F., OYELERE, P. & HOSSAIN, S. 2015. Are costs really sticky? Evidence from publicly listed companies in the UAE. *Applied Economics*, 47, 6519-6528.
- ZHANG, R., ZHANG, L., XIAO, Y. & KAKU, I. 2012. The activity-based aggregate production planning with capacity expansion in manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 491-503.

EXPLORING SUSTAINABLE ENERGY SOLUTION BEYOND FOSSIL FUELS: MITIGATING ENERGY CRISIS IN NIGERIA**Nwafor, Lilian C. (MBA)**

People's Comprehensive Academy Nyanya /Mararaba, Abuja, FCT

Kanu, Abednego C. (Ph.D)

Department of Science Education Faculty of Education University of Ilorin, Ilorin, Nigeria

Yusuf, Aishat A.

Department of Science Education Faculty of Education University of Ilorin, Ilorin, Nigeria

Abstract

Nigeria stands at a critical point in its developmental journey, grappling with a persistent energy crisis that hampers socio-economic growth and environmental sustainability despite being rich in natural resources. Exploring alternatives beyond fossil fuels is critical for combating the effects of climate change and lowering reliance on limited resources. The paper explores the implications and policy considerations of adopting alternative energy technologies, emphasizing the need for a balanced and diversified approach to energy transition. A mixed method approach was used to highlight the importance of technological innovation, regulatory frameworks and investment incentives in overcoming barriers to alternative energy solutions and fostering energy system transformation. A sample size of 104 was selected from a population of professionals in the energy and mining sectors using the purposive sampling technique. A 24-item questionnaire including the demographic data was used as instrument. Multinomial Logistic Regression (MLR) model with R was applied to make prediction on respondents' choices about the most promising renewable energy source for Nigeria within solar, wind and biomass categories. Accuracy level was 93% and 69% for training and testing predictions respectively. Through the thematic analysis done with QDA miner application, results obtained show that government policies and expected economic benefits are the main factors affecting renewable energy adaptability in Nigeria. Shifting towards renewable energy helps mitigate these environmental impacts, reducing carbon emissions and contributing to a cleaner and more sustainable future.

Key words: Exploring sustainable alternatives, Energy crisis, Renewable energy resources, Data-driven approach

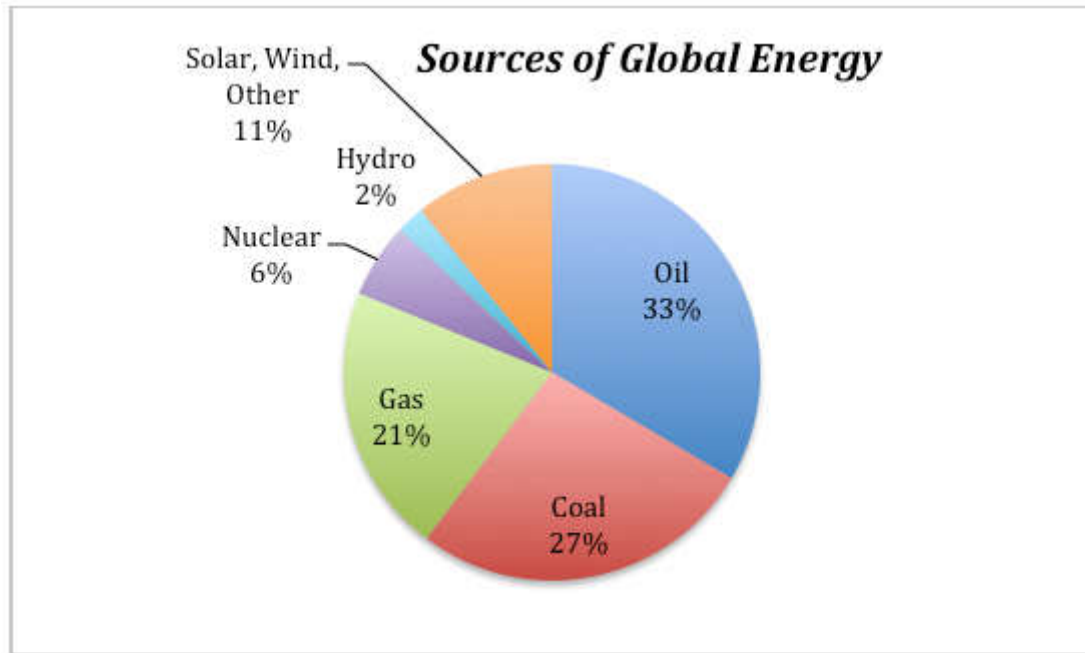
Introduction

As it is the case with most nations across the globe, Nigeria must strive to address the expanding energy concerns bedeviling her economy; while also working to reduce the negative ecological impact of fossil fuel-oriented system. In a world that is moving towards low carbon emission, it has become an imperative for Nigeria and other Sub-Saharan African nations to seek sustainable energy solutions outside of fossil fuels (ThisDay, 2022). The study is focused on exploring a spectrum of alternative energy sources which includes solar, wind, hydro and biomass as it pertains to Nigeria. It has become necessary to analyze the technical, economic and policy contexts upon which solutions could be sought to ensure a sustainable energy future for the nation. Over the last few decades of consistent refining and draining of the nation's finite fossil fuel reserves with the attendant environmental concerns that accompany it, the gap between demand and supply of energy has progressively widened leading to an incontestable and threatening energy crisis. The need for nations to transit towards sustainable energy sources has emerged and become undeniable for livelihood (Ang, et al, 2022). Nigeria is a country endowed with abundant natural resources, yet struggling with energy insecurity and environmental challenges. Africa's largest crude oil producer is facing a dual challenge of leveraging its fossil fuel resources for economic growth at the same time seeking pathways to diversify its energy mix sustainably. The adverse impacts of fossil fuel extraction and consumption are evident in persistent environmental pollution, deforestation and greenhouse gas emission, exacerbating global climate change and local health hazards (Jeffang, et al, 2024).

This study aimed at examining various energy alternatives suitable for Nigeria's unique geographical and socio-economic contexts. Renewable energy resources such as solar, wind, hydroelectric, geothermal and biomass hold significant promise. Considering Nigeria's abundant solar radiation, wind availability in desert and coastal regions, large water bodies (in form of lakes, rivers and ocean), vast biomass resources and geothermal energy potential, mitigating the energy crisis is feasible (NOUN, 2022). Furthermore, exploring energy conservation and efficiency measures, practicing energy mix and promoting decentralized energy systems could enhance energy access, particularly in rural and under-served areas. Beyond technological feasibility, the study explored the viability of policy frameworks, institutional capacities and financial mechanisms being adopted to support sustainable energy solutions. Government initiatives, international collaboration and private sector investments are critical in facilitating a smooth transition towards a more sustainable energy future for Nigeria (Agbo, et al, 2021).

Studies have been carried out by scholars of different climes on the field of energy and with the consistent findings that energy demand and supply play significant role in the functioning of nations' economy and societal survival (Ambali, et al, 2024). The bulk of global energy demand in contemporary times is still sourced from non-renewable fossil fuels like crude oil, coal and natural gas as could be seen in the pie chart below. These have long served as the predominant source of energy worldwide due to the high energy density and affordability. However, the combustion of these fossil fuels has culminated in emissions that have caused escalating global annual temperatures, an increase in extreme weather conditions, and a myriad of other environmental changes with dire consequences. Other risks associated with non-renewable energy resources include: price volatility, supply disruption, security risks, energy security and economic vulnerability. Whenever discussions about the pollution caused by traditional energy sources arise, there is often a tilt of the tone towards non-conventional energy sources.

Accelerating a nation's transition to clean energy has been found to be the pathway to a healthy and habitable planet of contemporary times; and for generations to come (Biroi & Ruto, 2023). Renewable energy is considered cheaper and healthier. Nigeria, for instance is in dire need to diversify energy sources, invest in renewable energy, develop strategic reserves, and promote energy efficiency and self-sufficiency. While acknowledging the environmental benefits of non-conventional energy sources, there are limitations and intermittency associated with some renewables such as solar and wind. In the case of solar, intermittent power generation due to day-night cycles and weather conditions (cloud cover, seasons) are key challenge (SolarCreed, 2024). Wind is limited due to variable (non-uniformity of) wind speeds and directions, challenge of getting suitable wind vane for an area and noise pollution from turbines. This gives rise to the need for energy storage solutions (for example, through the use of batteries, etc), grid infrastructure upgrades, diversified renewable energy portfolios, advanced technologies to improve efficiency and reliability (Bice, 2010). Generally, in Nigeria, barriers to adopting renewable energy solutions are social and cultural in perspective. These obstacles include: high initial cost, reliance on fossil fuel, lack of awareness and education, policy and regulatory issues, cultural preferences and practices, infrastructure challenges. Addressing these social and cultural barriers is crucial for a successful transition to renewable energy solution in Nigeria. To analyze the adequacy of the current policies and the need for increased investment in research, development and infrastructure for renewable energy, the Nigerian Renewable Energy master plan of 2018 has outlined strategies for achieving the targets.



Contributions to global energy from different sources shows that fossil fuels account for 81%. Data from International Energy Agency (iea.org)

Courtesy: David Bice

Nigeria is a home to over 100 million people without access to stable electricity supply and insufficient fuel to power automobiles and industrial machines, significantly hindering socio-economic development (Agbo, et al, 2021). The nation, despite the vast renewable energy potentials is grappling with underfunding and insufficient investment in renewable energy infrastructure. The existing energy infrastructure is inadequate and characterized by low reliability, corruption and high costs which in turn is worsening energy poverty. The challenge is also limiting access to modern energy services necessary for achieving sustainable development goals. Current investments fall short of what is required to meet growing energy demands and expand access. In addition, lack of effective governance and policy framework is hampering the development of renewable energy projects. Issues bothering on regulatory uncertainty, precarious tariff structures, lack of local manpower (expertise) all put together are hindering investment and implementation of sustainable energy solutions which formed the thrust of this study.

Purpose of the Study

The general purpose of the study is to explore sustainable energy solutions beyond fossil fuels as a panacea to Nigeria energy crisis. Specifically, the objectives of the study aimed at:

1. Analyzing the existing energy consumption patterns in Nigeria, focusing on the dominance of fossil fuels and its implications for sustainability.
2. Investigating alternative potential renewable energy sources suitable for Nigeria's climate and geographical conditions, such as solar, wind, wind, hydro and biomass.
3. Examining the current policies and regulatory frameworks governing energy production and consumption in Nigeria, assessing their effectiveness in promoting sustainable energy solutions.
4. Evaluating the technological feasibility and infrastructure requirements for implementing alternative energy solutions beyond fossil fuels in Nigeria considering factors like cost-effective, scalability and reliability.
5. Investigating the potential economic and social impacts of transiting to renewable energy solutions in Nigeria, including job creation, energy security, environmental benefits and community engagement.

Research Questions

The research questions guiding this inquiry were designed to explore the following:

1. What are the existing energy consumption patterns in Nigeria with emphasis on fossil fuel and its implications for sustainability?
2. What alternative potential renewable energy sources are suitable for Nigeria's climate and geographical conditions?
3. How effective are the current policies and regulatory frameworks in promoting sustainable energy solutions in Nigeria?
4. What are the technological feasibility and infrastructure requirements for implementing renewable energy solutions in Nigeria and how do these factors impact their adopted scalability?
5. What are the potential economic and social impacts of transiting to renewable energy solutions in Nigeria?

Methodology

Mixed methods were deployed for the study involving quantitative and qualitative research type. Thematic analysis was used to generate the qualitative data. The dependent variable (Renewable Energy Source) in this paper consists of three categories (solar, wind and biomass), and it is believed to be nominal (unordered), therefore it is modeled by the multinomial logistic regression (MLR). Since the MLR works by choosing one outcome as the base (reference) category for the other categories, hence the solar is considered as reference group (solar category), because it is the most frequent outcome of the most promising renewable energy source in Nigeria and the other outcome levels (wind and biomass) are estimated relative. There are few applications of MLR in renewable energy modeling. During the in-person interview, the item eliciting information on 'What is the main purpose of your energy use?' gave a p-value of 0.0459061422 as reflected in **Table 1**.

Multinomial logistic regression (MLR) models the choice of the respondents on the most promising renewal energy categories in Nigeria with the independent variables. The categories of the dependent variable (i.e. solar, wind and biomass) are considered nominal (i.e. cannot be ordered in any logical way). Regression coefficients was used to interpret the result of the predictions. The use of the classification table as a measure of accuracy level to determine the percent of corrected prediction cases. Accuracy and sensitivity model assessed whether or not the observed incidents match the predicted incidents. Based on the result of the research, it can be taken that one independent variable that has a significant effect is RQ₂ (What alternative potential renewable energy sources are suitable for Nigeria's climate and geographical conditions?).

Three (3) professionals in the energy and mining sector were interviewed for qualitative analysis. The interview was done in person and audio responses transcribed. A total of 10 questions were asked, QDA Miner was used for the thematic analysis. The respondents have good understanding of the problem Nigeria has been facing relating to fossil fuel and renewable energy participated. The inclusion criteria were for participants to be above 25 years, be in the energy sector with good understanding of what the profession is all about. Since it was targeted at specific individuals, the participants were pre-informed before meeting them at their respective locations. Google "audio to text" app was used to generate and transcribe oral answers by the interviewees. 10 Open –ended questions were validated and used for the structured interview. The order of questioning was determined by the flow of each response. Each interview usually began with an introduction, stating name, age, area of specialization and sector of duty. QDA Miner Lite was used to code the responses, generate key words and analyzed.

A well detailed approach was used to get familiar and understand the transcript data through repeated reading and little reflection based on experiences about Nigeria and her power sector. Once transcripts were read and coded, the researchers met to discuss the open coding and determine the thematic codes to describe agreed groups of categories and sub-categories. QDA Miner Lite was used to apply this agreed coding. This process of selective coding as displayed in **Table 4** was used to generate related themes to explain the factors affecting the energy sector and need to consider adopting renewable energy in Nigeria.

MLR EQUATION:

Using first and second coefficient for model, the equation was expressed as follows:

Equation 1: The log-odds of a respondent choosing wind as the most promising source of renewable energy instead of solar which means that RQ4, RQ5, RQ6, RQ10, RQ13, RQ16, RQ17, RQ18 have negative impact on that.

$$\ln [p (\text{RE_SOURCE} =2) / P((\text{RE_SOURCE}=1))] = 15.026681 + (2.652312* \text{RQ1}) (61.31388* \text{RQ3}) + (-20.25092* \text{RQ4}) + (-6.283335* \text{RQ5}) + (-23.70335 * \text{RQ6}) + (1.728521* \text{RQ7}) + (20.10080* \text{RQ9}) + (-22.10813 * \text{RQ10}) + (3.601935 * \text{RQ11}) + (38.44986 * \text{RQ12}) + (-7.150362 * \text{RQ13}) + (3.933984* \text{RQ14}) + (26.150187 * \text{RQ15}) + (-26.035273* \text{RQ16}) + (-22.117557 * \text{RQ17}) + (-28.03821* \text{RQ18}) + (25.028442* \text{RQ19}) + (3.169123* \text{RQ20})$$

Equation 2: The probability that the most promising source of power is Biomass rather than solar.RQ4, RQ7, RQ9, RQ11, RQ12, RQ16, RQ17, RQ18 have negative impacted the choices made.

Table 2	Prediction And Model Assessment							
	Confusion Matrix For Training Data				Confusion Matrix For Testing Data			
	Actual Value				Actual Value			
Predicted	1	2	3	Predicted	1	2	3	
1	47	3	0	1	37	4	0	
2	1	4	0	2	1	0	0	
3	0	0	4	3	1	0	2	
Accuracy	0.9322034 (93%)			Accuracy	0.8666667 (87%)			
Misclassification	0.06779661 (7%)			Misclassification	0.1333333 (13%)			

$$\ln [p (\text{RE_SOURCE} =2) / P((\text{RE_SOURCE}=1))] = 8.302773+ (5.585521* \text{RQ1}) (18.06833* \text{RQ3}) + (-17.80637* \text{RQ4}) + (32.018045 * \text{RQ5}) + (22.23349* \text{RQ6}) + (-32.253256* \text{RQ7}) + (-34.21875 * \text{RQ9}) + (16.69651* \text{RQ10}) + (-21.105180* \text{RQ11}) + (-25.94345* \text{RQ12}) + (42.961431* \text{RQ13}) + (1.216970 * \text{RQ14}) + (4.784278 * \text{RQ15}) + (-1.147695 * \text{RQ16}) + (-1.913866* \text{RQ17}) + (-39.60480 * \text{RQ18}) + (5.758787* \text{RQ19}) + (12.179580* \text{RQ20})$$

Table 1		P-Value																
Inte rce pt	RQ 1	RQ3	RQ 4	RQ 5	R Q 6	RQ7	RQ 9	RQ1 0	RQ 11	R Q 1 2	R Q 1 3	RQ 14	RQ 15	RQ 16	RQ 17	RQ18	RQ1 9	RQ2 0
0.88	0.98	0.0003	0.000	0.976	0	0.969	1.64	0.000	0.41	0.65	0.42	0.16	0.00	0.00	5.13	0.000	0.00	0.33
0.236	0.84	0.045	0.108	0.022	0	0.222	1.096	0.552	0.000	0.000	0.000	0.86	0.86		9.56	0.230	0.86	0.68

The Classification Table

The classification table is used to assess the goodness of fit of the MLR model.

Table 3 shows the observed values for the dependent outcomes and the predicted values (47) are cross classified to indicate the correct percent of predicted resources. In the training data, 47 respondents predicted that solar is the most promising source of renewable energy which in reality shows that solar is the most preferable source of renewable energy by the respondents. 4 respondents predicted wind to be the most promising while 4 respondents predicted biomass. The prediction accuracy rate is 93% while misclassification is about 7%. The confusion matrix for the testing data shows that predicted versus actual

value for solar being the most promising renewable energy source is 29, accuracy rate of the prediction is 69% and misclassification is 31%.

Table 3 below displays the overview of training and testing model. Measure of goodness of fit to determine the percent of corrected prediction values.

Table 3 Accuracy and Sensitivity Table For Training And Testing Data						
Training Data			Testing Data			
1	2	3	1	2	3	
48	7	4	39	4	2	
0.81355932 (81%) Solar	0.11864407 (12%) Wind	0.06779661 (7%) Biomass	0.86666667 (87%) Solar	0.08888889 (9%) Wind	0.04444444 (4%) Biomass	
Matrix			Matrix			
0.97916667	0.08333333	0.02083333	0.9487179	0.1025641	0.0000000	
0.14285714	0.42857143	0.00000000	0.2500000	0.0000000	0.00000000	
0.00000000	0.00000000	0.75000000	0.5000000	0.00000000	1.0000000	

Table 4.	Word Cloud of the most frequently used keywords

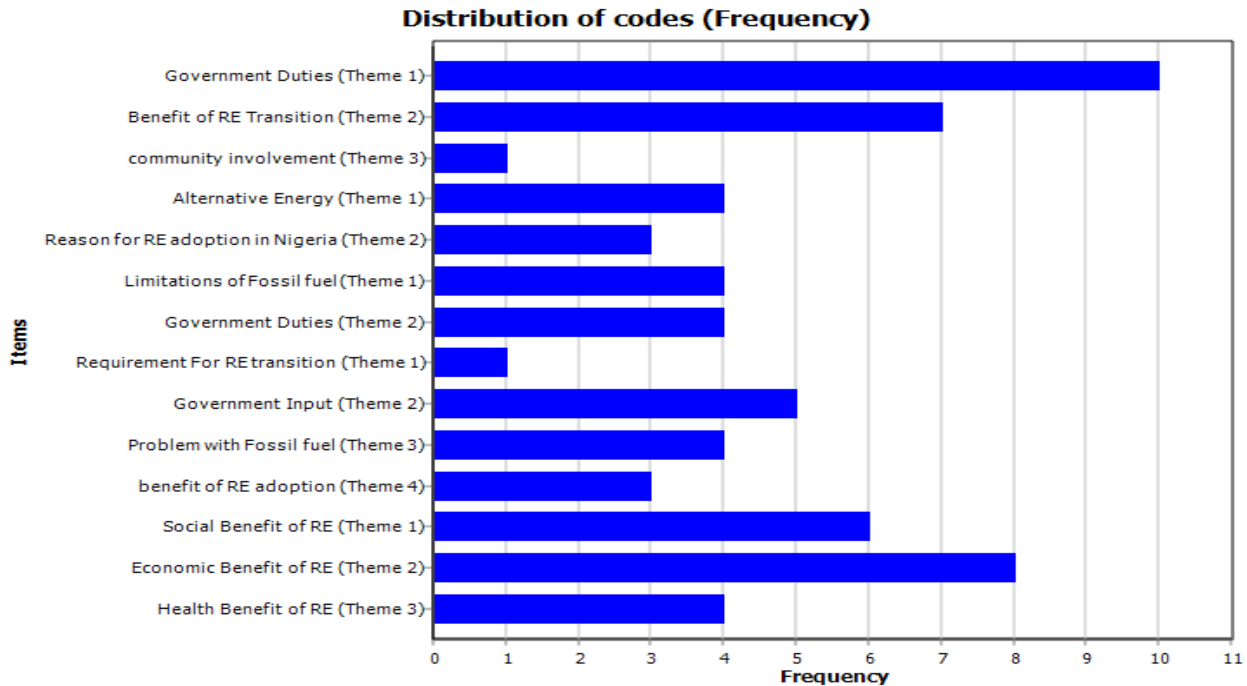
Results

Sample response of 3 persons (2 males and a female) with age 38, 45 and 50 years with varying experiences in the energy and mining sector: the interview was conducted face-to-face in Abuja, Nigeria. It was ensured that the participants have lived in Nigeria, have worked in the mining sector with good understanding of the Nigeria past policies concerning the sector as seen on table 5. The chart below shows the most frequently used key words and how they affect the transition of renewable energy. Government duties, economic benefits, alternative energy are some of the key factors that are affecting the adoption of renewable energy in Nigeria.

Each of the 5 research questions has two to four main linked themes identified from the analysis. These are discussed below:

1. **RQ1:** Three themes were coined from the first research question. First one, Government Duties, which highlighted what are required of the government of Nigeria in terms of policies and support to encourage investment or adoption of renewable energy in the nation. Theme two, stated how Nigeria will benefit from renewable energy such as infrastructural development and economic boost. Theme 3 suggested how to carry Nigerians along like creating awareness for all to understand the benefit of transiting to renewable energy.

2. **RQ2:** This was summarized into 2 themes which is alternative energy and reasons for renewable energy option. Theme one suggested renewable energies Nigeria can explore such as solar, wind, hydroelectric and mini grid, while theme two highlighted the reason renewable energy should be adopted. There is good climatic condition, geographical and geological fitness and can be set up locally without hitches.



3. **RQ3:** The two themes from research question 3 include the need to manage and regulate the non-renewable resources regarding the harmful emissions to the environment, the effectiveness of regulatory framework and government responsibilities in getting suitable energy system for Nigeria. Fossil fuel causes high CO₂ and CO emissions, energy storage limitation and dangerous environmental impacts. Government is responsible to make policies that will suit Nigeria and curb the harmful effect of fossil fuel as well as create awareness and educate the public about a more suitable energy alternative.
4. **RQ4:** Technological requirement for renewable energy transition, government input, problem with fossil fuel and benefit of renewable energy adoption are the four themes developed as linked to research question 4. There is need for setting up solar photovoltaic cells (PVCs) and wind farm, getting a reliable grid, encouraging energy investors and introducing innovative technology. There is the need for Nigeria government to make policies that will encourage investment and adoption of renewable energy technologies, even creating awareness. Theme 3 highlighted the problem associated with fossil fuel. Finally, the benefits of renewable energy were stated such as cheaper power, low monthly cost etc.
5. **RQ5:** in research question 5, three themes were identified: social benefits of renewable energy, economic benefit of renewable energy and health benefit of renewable energy. Socially, job creation, cleaner air, behavioral change, public trust and engagement are likely benefits. Economically, revenue generation, industrial growth, stable power might likely be achieved. Lastly, healthier living will be achieved from renewable energy adoption.

Discussion of Findings

The thematic analysis of the interviews conducted reveals several key themes related to energy consumption patterns, renewable energy adoption, policy frameworks, technological feasibility, and the socio-economic impacts of transiting to sustainable energy solutions in Nigeria. These themes are critical in understanding the current landscape, challenges, opportunities and future potential of Nigeria's energy sector. The themes identified provide valuable insights into the current energy consumption patterns, the potential for renewable energy adoption, the role of policy and regulatory frameworks, the technological and economic feasibility, and the broader socio-economic impacts of transiting to sustainable energy solutions.

From all indications, renewable energy is the right energy source for Nigeria, considering the problems associated with Nigerian Electricity grid, the available natural resources at her disposal. Government should make flexible policies that will enable local investor, invest in research on alternative energy and subsidize or provide incentives to encourage the adoption of renewable energy.

Solar, wind and biomass energy options hold significant potential and could address various energy challenges while offering environmental benefits. Nigeria has abundant sunshine throughout the year, making solar energy a viable option. The finding tallies with the study of Agbo et al (2021) who carried a review on renewable-related projects and affirmed that Nigeria's electricity generation from solar radiation holds higher prospects of being a realizable alternative energy resources when compared to other renewables. Solar power can be harnessed through photovoltaic (PV) panels for electricity generation, particularly in rural and off-grid areas where access to the national grid is limited. This could help bridge the energy access gap and reduce dependency on fossil fuels. Coastal regions and northern parts of Nigeria have considerable wind energy potential. Wind farms can be established in these areas to generate electricity. Wind power is renewable and can contribute to a more diversified energy mix and enhanced security. Biomass resources such as agricultural residues, organic waste and forest residues can be utilized for energy production through processes like biofuels and biogas. This not only provides a renewable energy source but also helps in waste management and supports rural livelihood potential effects. Potential benefits of adopting these energies are rural development, environmental protection, infrastructural developments and energy security. However, there are challenges with costs and frameworks that needs to be addressed to fully harness the potential of these renewable energy sources in Nigeria. In terms of the limitations to renewable energy alternatives, finding of this study is in tandem with that of Ambali, et al, (2024) who appreciated the great benefits in renewable energy alternatives but have identified infrastructural gap such as insufficient battery storage causing intermittent energy reserve and limited grid reach to remote areas as major constraints. Also pointed out by Ambali, et al (2024) include the barriers of high initial costs of installation, policy and institutional challenges particularly the weak regulatory framework, all were observed from the thematic analysis carried out in this study.

Ang, et al (2022) in consonance with the submission of this study showed that solar, hydropower and wind energy generation manifest significant increasing trend in terms of renewable energy capacity; while bio-energy and geothermal energy have insignificant contribution to increasing renewable energy capacity. Solar energy being seen as the most promising renewable energy as conducted as corroborated by SolarCreed (2024) would have great impact in Nigeria in terms of economic importance and environmental sustainability. PHCN being the most primary source of energy means there is need for public awareness about alternative energy. Carbon emissions have caused a lot of damages to the environment and health of Nigerians. Government policies are not favorable to the adoption of renewable energy in Nigeria.

Limitation

Although the study provided valuable insights into renewable energy alternatives as being veritable way out of the energy crisis faced by Nigeria, the scope of this research was constrained by limited access to comprehensive opinions of energy professionals operating in the nation. Additionally, this study focused on policy and economic aspects, potentially overlooking local community impacts that could influence the adoption of sustainable energy solutions. The rapidly evolving nature of energy technology and policy means that findings may become outdated as new developments occur. Future research should address these gaps by incorporating longitudinal studies, detailed socio-economic analysis and assessments of emerging technologies and policies to provide a more holistic understanding of sustainable energy transitions in Nigeria.

Recommendations

Meaningful progress could be made towards a more sustainable and resilient energy future, aligning with global trends and addressing local energy needs by adopting the following recommendations:

- a. Upgrade the national grid to accommodate decentralized renewable sources.
- b. Promote local research and development (R&D) initiatives focused on renewable energy technologies suitable for Nigeria's unique environmental and economic climate. Continuous investigation will help refine strategies and ensure that sustainable energy solutions are both effective and equitable.

- c. Improve data collection and reporting mechanisms related to renewable energy performance and impacts.
- d. Stakeholders should engage in global initiatives that focus on renewable energy resources by sharing experience and learning from global best practices that could influence Nigeria's approach to sustainable energy solutions in a positive way.
- e. Strategic investments in renewable energy infrastructure, education and local capacity will create favorable environment for renewable energy long-term sustainability.
- f. Overall, governments, her agencies and the private sector actors need to work in synergy to bridge the gap between policy targets and reality; improve technology efficiency and cost-effectiveness, develop local innovation capacity and grid stability and increase investment in renewable energy alternatives.

References

- Agbo, E. P., Edet, C. O., Magu, T. O., Njok, A. O., Ekpo, C. M., & Louis, H. (2021). *Solar Energy: A Panacea for the Electricity Generation Crisis in Nigeria*. ncbi.nlm.nih.gov
- Ambali, A., Dugbazah, J., Glover, B., Mbuli, B., Kungade, C. & Shikwambane, N. (2024). *Enhancing Access to Electricity through Renewable Energy*. AUDA-NEPAD African Union Development Agency. <https://www.nepad.org>
- Ang, T., Salem, M., Kamarol, M., Shekhar Das, H., Nazari, M. A., & Prabaharan, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 10093. Published by ELSEVIER: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Bice, D. (2010). Global energy consumption (Earth 104). *International Energy Agency (iea.org)*. <https://www.e-education.psu.edu>
- Birol, F. & Ruto, W. (2023). A new energy pact for Africa. Project Syndicate. www.project.syndicate.org
- Jeffang, K., Nyakanyanga, S. & Mboyah, D. (2024). Can renewables ease Africa's energy crisis? *Dialogue Earth – Energy*. <https://dialogue.earth>
- NOUN/ National Open University of Nigeria (2022). Categorizing energy sources into non-renewable and renewable resources, Unit 5, Module 2, *SED 224 Course Resources: Energy and Matter 1*.
- SolarCreed (2024). Solar energy as a solution to South Africa's electricity crisis. *Sales SolarCreed*. <https://solarcreed.com>
- ThisDay (2022). Renewable energy as viable solution to Nigeria's electricity crisis. *ThisDay Live*. <https://www.thisdaylive.com>
- United Nations Development Programme/ UNDP (2024). Nigeria climate change profile. UN Climate Change. (n.d.). What is renewable energy? https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewableenergy?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwvvmzBhA2EiwAtHVrb8JoE1c6T2fxIXod75344AZ3_nrTKV3_dpEPhaJx4UaWlXp-D0-3iBoC-wlQAvD_BwE

NAVIGATING THE ENERGY TRANSITION: INNOVATIONS, CHALLENGES, AND PATHWAYS TO SUSTAINABILITY**Sanjana Sajan Gharat**Student, VIT Bhopal University, School of Computer Science and Engineering, Madhya Pradesh, India
(Responsible Author) ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2198-1911>**ABSTRACT**

The global energy industry has shifted due to severe resource depletion, climate change, and environmental degradation together with the growing demand for energy in a sustainable manner. This study discusses how energy systems have changed over time, giving way from the dominance of fossil fuels- coal, oil, and natural gas- to cleaner alternatives such as hydropower, geothermal, wind, and solar power. For potential changes in the energy outlook, scientists are therefore also studying some of the newer innovation areas, such as hydrogen fuel cells, carbon capture, utilization, and storage (CCUS), enhanced energy storage, and biofuel breakthroughs. This transition is centered around the development of smart grids and digital infrastructure- increasing efficient energy distribution and incorporation of renewable resources. Urbanization and increased energy needs, especially with energy efficiency answers such as green buildings, district energy systems, and carbon-neutral urban planning are also considered. Finally, this report explores the interaction of energy policies, finance, and justice in addressing the imperfections of the status quo and the inequalities in energy access for differentiated countries and populations worldwide.

The paper further discusses the environmental considerations of energy systems and pollution caused by air emissions and greenhouses as well as life cycle assessments for energy projects. It underlines the principles of sustainable environmental practices and emerging technologies that impact the adverse effects of environment. Materials science innovations: nanotechnology, optics, and photonics contribute to increasing energy efficiency and reliability. By addressing the geopolitical, economic, and technical dimensions of energy, this paper offers a comprehensive overview of the challenges and opportunities in the sector. With such interdisciplinary insights, it ought to inspire collaboration and innovation for a resilient and sustainable energy future that can balance technological advancement with environmental stewardship and societal needs.

Keywords: Energy System, Hydrogen fuel cell, CCUS, Urbanization, Energy Policies, Global Policies.

Introduction

The world energy industry is now at such a crossroads, that they are destined to confront the twin problem of the diminution of fossil fuel sources and environmental degradation as well while the demand for energy just continues to rise. The world has experienced industrial growth thanks to fossil fuels in coal, oil, and natural gas, but the costs have been ecological: damage that ranges from climate change to air pollution. It is, therefore important to shift the focus to the need for developing cleaner energy systems. Important developments have been made in using renewable sources, of which the major ones are: solar, wind, geothermal, and hydropower- all emit much less carbon and are sustainable. Such new technologies include hydrogen fuel cells, CCUS, advanced energy storage, and many more innovations to advance the power generation and transmission efficiency and reliability. However, rapid urbanization and population growth add to the complexity of the transition. Energy consumption is the highest in cities; it requires smarter energy grids, energy-efficient buildings, and carbon-neutral city designs. The new revolution in energy production, distribution, and consumption are the digital infrastructures and smart technologies.

The socio-economic elements are investment, legislation, and fair energy access; thus, bridging the gap in terms of availability and affordability of energy is considered the most important aspect. The present research investigates interactions among technological, policy-led, and environmental drivers defining the future of energy while trying to balance technological advance with environmental stewardship and social justice, which would further work in collaboration towards a sustainable and clean energy future.

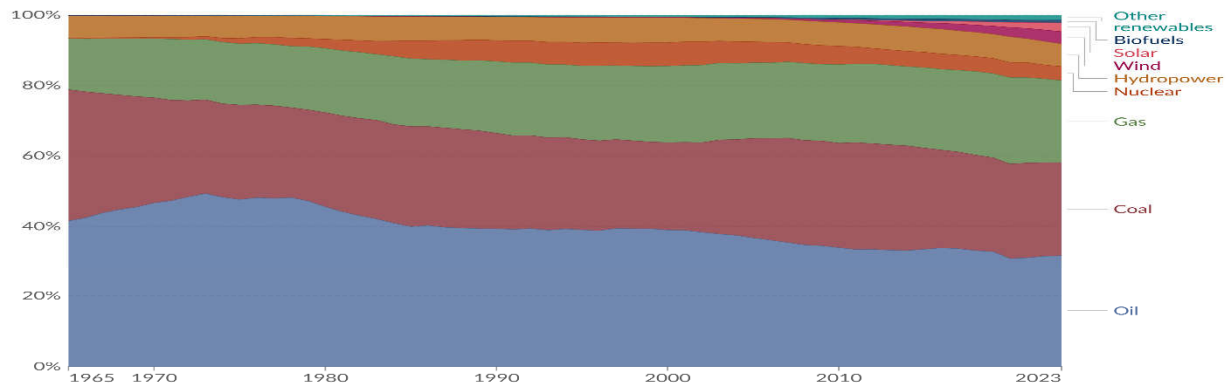
Background and Context

1. Historical Overview of Energy Systems

Much in the history of energy systems have been transformed. Initially, communities relied on natural energy sources such as wood and animal labor, and to an extent, watermills. The Industrial Revolution gave birth to coal as the primary fuel that powered factories and the engines in transportation (Smil, 2017). The 20th century was marked with oil and natural gas, with the latter being used significantly in promoting economic growth and, to a large extent, nuclear energy that started taking its place. With the environmental issues, including global warming and resource depletion, being earnestly discussed from the end of the 20th century onwards, the world realized that there was a lot of momentum to be gained towards discovering clean energies. Renewable energy sources related to solar, wind, and hydropower have also started gaining importance. Improvement in energy storage and smart grid technology, with carbon capture, is also revolutionizing the landscape, shaping it into a better pathway for energy (Sovacool, 2017; IEA, 2023). This historic trend exhibits a pattern from dependence on fossil fuels to cleaner sources of energy and hence it offers a pathway towards the future energy system.

Energy consumption by source, World

Measured in terms of primary energy¹ using the substitution method².



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

OurWorldinData.org/energy | CC BY

1. Primary energy: Primary energy is the energy available as resources – such as the fuels burnt in power plants – before it has been transformed. This relates to the coal before it has been burned, the uranium, or the barrels of oil. Primary energy includes energy that the end user needs, in the form of electricity, transport and heating, plus inefficiencies and energy that is lost when raw resources are transformed into a usable form. You can read more on the different ways of measuring energy in our article.

2. Substitution method: The 'substitution method' is used by researchers to correct primary energy consumption for efficiency losses experienced by fossil fuels. It tries to adjust non-fossil energy sources to the inputs that would be needed if it was generated from fossil fuels. It assumes that wind and solar electricity is as inefficient as coal or gas. To do this, energy generation from non-fossil sources are divided by a standard 'thermal efficiency factor' – typically around 0.4. Nuclear power is also adjusted despite it also experiencing thermal losses in a power plant. Since it's reported in terms of electricity output, we need to do this adjustment to calculate its equivalent input value. You can read more about this adjustment in our article.

Fig.1. World Energy Consumption

3. Current Energy Challenges

Climate change, resource depletion, and rising energy consumption are some of the major issues facing the global energy sector. Despite the change in its sources, fossil fuels still account for around 80% of the world's energy consumption, which contributes to climate change due to its significant CO₂ emissions (IEA, 2023). On the other hand, the exhaustion of these non-renewable resources has implications for long-term energy security. Global energy demand is forecasted to increase by 25% by 2040, mainly in developing economies, and will further stress current energy systems (IEA, 2023). Transitioning to cleaner, renewable energy sources and developing energy storage, carbon capture, and sustainable infrastructure will be essential to solving these problems.

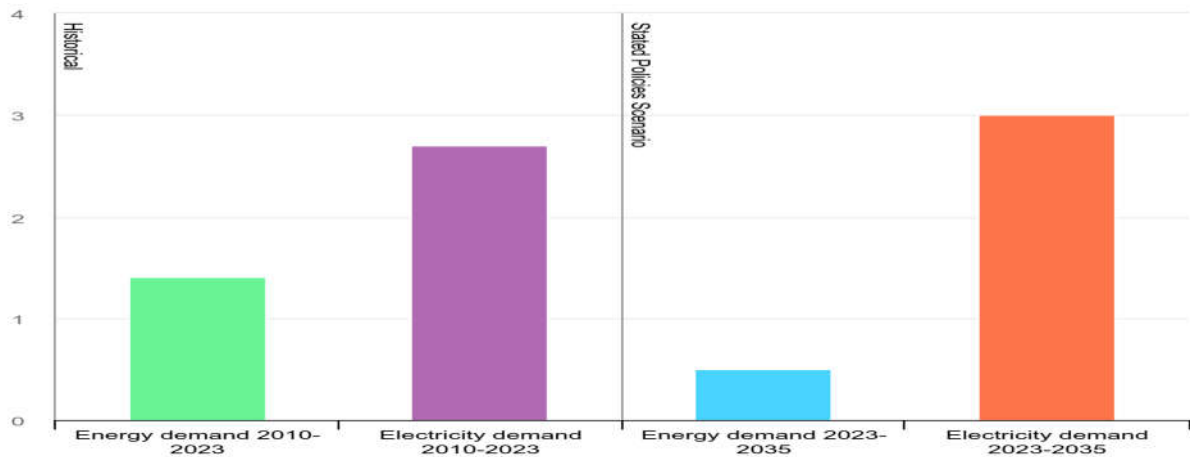


Fig.2. Energy and Electricity demand based on historical and stated policies scenario

3. Sustainable Energy Solutions

It's changing the face of the global energy sector, powered in large part by solar and wind energy. As it gains popularity, particularly with offshore sources, wind energy has come quickly on the heels of its decreasing cost and technological innovation. And although geothermal and hydropower is growing at a much slower pace than solar and wind, these sources still have enormous contributions to steady, renewable power. New technologies that offer a clean alternative for transportation and industry, such as hydrogen fuel cells, are gaining popularity. It has been mentioned that Carbon Capture, Utilization, and Storage or CCUS holds the future in reducing emission from fossil fuel, whereas enhanced energy storage is an added feature in order to counter the inconsistency of intermittent renewable sources that will continue to make the grid stable.

3.1 Hydrogen Fuel cell

Hydrogen fuel cells are clean and efficient sources of energy that produce electricity through the chemical reaction of hydrogen and oxygen, with water as the only byproduct. This technology is promising in reducing greenhouse gas emissions because it can replace fossil fuels in industrial and transportation settings. Hydrogen fuel cells are widely used these days because of the declining cost in distributing and storing hydrogen. Some other applications include vehicles using hydrogen, backup power generation, and stabilizing a grid through the use of renewable sources. The disadvantages that hydrogen suffers from today include the fact that they are costly to produce, lack infrastructure, and consume much energy to produce it, among others.

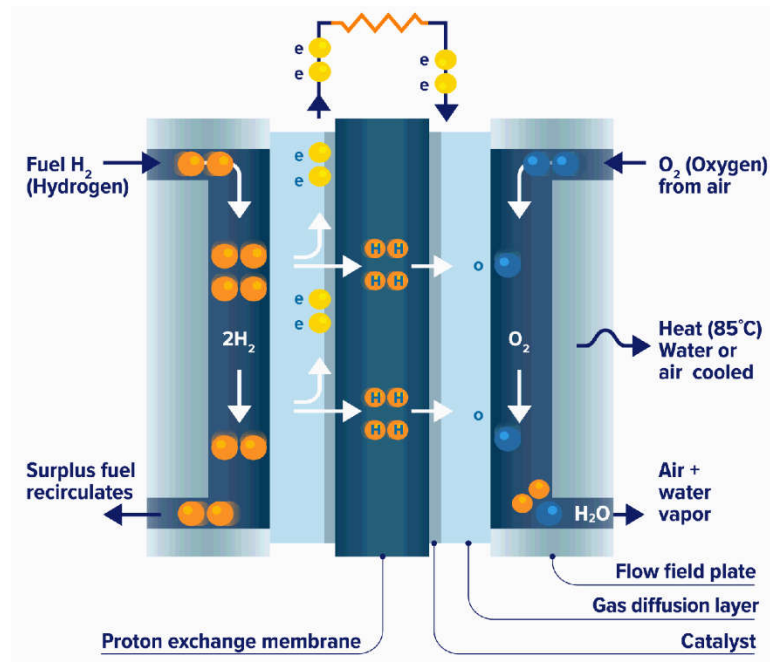


Fig.3. Hydrogen fuel cell

3.2 Carbon capture, utilization and storage or CCUS

Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) is a key technology meant to reduce greenhouse gas emission. It captures CO₂ within industrial processes or power generation before those emissions reach the atmosphere, transfers it, and either deposits it underground or uses in products such as concrete and fuel. CCUS is highly important for reaching net-zero targets, especially in sectors that are harder to decarbonize, such as cement, steel, and chemicals. While it has the potential, CCUS adoption has been limited by its high cost, infrastructure requirements, and energy needs. However, continuing innovations and supportive policies continue to enhance its scalability and economic feasibility.

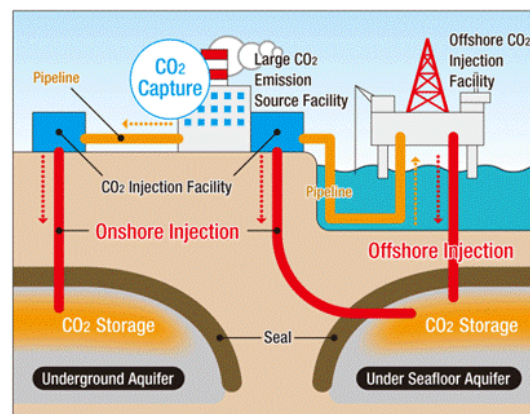


Fig.4. Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)

4. Global Policy and Energy Equity

Global energy policies are a solution to disparities in energy access and climate change. The Paris Agreement limits global temperature increases through cleaner energy and reduced emissions. The emphasis is on aiding developing countries (UNFCCC, 2015). Moreover, SDG 7 aims for universal access to affordable, reliable energy by 2030, with energy equity as part of sustainable development (United Nations, 2015). Energy access issues still exist, especially in Asia and Sub-Saharan Africa, where millions lack access to clean cooking

options and electricity (IEA, 2020). International programs such as IRENA and Power Africa support investment in the renewable energy stream while making it easier to transition in developing countries toward the end. However, the challenges in developing nations remain in regards to the high up-front costs, while carbon pricing and renewable energy subsidies will be crucial components in the global switch away from fossil fuels. To ensure universal access to energy and meet the global climate targets, policies oriented towards energy equity and transitions in clean energy are needed.

5. Technological Innovations and Future Opportunities

Emerging technology alters the energy landscape. Renewable sources of energy, especially solar and wind power, have become competitors to fossil fuels due to a significant reduction in their price and scale (IRENA, 2020). Challenges associated with the intermittent character of renewable energy are being gradually addressed by improvements in advancements in energy storage technologies that include solid-state batteries (IEA, 2021). Carbon capture technologies (CCUS) and hydrogen fuel cells are also supporting hard-to-abate industries in their decarbonization efforts (H2View, 2022; Global CCS Institute, 2020). Also, digital technologies coupled with smart grids are facilitating more efficient and responsive energy delivery while making the energy systems more resilient (IEA, 2020).

Results

Eighty percent of the world's energy is produced from fossil fuels, which emit CO₂ and lead to climate change (IEA, 2023). Non-renewable resources are depleting and thus threaten energy security, while energy consumption is likely to increase by 25% in developing nations by 2040. The growth in global capacity is over 10% per year, and the most used form of renewable energy is that of solar and wind power (IRENA, 2023). Therefore, in a situation like this, when the integrated source is an intermittent one, the employment of storage technologies is an absolute necessity. International adoption of green hydrogen is growing while hydrogen fuel cells are central to the low-carbon transformation of industry and transport. CCUS can capture up to 90% of the emissions and promises industrial scale application potential. More than 750 million people lack access to electricity in developing countries, according to the World Bank, 2023, noting disparities as international efforts under the Paris Agreement.

Literature review

The pressure for change from non-renewable to renewable sources of energy has been influenced by climate changes and the exploitation of the world's fossil fuel sources. The old sources of energy, whether it be coal, oil, or natural gas, powered industrial growth but equally damaged the environment. However, as the latter sources of energy began to deplete and cause harm, their exploration became allied with the need for renewable energy systems; examples are solar, wind, and hydropower. Cost-competitiveness and scaling of renewable energy technologies. Today, solar and wind growth are growing rapidly, meaning they now significantly contribute to generating electricity globally (REN21, 2020). The innovation in hydrogen fuel cell and carbon capture technology helps it transition further by offering means to facilitate storage and decarbonizing those sectors that are hard to electrify alone (IEA, 2021). The transition also presents hurdles. For example, it should offer energy equity. According to Sovacool et al. (2016), accessible and affordable energy is a factor, of course, more so with developing regions. This is within the context where policies focus on reducing global warming through using clean energy and net zero emissions worldwide (Sovacool, 2016). Hence, it is necessary to maintain an outlook in terms of renewable energy as it aligns with a few advanced technologies and sturdy policies to ensure a fair and sustainable energy system for the future.

Conclusion

Global Energy Landscape Transformation. In an effort to meet these challenges, the dual imperative of mitigating climate change while addressing growing energy demands, research has focused on progression from fossil fuel dependency toward cleaner alternatives such as solar, wind, geothermal, and hydropower and focuses attention on promising emerging technologies in the shape of hydrogen fuel cells, CCUS, and advanced energy storage systems. These are innovations such as smart grids and sustainable urban planning, yet the need

to address issues of energy access inequalities, environmental impacts, and life-cycle emissions is still key. Interdisciplinary approaches that combine policy reforms, financial mechanisms, and technological advancement will help achieve equitable energy systems. Through this exploration, it calls for a balanced integration of technological innovation and both environmental stewardship and equity to the society at hand. It will result in a resilient and sustainable future for energy, with this system addressing current needs and needs further into the future.

References

- Sovacool, B. K. (2017). *The Routledge Handbook of Energy Politics*. Routledge.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Global Energy Review 2023*.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Investment 2023*. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*.
- IEA (2024), *Annual energy and electricity demand growth, historical and in the Stated Policies Scenario, 2010-2035*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-energy-and-electricity-demand-growth-historical-and-in-the-stated-policies-scenario-2010-2035>, License: CC BY 4.0
- UNFCCC (2015). Paris Agreement.
- United Nations (2015). Sustainable Development Goals.
- IRENA (2020). Renewable Power Generation Costs in 2020.
- IEA (2021). Energy Storage: Advancing the Clean Energy Transition.
- H2View (2022). The Rise of Hydrogen Fuel Cells.
- Global CCS Institute (2020). CCUS in the Energy Transition.

**İDARE HUKUKU AÇISINDAN YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAK ALANI KAVRAMI****Meltem KUTLU GÜRSEL**

Dokuz Eylül Üniversitesi, Hukuk Fakültesi, İdare Hukuku, İzmir, Türkiye
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3334-0832>

Özet

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi teşvik edilmektedir. Hatta mahkeme kararlarının gerekçesinde, bu kaynaklardan elektrik üretiminde “üstün kamu yararı”nın var olduğu belirtilmektedir. O halde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim teknolojisinin alt yapısının öncelikle çevre dostu olmasını ilke olarak kabul etmek gerekir. Bunu hukuken koruyacak hukuki alt yapının da bu amaç doğrultusunda hazırlanması önemlidir. Anayasa 44 ve 45. Maddelere göre Devletin tarım arazilerini korumak yükümlülüğü bulunmaktadır. Yine zeytin ağaçlarının hukuki koruması mevzuatımızda yer almaktadır. Anayasa’nın 169. maddesine göre ormanlara zarar verebilecek hiçbir faaliyet ve eyleme izin verilemez. Verimli geniş tarım alanları üzerinde veya zeytin ağaçlarının yoğun olduğu bölgelerde, doğal kaynakların korunması yükümlülüğünü ihlal edecek boyutta yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi, yürürlükteki objektif hukuk kuralları çerçevesinde mümkün olamayabilir. Özellikle bilirkişi raporlarının hazırlanmasına esas olacak objektif bilimsel kriterlerin mevzuatta güvence altına alınması önemlidir. Faaliyet başladıktan sonra da elektrik üretimi sürecinde çevreye uyumu veya zararına ilişkin her bir kaynağın özelliğine göre denetimlerin yapılması ve bunun halkı ile paylaşılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynak alanının belirlenmesi bu gibi uyumsuzlukların en aza indirilmesi için yararlıdır.

Hukuk sistemimizde yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili olarak “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun”da “yenilenebilir enerji kaynak alanı” kavramı yer almaktadır. Genel olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından en az birinin yoğun olarak bulunduğu alanı ifade eden bu kavram coğrafik alandan ibarettir. İdare hukuku açısından bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynak alanı belirleme ölçütlerinin neler olduğu ve bu belirlemeyi hangi idarenin yapacağı, yenilenebilir enerji kaynak alanı olarak belirlenmenin hukuki sonuçları, bölgenin hangi hukuki rejime tabi olacağı, uyumsuzlukların hangi yargı kolunda çözümleneceği mevzuat, öğretisi ve konu ile ilgili yargısal kararlar çerçevesinde incelenerek değerlendirilecektir.

Anahtar kelimeler: İdare hukuku, yenilenebilir enerji, yenilenebilir enerji kaynak alanı, imar planı.

THE CONCEPT OF RENEWABLE ENERGY RESOURCE AREA IN TERMS OF ADMINISTRATIVE LAW**Abstract**

As is the case all over the world, electricity production from renewable energy sources is encouraged in Turkey. In fact, the justification of court decisions states that there is a “superior public interest” in electricity production from these sources. Therefore, it should be accepted as a principle that the infrastructure of electricity production technology from renewable energy sources should be environmentally friendly. It is important that the legal infrastructure that will legally protect this is prepared in line with this purpose. According to Articles 44 and 45 of the Constitution, the State has the obligation to protect agricultural lands. Again, the legal protection of olive trees is included in our legislation. According to Article 169 of the Constitution, no activity or action that may harm forests can be permitted. Electricity production from renewable energy sources on large productive agricultural areas or in regions where olive trees are dense may not be possible within the framework of the objective legal rules in force, to the extent that it would violate the obligation to protect natural resources. It is important that the objective scientific criteria that will form the basis for the preparation of expert reports are secured in the legislation. After the activity starts, inspections should be carried out according to the characteristics of each source regarding its environmental compatibility

or harm during the electricity production process and this should be shared with the public. Determination of renewable energy resource area is useful to minimize such conflicts.

In our legal system, the concept of “renewable energy resource area” is included in the “Law on the Use of Renewable Energy Resources for the Purpose of Generating Electricity” regarding renewable energy resources. This concept, which generally refers to the area where at least one of the renewable energy resources is densely located, consists of a geographical area. In terms of administrative law, this study will examine and evaluate the criteria for determining a renewable energy resource area, which administration will make this determination, the legal consequences of determining a renewable energy resource area, which legal regime the region will be subject to, and which judicial branch will resolve disputes within the framework of legislation, doctrine and judicial decisions on the subject.

Keywords: Administrative law, renewable energy, renewable energy resource area, zoning plan.

GENEL OLARAK YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAK ALANI KAVRAMI VE ÖNEMİ

Anayasa'nın 123. maddesine göre, idare kuruluş ve görevleri ile bir bütündür, yasayla düzenlenir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı da, devlet idaresinin enerji alanındaki görevlerini merkezden yönetim esaslarına göre yürüten birimdir. Ancak 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'da¹ yenilenebilir enerji kaynak alanı tanımı yer almamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynak alanının belirlenme ölçütleri, bu alanın taşınması gereken unsur ve özellikleri yasa metninde bulmak olanaksızdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının her bir türü bakımından YEKA belirleme ölçütünün kurucu unsur olarak yasada düzenlenmesi, enerji alanındaki hukuki güvenlik ilkesinin en temel gereğidir. Çünkü ETKB'nin YEKA koordinatlarını belirlemesi, idari işlemdir.

Anayasa'nın 125. maddesine göre idarenin işlemleri, hukuk devleti ilkesinin en temel gereği olarak yargısal denetime tabidir. Her idari işlem de yetki, şekil, sebep, konu, amaç unsuru bakımından hukuka uygunluk denetimine tabidir. YEKA belirlemek ve ilan etmek de ETKB'nin idari işlemi olduğuna göre, bu işlemin hukuka uygunluk denetimi de kural olarak idari yargının görev alanına girmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi elbette kamunun yararına. Hatta Danıştay'ın birçok kararında bu üretimin kamunun üstün yararına olduğu belirtilmektedir. YEKA enerji yatırımlarının yoğunlaştığı, önemli yatırımların yapıldığı alanlardır. Bir yandan yüksek maliyetli bu yatırımların öncelikle hukuki açıdan güvenlik içinde gerçekleştirilmesi, diğer yandan da YEKA'da, yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması ve alanın bu amaçla kullanılması gerekir.

Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları Yönetmeliği'nin² 4/1 bendine göre “yenilenebilir enerji kaynak alanı (YEKA)”; “kamu ve hazine taşınmazları ile özel mülkiyete konu taşınmazlarda geliştirilebilir yenilenebilir enerji kaynaklarından en az birinin yüksek yoğunlukta bulunduğu yenilenebilir enerji kaynak alanı/alanlar” olarak belirtilmektedir.

YEKA, hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, dalga, akıntı ve gel-git gibi fosil olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarından bir veya birkaçının yüksek yoğunlukta bulunduğu alanları ifade etmektedir. YEKA koordinatları belli olan geniş bir bölgeyi kapsamaktadır. Bu bölgeyi belirleme yetkisini yasa koyucu, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na vermiştir. Bu nedenle YEKA belirleme işlemi organik açıdan idari bir işlemdir. Resmi Gazetede yayınlanan YEKA ilanı, sınırları köşe koordinatları krokileri idarece belirlenmiş alanlar için verilmektedir.

Özellikle günümüzde rüzgar enerjisinden elektrik üretimi için belirlenen YEKA ile ilgili olarak idari yargıda dava sayısında artış olduğu belirtilebilir. Daha önceki yıllarda bu tür uyuşmazlıklara rastlanmamaktaydı³. RES için belirlenen YEKA sınır koordinatları içinde çok sayıda taşınmaz yer almaktadır. Bu sınır içindeki taşınmazların bir bölümü özel hukuk kişilerinin bir bölümü kamu tüzel kişilerinin mülkiyetinde veya devletin hüküm ve tasarrufu altındaki taşınmazlar olabilir.

¹ R.G., 18.5.2005, S.25819.

² R.G., 09.10.2016, S.29852.

³ Öztaban (Yağcı), Pınar, Rüzgar Enerjisinin İdare Hukuku Açısından İncelenmesi, Ankara 2019.

2005 yılında yürürlüğe giren 5346 sayılı Yasa'nın 4. maddesinde, 2020 yılında 7226 sayılı Yasa⁴ ile çok önemli bir değişiklik yapılmıştır. 2005 yılında yürürlüğe giren 4. maddenin madde gerekçesinde⁵ yer alan ifadeler şu şekildedir: “Madde ile, kaynak alanları üzerinde enerji dışındaki tasarrufların veya bu alanlardaki toplam potansiyelin değerlendirilmesini kısıtlayıcı plansız enerji yatırımlarının önlenmesi kapsamında, **kamu veya Hazine arazilerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomiye kazandırılması açısından, bu alanların kullanımını ve verimliliğini etkileyici imar planlarının düzenlenemeyeceği ve ayrıca kamu kurum ve kuruluşlarından gerekli görüşlerin alınması hükme bağlanmaktadır.**” Buna göre 5346 sayılı Yasa'nın 4. Maddesine göre YEKA sınırları içinde yalnızca kamu ve hazine taşınmazları yer almaktaydı.

2020 yılında 7226 sayılı Yasa'nın 26. maddesiyle değişik 5346 sayılı Yasa'nın 4. maddesinde, YEKA sınırı içine özel hukuk kişilerinin taşınmazları da dahil edilmiştir. Bugün yürürlükte olan 4. madde “Bakanlık, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılması, bu alanların ve bağlantı kapasitelerinin yatırımcılara tahsisıyla yatırımların hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla **kamu ve Hazine taşınmazları ile özel mülkiyete konu taşınmazlarda ilgili kurum ve kuruluşların görüşü alınarak yer seçimi yapmak suretiyle yenilenebilir enerji kaynak alanları oluşturur....**” Maddenin devamında özel hukuk kişilerinin mülkiyetindeki taşınmazlarda kamulaştırma yapılmasına, hatta son fıkrasında bu taşınmazların acele kamulaştırma yoluyla kamulaştırılacağına dair kurala yer verilmiştir. Artık YEKA belirlenmesi ve idarece bunun ilanı, sözkonusu alan içindeki taşınmazlara bağlı mülkiyet hakkı başta olmak üzere diğer haklara etki edecek bir işleme dönüşmüştür.

5346 sayılı Yasa, yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili özel hükümler içermekte ise de, jeotermal kaynak alanları ile ilgili doğrudan doğruya uygulanabilir daha bir özel hükümler de mevcuttur⁶. 5346 sayılı Yasa'ya dayanan YEKA uygulamasının daha çok rüzgar enerjisinden elektrik üretimine yönelik geniş uygulama alanı bulunduğunu belirtebiliriz.

Özellikle RES'ler için YEKA ilanının yargısal denetimi, 2020 yılında 5346/4. maddedeki değişiklikten sonra daha da önemli hale gelmiştir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynak alanı belirleme ölçütü yasada yer almamaktadır. 5346 sayılı Yasa, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın YEKA belirlerken kullanabileceği hiçbir somut ölçütü içermemektedir. Yasa koyucu bu konuda yetkisini adeta yetkili idareye devretmiştir. Bu durumun yasama yetkisinin devredilmezliği ilkesi ile bağdaşp bağdaşmadığı tartışmaya açıktır. Adeta ETKB Yönetmelik çıkararak kendi yetki sınırlarını belirlemek gayretine girmiştir.

Yönetmeliğin 5. maddesinin başlığı “YEKA belirleme ve derecelendirme kriterleri”dir. Madde incelendiğinde Aday YEKA'nın somut olarak neye göre uygun bulunan alan olduğu belirsizdir. “Uygun bulunan alan”ın taşınması gereken özelliklerin her bir yenilenebilir enerji kaynağının özelliğine uygun olarak kurala bağlanması zorunludur. Hukukilik denetiminin objektif bir şekilde yapılabilmesi için, ivedi olarak bu belirsizliğin giderilmesi gerekmektedir. Bu madde içeriğinde Bakanlık sınırlayan somut bir ölçütün yazılı olmadığı saptanmaktadır. Bu durum ÇED sürecinin hukukilik denetiminin de sorunlu olmasına yol açmaktadır.

Özellikle RES'ler ile ilgili soyut bir şekilde koordinat alanlarını içerecek şekilde çok geniş alanların YEKA olarak belirlenmesi işleminin hukukilik denetimi önem arzetmektedir. Yargı organının, bakanlığın YEKA belirleme işleminin hukukilik denetiminde kullanılacak somut objektif ölçütler, Yönetmelikte de almamaktadır. 5. Maddede YEKA belirleme usulü yer almakta olup, YEKA'lar, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından veya YEKA Yarışması sonrasında yapılacak çalışmalar sonucunda belirlenebilir duruma gelmektedir. Bu süreç ile ilgili de objektif kriterler Yönetmelikte yer almamaktadır. Kaldı ki, idari usule ilişkin kurallar, idarenin kanuniliği ilkesi gereği yasa ile düzenlenmesi gereken kurallardır. Hukuki güvenlik ilkesinin bir gereği olarak, temel hak ve özgürlükleri sınırlandıran bu idari usul kurallarının yasa ile düzenlenmesi gerekirken, yönetmelik ile düzenlenmesi ve eksiklikler içermesi yenilenebilir enerji kaynak alanlarının belirlenmesi ve kullanımı ile ilgili hukuki uyumsuzlukların çözümlenmesi sürecini de olumsuz etkilemektedir.

⁴ R.G., 26.03.2020, S.31080 mük.

⁵ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan ve TBMM Başkanlığına arzı Bakanlar Kurulunca 15.6.2004 tarihinde kararlaştırılan “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun Tasarısı” ile gerekçesi için bkz. TBMM, 22. Dönem, 2. Yasama Yılı, S. Sayısı 646 in <https://cdn.tbmm.gov.tr/KKBSPublicFile/D22/Y2/T1/DosyaKomisyonRaporunuVerdi/2236e112-bfe4-4fc3-9ea1-5dcf3668d45c.htm> (E.T.05.12.2024)

⁶ KUTLU GÜRSEL, Meltem, Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu Kapsamında Kamulaştırma Uygulaması”, 7th International Istanbul Proceedings Book.pdf, 2021, s.509 vd.; KUTLU GÜRSEL, Meltem, Hukuki Açından Jeotermal Enerji, in International World Energy Conference FULL TEXT BOOK, 2021, s.53 vd.

Hem idare, hem yatırımcı hem de üçüncü kişiler açısından yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle RES'lerden elektrik üretiminin hukuki güvenliğinin sağlanması için YEKA belirleme ve ilanı ile ilgili olarak yasal alt yapının gözden geçirilmesi önem arz etmektedir.

ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI'NIN YEKA BELİRLEMESİ VE İLANININ HUKUKİ SONUÇLARI

1. YEKA tapu siciline şerh verilir.
2. Şerh tarihinden itibaren üç yıl içinde, Kamulaştırma Kanunu'nun 10. maddesine göre kamulaştırma bedeli tespit ve tescil davası açılarak, özel hukuk kişinin mülkiyetindeki taşınmazın Hazine adına tescili talep edilir. Mahkemeden bu talepte bulunulduğuna ilişkin belgenin şerh tarihinden itibaren üç yıl içinde Tapu İdaresine ibraz edilmesi gerekir. Aksi takdirde Tapu İdaresi YEKA şerhini kendiliğinden (re'sen) silme yetkisine sahiptir.
3. 5346 sayılı Yasanın son fıkrasına göre YEKA içindeki özel hukuk kişilerinin taşınmazları üzerinde Kamulaştırma Kanunu 27. madde uyarınca acele kamulaştırma yapılabilir.
4. YEKA ilan edilen bölgede, yenilenebilir enerji kaynak alanlarının verimliliğini ve kullanımını etkileyecek şekilde imar planları düzenlenemez. Yasada emredici nitelikteki bu kural belediyelerin imar planlarını etkilemektedir. İmar planları arasında, İmar Kanununa göre planlama hiyerarşisi bulunmaktadır. YEKA ise her ölçekteki plana etki etmektedir. Yani ilan ile yürürlüğe giren YEKA, çevre düzeni planını ve belediyenin imar planını etkileyici bir özelliği vardır. Hatta Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, YEKA'yı imar planlarına re'sen işlenmek üzere ilgili mercilere de bildirir. Bu durumda bir bölgenin YEKA ilanı mevcut veya hazırlanmakta olan imar planlarına etki eden hatta imar planında değişiklik yapma etkisi olan idarenin işlemidir. YEKA ilanı, imar planlarını etkileyen bir idari işlem olması nedeniyle Danıştay'ın son yıllarda YEKA ilanının iptali davalarında verdiği kararların ve gerekçelerinin tartışılması önem taşımaktadır.
5. 4737 sayılı Endüstri Bölgeleri Kanunu kapsamında belirlenen bölge, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynak alanı olarak da belirlenmiş ise bu alanın tahsis edileceği tüzel kişilerin belirlenmesi 5346 sayılı Yasanın 4. maddesinin son fıkrası uyarınca Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenir. Bunun dışındaki diğer gerekli işlemler 4737 sayılı Kanuna göre yürütülür.

ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI'NIN YEKA BELİRLEMESİNE YÖNELİK İŞLEMİNİN HUKUKİ NİTELİĞİ

ETKB'nin, YEKA belirleme işleminin hukuki niteliği; işlemin yürürlüğe girmesi, dava açma süresi, bu işlemde doğan uyuşmazlıklarda; görevli yargı kolunun belirlenmesi, yer bakımından hangi mahkemenin yetkisine girdiği gibi yargılama usulü hukukuna ilişkin konular bakımından önemlidir. YEKA belirleme işleminin esas yönünden hukuka uygunluk denetimi için öncelikle bu yargılama usulü ile ilgili belirsizliğin giderilmesi gerekmektedir.

YEKA sınırı içindeki taşınmazların hukuki durumunu 5346 sayılı Yasa'nın 4. maddesine göre doğrudan doğruya etkileyen bir işlem olan YEKA ilanının taşınmaz maliklerine yazılı olarak tebliği olanaksızdır. Hukuk sistemimizde idarenin birel işlemleri yazılı tebliğ ile düzenleyici işlemleri ilan ile yürürlüğe girer. İYUK 7. Madde, birel idari işlemlere ve düzenleyici idari işlemlere karşı hak arama özgürlüğü bağlamında dava açma süresinin başlangıcını düzenlemektedir. İşlemin niteliğine göre dava açma süresinin başlangıcı değişmektedir. Ayrıca düzenleyici idari işlemlere dayanarak tesis edilen birel idari işlem niteliğindeki uygulama işlemlerinin tebliği üzerine; ilgililer, birel işlemin iptali davası ile o işlemin dayanağı olan düzenleyici işlemin de iptalini talep edebilirler. Taşınmaz mal ile ilgili hak sahiplerinin YEKA ilanının iptali davası açabilmesi için usulüne uygun olarak bu kararın yürürlüğe girmesi zorunludur. YEKA sınırı içinde özel hukuk kişinin mülkiyetindeki taşınmaz ile ilgili uygulama işlemi tesis edildiğinde dayanak YEKA belirleme işleminin de iptali talep edilebilir.

Danıştay aşağıda incelediğimiz kararlarda, YEKA ilanının düzenleyici işlem olmadığını belirtmektedir. Fakat YEKA belirlemenin idarenin ne tür işlemi olduğu konusunda hiçbir değerlendirme yapmamaktadır. Düzenleyici işlem olmadığı yönündeki açıklamasının da gerekçesi bulunmamaktadır. Bu durumda varsayalım

ki, YEKA ilanı idarenin düzenleyici işlemi değil ise, idarenin belli bir alanı koordinatları ile belirleyip o alana YEKA statüsü verdiği idari işlemin niteliği nedir?

Bu sorunun yanıtını vermek için, önce idare hukuku ve idari yargılama hukuku ile ilgili temel bilgileri çok genel olarak burada ifade etmek gerekmektedir. İdari yargıda iptal davasına idarenin tek yanlı icrai (etkili) idari işlemi konu olur. İdarenin kamu gücüne dayanarak, tek yanlı irade açıklaması ile hukuki sonuç doğuran işlemleri, idarenin tek yanlı işlemidir. İdare hukuku öğretisinde idarenin tek yanlı işlemleri, maddi bakımdan genel olarak ikiye ayrılarak incelenir. Bunlardan biri idarenin birel işlemi, diğeri idarenin düzenleyici işlemidir⁷. İdarenin birel işlemi; somut olarak belli bir kişiyi, nesneyi, hayvanı ve olayı ilgilendiren işlemidir. İdare birel işlemi tesis ederken işlemi kimin için yaptığını bilmektedir. İdarenin düzenleyici işlemleri ise somut değil soyuttur, geneldir, kapsamına giren herkesi etkiler, objektif, bir defa uygulanmakla tükenmeyen, kişilik dışı adeta kural koyan işlemlerdir. İmar planları da idare hukuku açısından düzenleyici idari işlemidir. “*Nazım imar planı ile bu plan esaslarına göre çizilen ve çeşitli bölgelerin yapı adalarını, bunların yoğunluk ve düzenini, yolları ve uygulama için gerekli imar uygulama programlarına esas olacak uygulama etaplarını ve diğer bilgileri ayrıntıları ile gösteren uygulama imar planları imar yönetmeliklerinden önce uygulanması gereken düzenleyici işlem niteliğindedir*”⁸.

YEKA'nın belirlenerek yürürlüğe girmesi ile de YEKA ilanı koordinatları belli bir bölgeyi kapsamaktadır. Bu bölgenin içinde taşınmazları olan herkes 5346 sayılı Yasa'nın uygulanmasından etkilenebilir. Hatta Belediyeler dahi YEKA'ya göre imar planlarını düzenlemek zorundadır. O halde YEKA ilanı, bölge için genel, soyut, objektif olup bölgeyi, 5346 sayılı Kanun kapsamına almaktadır. 5346 sayılı Kanunun uygulanacağı genel bir alan yaratmaktadır. Yani 5346 sayılı Yasa'nın uygulanması için önce Bakanlığın YEKA ilanı zorunludur. Her ne kadar tapu siciline şerh tarihinden itibaren üç yıl içinde Hazine adına KK 10. madde uyarınca kamulaştırma bedeli tespit ve tescil davası açılarak Hazine adına tescil isteminde bulunulmaz ise Tapu idaresinin bu şerhi re'sen sicilden silme yetkisi bulunması mümkün ise de, bu üç yıl içinde bağlayıcıdır. Ayrıca Hazine adına tescil isteminde bulunulmuş ise artık taşınmazın YEKA alanında kaldığı için acele kamulaştırılmasında hukuka aykırılık iddiasında bulunmanın da hukuki bir önemi kalmamaktadır. YEKA, Hazine adına acele kamulaştırmayı meşrulaştıran bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Yani bir defa uygulanmakla tükenen bir işlem niteliğinde değildir. YEKA içindeki tüm taşınmazlara bağlı hak sahiplerini ilgilendiren bir işlemidir.

Kaldı ki, Belediyelerin imar planları da 3194 sayılı İmar Kanunu'na göre belli bir bölgeyi kapsar ve yasada belirlenen uygulama süresi mevcuttur. YEKA imar planlarına etki eden Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın bir işlemi olduğuna göre ve tıpkı imar planı gibi belli bir bölgedeki taşınmazları kapsamına almaktadır. O halde YEKA ilanı da düzenleyici bir idari işlemidir.

YEKA belirleme işlemi, birel idari işlem özelliklerini taşımamaktadır. İdare birel işlemi kimin için yaptığını önceden bilir. Somut belli bir nesne, kişi, olay için işlem tesis edilir. YEKA belirlemede koordinatlar bellidir. Fakat belli somut bir taşınmazı etkilememektedir. Kapsamına çok sayıda taşınmaz girmektedir. Ayrıca birel idari işlemler ilgisine yazılı tebliğ edilmekle yürürlüğe girer ve uygulanır. İmar planı gibi, düzenleyici idari işlemlerin kapsamına kime ait taşınmazın girdiği belli olmadığı için ilan yoluyla yürürlüğe girmektedir. Düzenleyici idari işlemlerin uygulanması ise çok sayıda birel idari işlem ile mümkündür. Örneğin YEKA içinde kamulaştırma işlemi, bir birel idari işlemidir⁹.

Birel idari işlemler uygulama işlemi olduğu için İYUK 7/son fıkra uyarınca birel idari işlemin tebliğini izleyen günden itibaren idari yargıda o birel işlemin dayanağı olan düzenleyici idari işlemin iptali de talep edilebilir. İmar planlarının uygulama işlemi olan ruhsat, kamulaştırma vs. gibi birel idari işlemlerin tebliği üzerine, ilgililer dayanak düzenleyici idari işlemin de hukuka aykırı olduğu iddiasıyla iptalini talep edebilir. Durum böyle olunca YEKA içindeki uygulamaların hukuka uygunluk denetiminde birel idari işlemin tebliği üzerine YEKA belirleme işleminin iptali davası da açılabilir.

Büyük yatırım gerektiren, teşvik edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde idare hukuku açısından YEKA belirleme işleminin hukuki niteliğinin ne olduğu büyük öneme sahiptir. İdare Hukuku ve

⁷ Örnek olarak bkz. DURAN, Lutfi, İdare Hukku Ders Notları, İÜHF, 1982, İstanbul 1982, s.400;

AKYILMAZ/SEZGİNER/ KAYA, Türk İdare Hukuku, Ankara 2024, s.386 vd.;

YILDIRIM/YASİN/KAMAN/ÖZDEMİR/ÜSTÜN/OKAY TEKİNSOY, İdare Hukuku, İstanbul 2024, s.180 vd.

⁸ D.6. DD.,18.01.1994, E. 1993/1302, K.1994/97, D.D., s.90, s.631.

⁹ Kutlu Gürsel M., Kamulaştırma Hukuku, Seçkin Kitabevi, Ankara 2019.

İdari Yargı mevzuatı çerçevesinde YEKA belirlemenin düzenleyici idari işlem olduğu kanaatindeyiz. Çünkü özellikle rüzgar enerjisinin yoğun olduğu YEKA’da çok geniş alanlar belirlenmektedir. YEKA’da belirlenen sınırlar içinde kalan taşınmazlar etkilenmekte olup genellik etkisi vardır, soyuttur kapsamına kime ait taşınmazın girdiği bilinmemektedir, kişilik dışıdır, 5346 sayılı Yasa uygulamasında, idare hukuku açısından varılan bu sonuç, yalnızca taşınmaza bağlı hak sahiplerinin değil, yatırımcının da hukuki güvenliğini etkileyeceğini belirtmek isteriz. Bu uyuşmazlıklar 2020li yıllardan itibaren Danıştay’da dava konusu edilmektedir. Bugüne kadar uyuşmazlığın esasına girerek verilen yayınlanmış bir karara rastlamasak da, örnek olarak bildiriye yer alan altı adet Danıştay kararı; usul yönünden dilekçe ret veya görev yönünden davanın reddi gibi kararlardır. Uyuşmazlığı esas yönünden çözen karara henüz rastlamadık. Fakat uyuşmazlığın çözümünde önemli olan husus YEKA’nın idari işlem teorisinde idarenin tek yanlı işlemlerinden birel idari işlem veya düzenleyici idari işlem olarak nitelenmesidir.

Yukarıda ayrıntılı olarak belirttiğimiz gibi YEKA belirleme ve ilanı birel idari işlem özelliklerini taşımamaktadır. Bakanlık koordinatlarını belirlediği alanı YEKA ilan etmektedir. Bu işlemin iptali davasının nerede açılacağı konusunda 5346 sayılı yasada özel hüküm bulunmamaktadır. YEKA her zaman tek bir ili kapsamayabilir. Birden çok ili kapsayan YEKA ilanı olabilir. YEKA içindeki taşınmaz maliklerini etkileyen ilanın uygulanmasına yönelik birel idari işlemlerin iptali davasında ise İYUK m34 uyarınca taşınmazın bulunduğu yer mahkemesi yetkilidir. 5346 sayılı Yasa’da YEKA ilanından doğan uyuşmazlıklar ve YEKA sınırları içinde idarelerin tesis ettiği birel idari işlemlerin iptaline ilişkin uyuşmazlıklarda; mahkemelerin görev yetkisine ilişkin 5346 sayılı Kanuna özel hüküm getirilmesinin yararlı olacağı sonucuna varmaktayız. Danıştay, yürürlükteki yargılama usulüne ilişkin kuralları uygulamada duraksama göstermektedir.

Danıştay aşağıdaki kararlarında YEKA ilanının düzenleyici işlem olmadığını belirterek, idari işlem teorisine göre birel idari işlem, düzenleyici idari işlem ayrımını adeta görmezden gelerek, mevcut örnek iptal davalarında usul yönünden dilekçe red veya görev yönünden red kararı vererek, karşılaştığı çaresizliği geçici olarak ertelemeye çalışmaktadır. Fakat bu durum ülkemizde enerji sektöründe de hukukun üstünlüğü ilkesini olumsuz etkilemektedir. Hukuki güvenlik ilkesi; idare, yatırımcı, YEKA içindeki taşınmaz malikini de kapsayan bir ilkedir. Elbette yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde kamunun üstün yararı bulunmaktadır. Ancak hukuki güvenlik ilkesinin ihlaline yol açmayan hukuki alt yapının kurulması hukukun üstünlüğünün zorunlu bir gereğidir. YEKA ilanı idarenin bir işlemi olduğuna göre, Anayasa’nın 125’inci maddesi uyarınca yargısal denetime tabidir. YEKA ilanı ile ilgili iptal davalarında usul yönünden yargı makamlarının verdiği bu kararlar ile YEKA belirleme işleminin hukuka uygunluk denetimindeki kuralların yetersizliği nedeniyle yargılama sürecinin uzunluğu, hem yatırımcı hem de uyuşmazlık konusu YEKA içindeki taşınmaz maliklerinin hukuki güvenliğini yakından etkilemektedir.

DANIŞTAY’IN ETKB’NİN YEKA BELİRLEMESİ VE İLANININ İPTALİ İLE İLGİLİ AÇILAN DAVALARDA VERDİĞİ KARARLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Rüzgar enerjisine dayalı YEKA olarak ilan edilen “UYGAR” YEKA’nın iptali davasında¹⁰, Danıştay davanın Ankara İdare Mahkemesinin görev alanına girdiğinden bahisle görev yönünden red kararı vermiştir. Burada Danıştay’ın kararının gerekçesinden hareket ederek, Danıştay’ın YEKA ilanı işlemine yaklaşımını belirleyebiliriz.

Uyuşmazlık konusu; sınırları ve köşe koordinatları krokiler ve listelerde gösterilen belirli alanların 21/03/2021 tarih ve 31430 sayılı Resmi Gazete’de YEKA ilan edilmesine ilişkin işlemin 11. sırasında “UYGAR” yenilenebilir enerji kaynak alanının ve işleme karşı idareye yapılan başvuruya süresinde cevap verilmemesi işleminin iptali davasıdır. Danıştay davanın kendi görev alanına girmediğini uyuşmazlığın İYUK 34. madde kapsamında da taşınmazlarla ilgili mevzuatın uygulanmasına veya taşınmaza bağlı bir hak kapsamında bulunan bir işleme yönelik olmadığını, YEKA ilanının düzenleyici işlem olmadığını belirterek, İYUK genel yetki kuralı 32. madde uyarınca dava konusu işlemi tesis eden idarenin ETKB’nin bulunduğu Ankara İdare Mahkemesi olduğunu belirterek davanın görev yönünden reddine karar vermiştir.

Danıştay kararı, öncelikle, YEKA ilanının, YEKA içindeki taşınmazlarla ilgili mevzuatın uygulanmasına yol açan bir işlem olma özelliğini dikkate almaması yönünden eleştirilebilir. Şöyle ki, YEKA ilanı sonucunda alandaki özel hukuk kişinin mülkiyetindeki taşınmazın acele kamulaştırılabileceği 5346 sayılı Yasa’nın 4’üncü maddesinde belirtilmektedir. Bu kural, 5346 sayılı Yasa’ya 7226 sayılı yasa ile 2020 yılında yapılan

¹⁰ Danıştay 13. DD. 14.09.2022, E.2022/3079, K.2022/3109; Danıştay 13. DD., 14.09.2022, E.2022/3078, K.2022/3108.

değişiklik ile getirilmiştir. Artık YEKA ilanının alan içindeki taşınmazlarla ilgili mevzuatın uygulanmasına yol açan bir işlem olmadığını ileri sürmek mümkün değildir. YEKA ilanının alanına giren taşınmazların hukuki durumunu etkileyen bir idari işlem olduğu her türlü tartışmadan uzaktır. Dolayısıyla dosyada uyumsuzluğun taşınmazla ilgili olduğu ve İYUK 34. maddenin uygulanması gerektiği sonucuna varmaktayız.

*Diğer bir dosyada uyumsuzluk konusu; sınırları ve köşe koordinatları krokiler ve listelerde gösterilen belirli alanların rüzgar enerjisine dayalı YEKA olarak ilan edilmesine ilişkin 21.03.2021 tarih ve 31430 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan ETKB işleminin iptali istemidir¹¹. Danıştay yurt çapında uygulanan düzenleyici işlem olmadığı gerekçesiyle bu kez görev yönünden red kararı vererek dosyayı Ankara İdare Mahkemesi'ne göndermiştir. YEKA ilanı tek bir il sınırını kapsıyor ise bu davanın ilin bağlı olduğu idare mahkemesinde açılması gerekir. Yukarıda da belirttiğimiz gibi bu ilan sınırları içindeki taşınmazların hukuki durumunu doğrudan doğruya etkilemektedir. Eger YEKA birden fazla ili kapsamına alıyor ise, bu durumda Danıştay Kanunu 24/1-e uyarınca birden çok idare mahkemesinin yetki alanına giren işlerde, Danıştay'ın ilk derece mahkemesi olarak görevli olması gerekir. Bu nedenle Danıştay'ın dava dosyasındaki yurt çapında uygulanan düzenleyici işlem olmadığı yönündeki gerekçesinin de, Danıştay Kanunu 24. maddeye ve İYUK'na uygun olmadığı sonucuna varmaktayız. İmar planı da yurt çapında uygulanan düzenleyici işlem değildir. Yurt çapında uygulanmayan düzenleyici işlemler de vardır. Bu nedenle Danıştay kararına ve gerekçesine katılmak mümkün değildir.

*Diğer bir uyumsuzluk konusu, İzmir ili, Tire ilçesi,2.796.626 metrekare orman niteliğindeki taşınmaz ile ... 3.115782 metrekare orman niteliğindeki taşınmazın tapu kayıtları üzerine YEKA şerhi konulmasına ilişkin birbiriyle bağlantılı; Resmi Gazetede yayımlanan rüzgar enerjisine dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanlar ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanı, Yarışma İhalesi, Yarışma ihalesi sonucunda firma ile ETKB arasında imzalanan YEKA kullanım Hakkı Sözleşmesi, YEKA ilanı, YEKA şerhlerinin, tüm bu işlemlerin dayanağı olan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları Yönetmeliğinin 5. maddesinin iptali istemidir¹².

Tek dava dilekçesi ile açılan bu davada Danıştay ilk derece mahkemesi olarak davanın ilk inceleme aşamasında İYUK 5. madde kapsamında değerlendirme yaparak dilekçe red kararı vermiştir.

Kural olarak her idari işleme karşı idari yargıda ayrı dava açılır. Ancak İYUK 5. maddeye göre aralarında maddi veya hukuki yönden bağıllık, ya da sebep sonuç ilişkisi bulunan birden fazla işleme karşı tek dilekçe ile dava açılabilir. Bu davada davacı tek dilekçe ile davasını açmıştır. Dava konusu işlemler arasında neden sonuç ilişkisi açıkça tespit edilebilir durumdadır. Yönetmeliğe dayanarak yarışma ilanı açılmıştır, yarışma ihalesi yapılmıştır, firma ile kullanım hakkı sözleşmesi imzalanmıştır, YEKA ilanı verilmiştir, YEKA şerhi verilmiştir, tüm bu işlemlerin hukuki dayanağı da Yönetmeliktir. Kısaca işlemler arasında neden sonuç ilişkisi bulunmaktadır. Fakat bu kez de dava konusu işlemler ile ilgili uyumsuzluklar, İYUK'daki farklı yargılama usulü kurallarının uygulanmasını gerektirmektedir. Şöyle ki, 2547 sayılı Yasanın 20/A-1-a da ihaleden yasaklama kararları hariç ihale işlemlerinden doğan uyumsuzluklarda ivedi yargılama usulünün uygulanacağı belirtilmektedir. İhale işlemlerinin iptali davasında ivedi yargılama usulü dava açma süresi ve yasa yolları ve süresi bakımından diğer genel kurallardan farklılık göstermektedir. Ayrıca Danıştay gerekçesinde; ihale sürecinin dayanağı olan iki temel kanunun, Devlet İhale Kanunu ve Kamu İhale Kanunu olmak üzere mevcut olduğunu belirtmektedir. Danıştay'ın gerekçesinde Yarışma İhalesinin hangi kurallara göre yapıldığı konusunda da belirsizlik olduğunu vurguladığı belirtilebilir.

Danıştay'ın 2022/2040 karar metni aşağıda aynen aktarılmaktadır. “... iptali istenen uygulama işlemlerinden 07/11/2018 tarih ve 30588 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Rüzgar Enerjisine Dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanlar ve Bağlantı Kapasitesinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanının yarışma ihalesinin ve yarışma ihalesi sonucunda firma ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı arasında imzalanan YEKA kullanım Hakkı Sözleşmesi'nin iptali istemine ilişkin uyumsuzlukların 2577 sayılı Kanun'un 20/A maddesi uyarınca ivedi yargılama usulüne tabi olduğu ve bu usule göre yargılama yapılması gerektiği, buna karşılık, öncelikle sonuçlandırılması özel önem taşıyan uyumsuzluk olarak nitelendirilmesine imkan bulunmayan 21/03/2021 tarih ve 31430 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan YEKA ilanı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'ne yazılan ... tarih ve ... sayılı yazı, ... tarih ve ...sayılı... Kadastro Müdürlüğü'nün ... Tapu Müdürlüğü'ne yazdığı yazı ile orman nitelikli taşınmazlar üzerine konulan tüm YEKA şerhlerinin iptali istemlerinden kaynaklanan dava konusu uyumsuzlukların ise ivedi yargılama usulü kapsamında yer almadığı, bu bakımdan, anılan istemlerin ivedi yargılama usulüne tabi ihale işlemlerinden

¹¹ Danıştay 13. DD., 23.03.2022, E.2022/1366, K.2022/1190

¹² Danıştay,16.05.2022, E.2022/2248, K.2022/2040.

ayrı incelenmesi gerektiği, bu ayrıma göre açılacak davaların ilk inceleme usulleri, dava açma süreleri ve kanun yollarının da farklı olduğunu belirtmektedir.

Bu durumda, farklı yargılama usullerine tabi istemler hakkında, ayrı ayrı dava açılması gerektiği halde aynı dilekçeyle dava açılmasının 2577 sayılı Kanun'un 5. maddesine göre mümkün olmadığı sonucuna varıldığından, davaya konu olan her bir uygulama işleminin varsa yazılı bildirim yada öğrenilme tarihine yer verilmesi suretiyle:

07/11/2018 tarih ve 30588 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Rüzgar Enerjisine Dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanlar ve Bağlantı Kapasitesinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanının yarışma ihalesinin ve yarışma ihalesi sonucunda firma ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı arasında imzalanan YEKA kullanım Hakkı Sözleşmesi'nin ve dayanak Yönetmelik maddesinin iptali istemiyle ayrı,

21/03/2021 tarih ve 31430 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan YEKA ilanı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'ne yazılan ... tarih ve ... sayılı yazı, ... tarih ve ...sayılı... Kadastro Müdürlüğü'nün ... Tapu Müdürlüğü'ne yazdığı yazı ile orman nitelikli taşınmazlar üzerine konulan tüm YEKA şerhlerinin ve dayanağı Yönetmelik maddesinin iptali istemiyle ayrı dilekçelerle dava açılması gerekmektedir..."

YEKA'nın belirlenmesinde Yarışma Usulünün uygulandığı durumlar da, yukarıdaki dosya örneğinde olduğu gibi ayrıca uyumsuzluk konusu olabilmektedir. 5346 sayılı Yasa'nın uygulanmasını göstermek üzere yürürlüğe konulan yönetmelik idarenin tek yanlı düzenleyici idari işlemidir. Düzenleyici idari işlemler uygulama işlemi ile birlikte, uygulama işlemine ilişkin dava açma süresi içinde her zaman iptal davasına konu olabilir. Yarışma Usulü, Yarışma İhalesini gerektirmektedir. Genel olarak ihale, idarenin sözleşme yapmak üzere, sözleşme imzalanıncaya kadar idarenin ve ihaleye katılacakların uymakla yükümlü olduğu süreci ifade eder. İhale süreci kendine özgü kurallar ile düzenlenen özel idari usul sürecidir¹³. Bu sürecin özelliği birden çok tek yanlı idari işlem içermesidir. İhale ilanı, ihale komisyonun oluşturulması, tekliflerin değerlendirilmesi, tekliflerden birinin kabulü veya tüm tekliflerin reddi gibi kararlar idarenin tek yanlı idari işlemi niteliğinde olup, idari yargının hukukilik denetimine tabidir. Üstelik bu tür işlemler idare hukukunda ayrılabilir işlem kuramına göre sözleşme imzalanmış olsa dahi, dava açma süresi henüz geçmemiş ise hukukilik denetimine tabidir. İhale süreci, tam, gerçek ve sağlıklı bir rekabet ortamı gerektirmektedir. İdarenin açacağı ihalelerde kamu düzenine ilişkin ihale sürecinin yasa ile belirlenmesi, idarenin kanuniliği ilkesinin bir gereğidir. 5346 sayılı Yasa kapsamında yarışma usulünde ihale sürecinin Yönetmelik ile düzenlenmesi de idarenin kanuniliği ilkesi ile bağdaşmamaktadır.

Kanımızca yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde etkin verimli bir şekilde yararlanmak için öncelikle gerek Bakanlık tarafından gerekse Yarışma Usulü ile YEKA belirlenmesi süreçlerinin kanunilik ilkesine uygun olarak 5346 sayılı Yasa'da net bir şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Yönetmelik ancak Yasa'nın uygulanmasına yönelik yasaya uygun kuralları içerebilir. Yasa ile düzenlenmesi gereken bir konu Yönetmelik ile düzenlenir ise görev gasbı meydana gelir. Bu ise çok ağır hukuka aykırılık örneğidir.

Ayrıca YEKA ilanı, kapsamına giren taşınmazlar üzerinde hukuki sonuç doğurmaktadır, mevcut imar planlarının YEKA ile uyumlu hale getirilmesi gerekmekte, hazırlanacak imar planları da YEKA göre hazırlanmaktadır. Dolayısıyla YEKA'nın sınırları içindeki taşınmazları etkilemediğini ileri süren Danıştay kararlarına katılmak mümkün değildir.

Diğer bir husus da, Danıştay'ın YEKA'nın yurt çapında uygulanan bir düzenleyici işlem olmadığı yönündeki yaklaşımıdır. Elbette YEKA ilan edilen sınırlar içinde uygulama alanı bulan bir idari işlemdir. Tıpkı her belediyenin kendi sınırı içindeki taşınmazları kapsamına alan imar planının sınırları gibidir. İmar planları yurt çapında uygulanmamaktadır. İmar planı, belediye sınırları içerisinde şehir ve plancılık ilkelerine uygun olarak düzenleme yapan belediyenin düzenleyici idari işlemidir. İYUK 34. maddeye göre imar planından doğan uyumsuzluklarda, belediyenin bağlı olduğu ilin yargı çevresinde bulunduğu il idare mahkemesi yetkilidir. Bakanlığın YEKA ilanındaki sınır koordinatları tek bir ili kapsamakta ise tıpkı imar planından doğan uyumsuzluklarda olduğu gibi, ilin yargı çevresinde bulunduğu il idare mahkemesinin yetkili olması gerekir. YEKA koordinatları, birden fazla il sınırını kapsıyorsa yetkili idare mahkemesinin, davacının taşınmazının hangi ilde bulunduğuna göre belirlenmesi gerekebilir. Bu da tek YEKA için farklı il idare mahkemesinde davalar açılması yolunu açar. Bu nedenle koordinatları birden fazla ili kapsayan YEKA'larla ilgili

¹³ Kutlu, Meltem, İdare Sözleşmelerinde İhale Süreci, DEÜ Yayını, İzmir 1997.

uyuşmazlıkların, ilk derece mahkemesi olarak Danıştay'da çözümlenmesi usul ekonomisi bakımından daha uygun olabilir. Kaldı ki Danıştay Kanunu 24/1-(e) deki kuralın gereği de budur.

*Diğer bir uyuşmazlık konusu; sınırları ile köşe koordinatları krokiler ve listelerde gösterilen belirli alanların rüzgar enerjisine dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) olarak ilan edilmesine ilişkin 21/03/2021 tarih ve 31430 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan işlemin 9. sırasında yer alan "İhlamur" YEKA'nın bir başka şirketin maden işletme ruhsat sahası ile girişimli bulunduğu alanlar yönünden iptali istenmektedir¹⁴.

Ruhsat sahibi, taşınmazının bulunduğu yer idare mahkemesinde YEKA ilanının iptali için dava açmıştır. Balıkesir idare Mahkemesi Bakanlığın YEKA ilanının birden çok ili kapsadığı için birden çok idare mahkemesinin yetki alanında giren düzenleyici işlem niteliğinde olduğunu belirterek 2575 sayılı Danıştay Kanunu 24/1- e bendi kapsamında ilk derece mahkemesi olarak Danıştay görevli olduğundan görev yönünden red kararı vermiştir.

Danıştay ise çok ilginçtir uyuşmazlığın taşınmaz mal ile ilgili olduğunu belirterek İYUK 34. madde uyarınca Balıkesir İdare Mahkemesinin yetkili olduğunu belirterek görev ve yetki yönünden dosyayı Balıkesir İdare Mahkemesine göndermiştir. Ancak gerekçeye YEKA ilanının düzenleyici işlem niteliğinde olmadığını da ayrıca eklemiştir.

Danıştay kararında, YEKA ilanının düzenleyici işlem olmadığını ısrarla belirtmektedir. Oysa koordinatları belirlenen bu alanda artık 5346 sayılı Yasa kuralları otomatik olarak devreye girmektedir. Bu koordinatlar içindeki alanın statüsü YEKA'dır. YEKA statüsü o yerdeki imar planını ve taşınmazları etkilemektedir. Hatta acele kamulaştırma yolu açılmaktadır. Koordinatların belirlenmesi neye göredir? 5346 sayılı Yasa'da bu konuda açık bir düzenleme yoktur. ETBK yasa sınırları içinde yetki kullanabilir. Yasada bu konuda kural olmaması, koordinatların keyfi belirleneceği anlamına gelmemektedir. Kaldı ki, idarenin işlemlerinin nihai amacı kamu yararadır. İdarenin tüm işlemleri de bu bakımdan hukukilik denetimine tabidir. YEKA ilanı da koordinatları düzenleyen, belirleyen belli bir alanın statüsünü 5346 sayılı yasa kapsamına alan bir idari işlem olduğu için kanımızca düzenleyici işlem niteliğindedir.

SONUÇ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından planlı bir şekilde en yüksek verimlilikle elektrik enerjisi üretmek amacıyla ilan edilen YEKA kullanımının ve sürdürülebilirliğinin hukuki güvenlik içinde gerçekleşmesi zorunludur. Mülkiyet hakkı, hak arama özgürlüğü, hukuki güvenlik ilkesi, idari istikrar, hukuki belirlilik, özel girişim özgürlüğü gibi temel hukuki kavramlarla çok yakından ilgili YEKA kavramının hukuki alt yapısının güçlendirilmesi idare, bireyler ve yatırımcı başta olmak üzere herkesin yararınadır.

Koordinatları ETKB tarafından belirlenen YEKA'da, artık 5346 sayılı Yasa kuralları çerçevesinde uygulama yapılacaktır. Bu koordinatlar içindeki alanın statüsünü değiştiren bir işlem Resmi Gazete'de ilan ile yürürlüğe girmektedir. Bu statü çevre düzeni planı olmak üzere her ölçekteki imar planını dolayısıyla alan içindeki taşınmazları etkilemektedir. Danıştay yerleşik içtihatlarına göre düzenleyici işlem özelliği ağırlıklı karma işlem olarak nitelendirilen imar planını, değiştirme gücünde olduğuna göre, YEKA'nın düzenleyici işlem olmadığı yönünde kararlar vermek çelişkili bir durum olsa gerektir.

YEKA ilanı ile koordinatları içinde acele kamulaştırma yolu da açılmaktadır. Koordinatların belirlenmesi neye göredir? 5346 sayılı Yasa'da bu konuda açık bir düzenleme yoktur. ETBK yasa sınırları içinde yetki kullanabilir. Yasada bu konuda kural olmaması, koordinatların keyfi belirleneceği anlamına gelmemektedir. Ayrıca yenilebilir enerji kaynaklarından en az birinin yoğunluk taşıdığı alan olma özelliği taşıyan YEKA'da, hangi enerji kaynağının yoğun olduğu bakımından da koordinat belirleme işleminin hukukilik denetimi gerekir. İdarenin işlemlerinin nihai amacı kamu yararadır. İdarenin tüm işlemleri gibi YEKA belirleme işlemi de hukukilik denetimine tabidir.

YEKA'nın belirlenmesi yönündeki bakanlık işlemi, yenilenebilir enerji kaynağının kullanımı ile ilgili koordinatları düzenleyen yani sınırı belirleyen, belirli alanın statüsünü değiştirip, 5346 sayılı yasa kapsamına alan, çevre düzeni ve imar planlarını etkileyen, acele kamulaştırma uygulaması yolunu açan genel, soyut koordinatları içindeki taşınmazları kapsayan, alan içinde faaliyetlerin sürekliliğini sağlayan, örneğin elektrik üretimi ile ilgili uygulama işlemi yapılan, bir veya birden çok ili kapsayacak şekilde geniş bir alanı kapsama

¹⁴ Danıştay 8. DD., 01.02.2023, E.2023/209, K.2023/260.

özelliği olan, bir idari işlem olduğu için düzenleyici işlem niteliğindedir. Bu durumda, işlemin denetimi yetki şekil, sebep, konu, amaç bakımından idari yargının görev alanına girmektedir. Yetkili mahkeme ise İYUK 34. madde uyarınca YEKA'nın koordinatları, tek bir il sınırı içinde kalıyor ise o yer idare mahkemesidir. YEKA sınırı, birden fazla ili kapsıyor ise Danıştay Kanunu 24. madde uyarınca YEKA belirleme işleminden doğan uyuşmazlık, ilk derece mahkemesi olarak Danıştay'ın görev alanına girer.

Büyük yatırımlar gerektiren bu alanda idare hukuku kavramlarını zorlayarak çözüm üretmek, hukuki değerlerimizi olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle 5346 sayılı Yasa'da bu tartışmaları sona erdirecek açıklıkta, anlaşılabilir ve hukuk sistemimizdeki kavramlarla uyumlu YEKA ile ilgili özel hükümlerin ivedilikle gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

AKYILMAZ Bahtiyar/SEZGİNER Murat/KAYA, Cemil, Türk İdare Hukuku, Ankara 2024.

ÇAPTUĞ, Mehpare, İdari Usul Hukukunda Hukuki Güvenlik İlkesi, Ankara 2023.

DURAN, Lutfi, İdare Hukuku Ders Notları, İHFY, İstanbul 1982.

KUTLU GÜRSEL, Meltem, İdare Sözleşmelerinde İhale Süreci, DEÜ yayını, İzmir 1997.

KUTLU GÜRSEL, Meltem, Kamulaştırma Hukuku, Seçkin Kitabevi, Ankara 2019.

KUTLU GÜRSEL, Meltem, Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanlarında Kamulaştırma Uygulaması, Sürdürülebilirlik Toplumsal Dönüşüm, Nobel, Ankara 2023, s.199 vd.

KUTLU GÜRSEL, Meltem, Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu Kapsamında Kamulaştırma Uygulaması", 7th_International Istanbul Proceedings Book.pdf, 2021, s.509 vd.

KUTLU GÜRSEL, Meltem, Hukuki Açıldan Jeotermal Enerji, International World Energy Conference, Kayseri, Türkiye, 3 - 04 Aralık 2021, FULL TEXT BOOK, İksad Yayınevi 2021s.53 vd.

ÖZTABAN (YAĞCI), Pınar, Rüzgar Enerjisinin İdare Hukuku Açısından İncelenmesi, Ankara 2019.

YILDIRIM, Turan/YASİN, Melikşah/KAMAN, Nur/ÖZDEMİR, Eyüp/ÜSTÜN, Gül/OKAY TEKİNSOY, Özge, İdare Hukuku, İstanbul 2024.

**MALZEME KUZNETS EĞRİSİ'NE İLİŞKİN SİSTEMATİK BİR DERLEME****Dr. Öğr. Üyesi Fatih Volkan AYYILDIZ¹**

¹ Ordu Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Ordu, Türkiye
¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5991-3574>

Doç. Dr. Güller ŞAHİN²

² Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Rektörlük, Kütahya, Türkiye
²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-7834>

Özet

Çevresel Kuznets Eğrisi hipotezinin aksine literatürün oldukça kısıtlı bir alanını oluşturduğu için bu çalışmada, Malzeme Kuznets Eğrisi (MKC) hipotezine ilişkin sistematik literatür derlemesine odaklanılmaktadır. Focacci (2005) tarafından tanımlanan MKC kavramı, ekonomik büyümenin materyalizasyona yol açabileceği ve malzeme tüketiminin kalkınma için ön koşul olabileceğine ilişkindir. Hipotezin temel mantığı, tarım sektörünün baskın olduğu kalkınmanın erken aşamalarında malzeme yoğunluğunun düşük olması, sanayi sektörüne geçişle birlikte malzeme kullanımının ve çevresel bozulmanın artması, sektör belirli bir doygunluk seviyesine ulaşmış hizmetlere doğru geçtiğinde ise pozitif eğilimin tersine dönmesi ve malzeme yoğunluğundaki artışın yavaşlama eğiliminin çevresel kaliteyi artırmasıdır. OECD (2018) raporuna göre günümüzde sera gazı emisyonlarının yarısından fazlası, malzeme yönetimi faaliyetleri ile ilgilidir. Dünya nüfusuna ilişkin gelecek senaryosu, artan nüfusla birlikte mal ve hizmetlere yönelik küresel talebin güçlü bir şekilde artacağına dayanmaktadır. Dünya genelinde kullanılan malzeme miktarının 1970-1990 döneminde üç katına çıktığı belirtilmektedir. OECD senaryolarına göre, ekonomik büyümenin 2011-2060 arasında dört katına çıkacağı ve küresel malzeme tüketiminin iki katından fazla artacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda malzeme kullanımındaki artışın kaynaklar üzerindeki baskıyı artırması, refah ve sürdürülebilirlik alanındaki kazanımları tehlikeye atması, su, hava ve toprak kirliliğinden biyolojik çeşitlilik kaybına kadar uzanan farklı çevre sorunlarına neden olacağı muhtemeldir.

Anahtar Kelimeler: Çevre kalitesi, Ekonomik büyüme, Malzeme Kuznets Eğrisi hipotezi, Sistematik literatür derlemesi.

A SYSTEMATIC COMPILATION OF THE MATERIAL KUZNETS CURVE**Abstract**

This study focuses on the systematic literature review of the Material Kuznets Curve (MKC) hypothesis, as it constitutes a very limited area of literature, unlike the Environmental Kuznets Curve hypothesis. The concept of MKC defined by Focacci (2005) relates that economic growth can lead to materialization and material consumption can be a prerequisite for development. The basic logic of the hypothesis is that material intensity is low in the early stages of development when the agricultural sector is dominant, material use and environmental degradation increase with the transition to the industrial sector, and when the sector reaches a certain level of saturation and moves towards services, the positive trend reverses and the slowdown in the increase in material intensity increases environmental quality. According to the OECD (2018) report, more than half of today's greenhouse gas emissions are related to material management activities. The future scenario for the world population is based on the fact that the global demand for goods and services will increase strongly with the increasing population. It is stated that the amount of materials used worldwide has tripled in the period 1970-1990. According to the OECD scenarios, economic growth is expected to quadruple between 2011-2060 and global material consumption will more than double. In this context, the increase in material use is likely to increase the pressure on resources, jeopardize the gains in welfare and sustainability, and cause various environmental problems ranging from water, air and soil pollution to biodiversity loss.

Keywords: Environmental quality, Economic growth, Material Kuznets Curve hypothesis, Systematic literature review.

GİRİŞ

Ekonomik büyümenin artan nüfus için sürekli gelir artışı sağlayamadığı yüzyıllar süren Malthusçu dinamiklerden sonra Sanayi Devrimi, tüm dünyada eş benzeri görülmemiş bir refah çağını başlatmıştır. Kişi başına çıktıdaki sürekli büyüme durumu, yaşam standartlarındaki küresel eşitsizliklere rağmen refah artışları sağlamıştır. Bununla birlikte İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra farklı ekonomik olgularla birlikte gerçekleşen ekonomik büyüme, oldukça yüksek miktarlarda seyretmiştir. Nüfus projeksiyonları, 1950 yılında tahmini 2.5 milyar olan dünya nüfusunun 2022 yılında 8 milyar kişiye ulaştığını göstermiştir. Küresel nüfusun hızla artması, tüketim alışkanlıklarının aniden yükselmesi ve ekonomik büyüme rakamlarında görülen hızlı artışlar nedeniyle bu dönem, 'büyük hızlanma' olarak tanımlanmaktadır. Ancak tarihsel süreçteki söz konusu ilerleme, daha fazla doğal kaynak kullanımına ve büyük ölçüde enerji yoğun fosil yakıtların tüketimine atfedilmektedir. Dolayısıyla eş benzeri görülmemiş bu refah, giderek daha büyük çevresel etkilere yol açan sera gazı emisyonlarına ve buna bağlı olarak küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olan kritik bir belirleyici olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda ekonomilerin mal ve hizmet talebini karşılamak için ihtiyaç duyduğu büyük miktarlardaki kaynak çıkarımını da doğrulamaktadır. Sanayileşen ülkelerin, malzeme kullanımındaki artışla aynı zamana denk gelen ekonomik büyüme yaşadıkları görülmektedir. 'Antroposen' dönem şeklinde nitelendirilen bu çağda kaynaklar, gezegenin kapasitesinin yaklaşık iki katı daha fazla oranda kullanılmıştır. Malzemeler açısından sonlu bir dünyada, kaynakların tüketimi ve iktisadi kalkınma ile bağlantısı ekonomiler için zorluklar oluşturmaktadır (Charlier ve Fizaine, 2023; Fernström ve Järvinen, 2022; GFN, 2022; UN, 2024). Ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerinin hızlanması ise insan yaşamını ve gezegen sağlığını tehdit etmeye devam etmektedir. Bu bağlamda modern ekonomik büyümenin aynı anda yaşam koşullarını iyileştirme ve tehdit etme paradoksunun içine sıkıştığı değerlendirilmektedir.

Dünya ekonomisi, iki yüzyıldan fazla süredir doğayı egemenliği altına almaya ve yeniden şekillendirmeye çalışmaktadır. Bunun yanı sıra doğal çevre ise ekonomileri giderek daha fazla sınırlandırmaktadır. Belirtilen arka plan doğrultusunda ekonomik büyümeyi çevresel etkilerden ayırştırmak, akademik literatürde ve küresel politika arenasında tartışılmaya devam etmektedir. Bu bağlamda 1954 yılında Amerikan Ekonomi Derneği'nde yaptığı başkanlık konuşmasında Kuznets (1955) tarafından öne sürülen ekonomik kalkınma derecesi ile gelir eşitsizliği arasındaki ters U şeklindeki ilişkiye benzetilerek türetilen Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezi, literatürün kapsamlı bir alanını oluşturmaktadır. Grossman ve Krueger (1991, 1995) ile Holtz-Eakin ve Selden'in (1995) öncü çalışmalarında, ekonomik faaliyetler ile çevre kalitesi arasındaki ilişkinin ters U şeklinde bir eğilim izlediği savunulmaktadır. Dolayısıyla büyüme ile çevre kalitesi arasında doğrusal olmayan bir ilişkiye vurgu yapılmaktadır. Söz konusu çalışmalarda, büyümenin erken aşamalarında çevre kirliliğinin derinleştiği, belirli bir eşik seviyeye ulaştıktan sonra ise azalmaya başladığı belirtilmektedir. Bu çerçevede özellikle gelişmekte olan ülkeler için ekonomik büyüme ile çevre kirliliği arasında bir tercih mekanizması işlemekte ve öncelikler belirlenmektedir. EKC hipotezinin savunucuları, ülkelerin öncelikle ekonomik büyümeye odaklanmaları gerektiğini, ardından tercihlerin temiz çevreye yöneleceğini ifade etmektedirler.

Ekonomi ile çevresel etkiler arasındaki bağlantı, uzun zamandır çevre sorunları tartışmasında önemli bir konu olmuştur. 1990'lardan itibaren bu bağlantı, çevre politikalarında da yerini almıştır. Doğal kaynakların kullanımının ekonomik büyümeden ayırştırılması, Avrupa Komisyonu'nun Altıncı Çevre Eylem Programı'nda politika hedeflerinden birisi olarak belirlenmiştir. Bilimsel tartışmada EKC kavramı, ekonomik büyümeyi çevresel etkilerden ayırştırmak ya da bağlantısızlık olgusuyla yakından ilgilidir (Vehmas vd., 2007). Genellikle kişi başına GSYH parametresi ile ölçülen ekonomik kalkınma seviyesi ve kirlilik ya da kişi başına emisyonlar arasında ters U şeklindeki bir ilişkiyi varsayan EKC hipotezi, çevre ekonomisinde çok yaygın incelenen ampirik ilişkilerden birisidir (Wagner, 2023).

EKC hipotezi, bilimsel literatürün oldukça geniş bir alanını oluşturmasına rağmen dört noktada eleştirilmektedir. Bunlardan ilki, hipotezin sonuçlarının ikna edici bir onay veya ret seviyesine ulaşamamış olmasıdır. Bu kapsamda elde edilen kanıtların homojenlik niteliği göstermediği ve analizlerde kullanılan kirleticilere, ülkelere, sektörler ve metodolojilere bağlı olarak farklılıklar içerdiği görülmektedir. Dolayısıyla bu durum bir bölgenin, sektörün veya kirleticinin sonuçlarının uygulamada oldukça düşük bir dış geçerlilik seviyesine işaret etmektedir. Aynı zamanda literatürde yapılan araştırmaların çoğunlukla üretimden kaynaklı CO₂ emisyonlarına odaklandığı desteklenmektedir. Bu ise ithal mallardan ve yatırımların yarattığı talepten kaynaklanan toplam emisyonları yönlendiren mal ve hizmetlere yönelik derneşik talebin gösterilemediği anlamına gelmektedir. Toplam emisyonların az gelişmiş ülkelere olası ihracı nedeniyle gelişmiş ülkelerin toplam emisyonları konusunda kör nokta meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla sadece bölgesel emisyonların dikkate alınması olası ticaret dışsallıklarının gizli kalmasına neden olabilmektedir. Bu çerçevede gelişmiş

ülkeler, emisyonlarını ihraç ederek sürdürülebilir hale gelip EKC hipotezini doğrulasalar bile diğer ülkelerin bunu yapması oldukça zor görünmektedir. Buna bağlı olarak EKC'nin ampirik olarak incelenmesinde bölgesel CO₂ emisyonları, çevresel bozulma için tek başına yeterince iyi bir gösterge olmayabilir. İkinci eleştiri noktası, ekonomiler büyüdüğünde ve kaynak verimliliğinin arttığı, fosil yakıtların aşamalı olarak kullanımdan kaldırılıp yenilenebilir enerji kaynaklarıyla değiştirildiği yeşil geçişe doğru ilerlediğinde, bu durumun mutlaka tüm çevresel bozulmanın durduğu anlamına gelmediğidir. Örneğin birçok yeşil teknoloji, elektrikli araba aküleri durumunda lityum gibi nadir bulunan minerallerin büyük miktarda doğal kaynak kullanımına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle ham madde çıkarımı ve bunu izleyen süreçlerdeki olası çevresel bozulma, büyüyen bir ekonomiyle birlikte artabilmektedir. Bu ölçümler, çevresel etkilerin bütünsel perspektifini gözlemlemek için yönlendirildiğinde ayrışmanın hiçbir yerde bulunmadığı bir duruma yol açabilmektedir. Aynı zamanda farklı türlerde çıkarma işlemi gerektiren yeni teknolojiler, başlangıçta hesaba katılmayan süreçte salınacak yeni türde toksinleri de içerebilmektedir. Üçüncü nokta, EKC hipotezinin geleneksel olarak tüm çevresel bozulmanın sonunda onarılabileceği ve ekonominin gelişmesiyle birlikte belirli miktardaki bozulmanın uzun vadede haklı gösterilebileceği örtük varsayımını benimsediğidir. Ancak biyolojik çeşitlilik kaybı durumunda olduğu gibi çevresel bozulmanın etkileri irreversible ve kapsamı oldukça geniştir. Bu durum EKC'nin bir olgu olarak belirli alanlarda çevresel restorasyon için gerçekte ne kadar önemli olduğu ve gelişmenin gerçekten ne kadar haklı olduğu sorularını gündeme taşımaktadır. Ayrıca EKC, doğadan ekonomiye hiçbir geri bildirim olmaması varsayımıyla bağlantılı olduğu için çevresel yıkım hangi ölçüde olursa olsun büyümenin yine de sonsuz olabileceği anlamına gelmektedir. Son eleştiri noktası ise yoksul ve gelişmekte olan ülkelerin gelişmiş ülkeler kadar ucuz hammadde ve işgücü ithal etme fırsatlarının bulunmamasıdır. Dünyadaki her ülkenin çevresel bozulmayı azaltabileceği bir eşik noktası ve ekonomilerini sanayileşme süreci sonrasında daha çok hizmet tabanlı bir duruma getirebileceği varsayımının gerçekçi bir çıkarım olmayacağıdır (Ansari vd., 2020; Fernström ve Järvinen, 2022; Karsch, 2019; Mukiyen Avcı, 2023).

Söz konusu eleştiriler, bazı araştırmacıların EKC hipotezini sadece CO₂ veya diğer sera gazı emisyonlarını kullanarak değil daha geniş bir kapsamda ele alarak revize etmesine yol açmıştır. Bu bağlamda ülkelerin ham madde çıkarma gibi malzeme ayak izlerinin incelendiği Malzeme Kuznets Eğrisi (MKC) literatürünün oluşmaya başladığı görülmektedir. EKC hipotezinin aksine literatürün oldukça kısıtlı bir alanını oluşturduğu için bu çalışmada, kavramsal düzlemde Focacci (2005) tarafından tanımlanan MKC hipotezine yönelik sistematik literatür derlemesine odaklanılmaktadır. Amaç çerçevesinde çalışmanın örneği, giriş kısmının ardılı MKC hipotezine ilişkin tarihsel izlek ve özelliklerin açıklanmasıyla devam etmektedir. Sonrasında ise sistematik literatür derlemesine yer verilmekte, sonuç ve politika önerileri ile çalışma tamamlanmaktadır.

MALZEME KUZNETS EĞRİSİ HİPOTEZİ

Ekonomi ile çevre arasındaki kaynak akışları, ekonominin fiziksel temelini oluşturmakla birlikte aynı zamanda insan faaliyetleri ile çevresel etkiler arasındaki köprüyü de kurmaktadır. Bunun yanı sıra kaynak çıkarma, işleme ve ardından gelen malzeme akışları ve stokları ile ilişkili çevresel yükler de taşımaktadır. Malzeme akışları, ulusal ekonomileri sürdürülebilmek için gerekli olan kritik bir belirleyicidir. Bununla birlikte toplu malzeme akışları, genellikle çevresel bozulmanın makro düzeydeki önemli bir temsilcisi olarak kabul edilmektedir. Hammaddeler, mal ve hizmet üretim sürecine girerek üretim sürecinin sonunda kirlilik çıktıları olarak atılmaktadır. Kaynak akışlarının çevresel yükü teşvik etmesi ise atık ve emisyonların artmasıyla sonuçlanmaktadır. Uzun vadede kaynakların çıkarılması, işlenmesi ve kullanımından kaynaklanan kirlilik ise sürdürülebilir kalkınma için sorunlar oluşturmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma endişeleri ile birlikte kanıtlar, özellikle farklı malzemelerin kullanımından kaynaklanan çevresel hasarı değerlendirmede zorluklar olduğunda çoğu durumda çevresel bozulmaya karşı temkinli bir yaklaşım izlemenin önemini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla malzeme kullanımının ve etkilerinin azaltılması, kaynak girdilerinin minimize edilmesini gerektirmektedir. Kaynak tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin azaltılması ise kaynak verimliliğindeki ve üretkenliğindeki artışları zorunlu kılmaktadır (Bringezu vd., 2004; Canas vd., 2003; Vehmas vd., 2007).

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra çoğu gelişmiş ülkenin ekonomilerini yeniden inşa etmek için yaptıkları büyük yatırımlar nedeniyle metal tüketimlerini hızla arttırdıkları görülmüştür. Metal tüketimindeki bu hızlı artış, metal arzı konusunda endişelere ve kaynakların tükenmesi korkusuna yol açmıştır. Ancak 1970'li yıllarda metal tüketim oranı, temel olarak petrol krizleri ve küresel ekonomik büyümedeki genel düşüş nedeniyle azalmaya başlamıştır. Metal piyasasının küresel ekonomideki sıçrayışlara ve durgunluklara karşı duyarlı

olması nedeniyle metal talebindeki azalışın ilk başlarda geçici olduğuna inanılsa da söz konusu düşüşün uzun süreli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu olgu için olası bir açıklama, ilk olarak Uluslararası Demir ve Çelik Birliği tarafından ortaya atılan, ancak Malenbaum (1973, 1978) tarafından popülerleştirilen ‘kullanım yoğunluğu hipotezi’ ile ifade edilmiştir. Hipotezin temel varsayımı, metal kullanım yoğunluğunun bir ülkenin ekonomik gelişmesine bağlı olduğudur. Ancak ihtiyaç duyulan metal miktarının bir ekonominin gelişme döngüsü boyunca dinamik olması nedeniyle çelik tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığına inanılmaktadır. Nispeten daha yoksul ülkelerde yüksek ekonomik büyüme, genellikle mineral tüketimindeki yüksek büyüme anlamına gelen sanayileşme aşamasıyla ilişkilidir. Ekonomik gelişme süreci ilerledikçe metal tüketimindeki büyüme, hizmet sektöründeki büyüme ile birlikte azalmaktadır. Hizmet sektöründeki daha az malzeme talebi, metallerin kullanım yoğunluğunu önce yavaşlatmakta, ardılı kişi başına GSYH arttığında azalmaya başlamaktadır. Açıklamalar doğrultusunda kullanım yoğunluğu eğrisi, ters U şeklinde bir forma sahiptir. Kullanım yoğunluğunun azalmaya başladığı kişi başına GSYH düzeyi ise zirve olarak tanımlanmaktadır (Wårell, 2014).

Kullanım yoğunluğu hipotezi, bir malzemenin çıktı birimi başına kullanılan miktarı veya kullanım yoğunluğu ile kişi başına GSYH’de yansıtılan ekonomik kalkınma düzeyi arasında ters U şeklinde bir ilişki olduğunu belirtmektedir. Doğrusal bir eğilim izlemeyen bu ilişkinin varlığı, ilk olarak Malenbaum (1973) tarafından çelik talebi bağlamında öne sürülmüştür. Kişi başına gelir düzeylerinin düşük olduğu ekonomik büyümenin erken aşamalarında, gelişmemiş ya da az gelişmiş ekonomiler büyük ölçüde mekanize olmayan tarıma dayalı olduğundan malzeme gereksinimleri de düşüktür. Sanayileşme düzeyi arttıkça imalat, inşaat ve diğer malzeme yoğun faaliyetler de genişlemektedir. Ancak kalkınma sürecinin ilerleyen aşamalarında evlere, fabrikalara, yollara, otomobillere ve makinelere olan ihtiyaçlar azaldığı için tüketici talebi de giderek hizmetlere doğru yönelmektedir. Hizmet sektörünün imalat ve inşaat sektörlerine göre daha az malzeme yoğun olduğu ileri sürülmektedir. Bu nedenle tüketici talebindeki bu değişim, önce yavaşlamaya sonra kişi başına gelir arttıkça metal kullanım yoğunluğundaki artışın tersine dönmesine yol açmaktadır (Crowson, 2018; Grabarczyk vd., 2018; Mukiyen Avcı 2023; Radetzki ve Tilton, 1990).

MKC hipotezi, Kuznets (1955) tarafından temellendirilen Kuznets Eğrisi, Grossman ve Krueger (1991, 1995) ile Holtz-Eakin ve Selden’in (1995) öncü çalışmalarına dayanan Çevresel Kuznets Eğrisi, ardılı Malenbaum (1973, 1978) tarafından öne sürülen kullanım yoğunluğu hipotezi ve Focacci (2005) tarafından kavramsallaştırılan tarihsel bir izleme işaret etmektedir. Dolayısıyla hipotez, bir ülkenin ekonomik kalkınma düzeyi ile malzeme kullanım yoğunluğu arasında önce artan, ardılı belirli bir zirve noktasına ulaşan, sonrasında ise azalan bir ilişki olduğunu varsaymaktadır. Bu çerçevede ekonomik kalkınma döngüsünün farklı aşamalarındaki malzeme tüketimini açıklamaktadır. Hipotezin, süreç içerisinde malzeme tüketimindeki eğilimlerin bir açıklaması olduğu ve tahmin aracı olarak kullanıldığı görülmektedir.

SİSTEMATİK LİTERATÜR DERLEMESİ

EKC hipotezinin tahmini, en basit biçimde parametrik bir U veya ters U şekline izin vermek için emisyonların GSYH ve karesi üzerine regresyonunu gerektirmektedir. Benzer eğilimdeki bir ilişkinin incelendiği diğer bir literatür ise GSYH ile metal kullanımı arasındaki potansiyel olarak ters U şeklindeki ilişkiyi araştıran MKC literatürüdür. Bu çalışmanın amacı kapsamında ilişkili literatür MKC hipotezinin ele alındığı çalışmalar açısından irdelenmektedir.

Özellikle sürdürülebilir kalkınma ekseninde malzeme kullanımı ile ekonomik büyüme arasındaki olası bağlantılar için Li vd. (2022), McMillan vd. (2010), Zhang vd. (2017), Vehmas vd. (2007) tarafından yapılan çalışmalar literatür örnekleri arasındadır. Söz konusu çalışmalarda gelişmiş ülkelerdeki alüminyum stokları ile ekonomik büyüme arasındaki bağlantıların ele alındığı görülmektedir. Örneğin Li vd. (2022) 1978-2018 yılları arasında Çin’in hızlı büyümesinin itici gücünü analiz etmekte, kullanımda olan alüminyum stoklarını ölçmekte ve alüminyum stokları ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi tartışmaktadır. Sonuçlar, kullanımda olan alüminyum stoklarının 4 Tg’den 255 Tg’ye çıktığını ve mevcut kişi başına kullanımda olan alüminyum stoklarının gelişmiş ülkelere göre düşük olduğunu ifade etmektedir. McMillan vd. (2010) 1900-2007 döneminde ABD’deki kullanımda olan alüminyum stokları ile ekonomik çıktı arasındaki ilişkiyi ölçmek için dinamik malzeme akış modelini, istatistiksel zaman serisi analizi ile birleştirmektedir. Ampirik kanıtlar, GSYH’deki yıllık % değişimin kullanımdaki stoklara yapılan net eklemelerdeki yıllık % değişimle büyük ve önemli bir ilişkiye sahip olduğunu desteklemektedir. Benzer şekilde Zhang vd. (2017) ABD’deki alüminyum döngüsünü tartışmak amacıyla dematerializasyon analizi için entegre bir değerlendirme çerçevesi geliştirmektedir.

Sonuçlar, kullanımda olan alüminyum stokları ile GSYH arasındaki bağlantının diğer akış göstergelerinden daha yavaş olduğunu doğrulamaktadır. Vehmas vd. (2007) ise Avrupa Birliği'ne üye 15 ülkenin makro düzeydeki sürdürülebilirlik analizinde, çevresel ve ekonomik göstergelerin kullanılmasının olanaklarını ve sınırlamalarını tartışmaktadır. Çevresel etkilerin ekonomik büyümeden ayrışma ve yeniden bağlanma derecelerinin sınıflandırılması da dâhil olmak üzere bağlantı analizi için teorik bir çerçeve sunmakta, çevresel bozulmanın bir temsilcisi olarak doğrudan malzeme akışları göstergelerini kullanmaktadır. Sonuçlar, eğilimin 1980-2000 yılları arasında malzeme akışlarının ekonomik büyümeden zayıf bir şekilde ayrıştığı bilgisini sunmaktadır. Bu çerçevede ekonomideki malzeme yoğunluğunun artan verimlilik nedeniyle azaldığı, ancak malzeme kullanımının mutlak miktarının ekonomik büyümeden daha düşük bir artış oranında arttığı açıklanmaktadır. Aynı zamanda sonuçların ülkeler bazında heterojenlik sergilediği, üye ülkelerin hiçbirinde malzeme kullanımındaki mutlak bir azalmanın sürekli bir eğilim göstermediği belirtilmektedir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda çevresel yük sorununu değerlendirmek için çelik, bakır ve alüminyum gibi tek bir malzeme üzerinden ampirik kanıtlar elde edildiği görülmektedir. Bu bağlamda Ayres ve van den Bergh (2005), Crompton (2015), Guzmán vd. (2005), Jaunky (2012), Jaunky (2014), Wårell (2014), Wårell ve Olsson (2009) çalışmalarında gelir ve farklı metallerin kullanımı arasındaki olası ilişkilere yönelik tahminlere ulaşmaktadır.

Ayres ve van den Bergh (2005) optimizasyonun olmadığı bir büyüme teorisi çerçevesinde enerji ve maddi kaynakların doğasını açıklığa kavuşturmaktadır. Bu doğrultuda EKC ve demateriyalizasyon konusundaki akademik ve politik tartışmalara ilişkin içgörüler sağlamaktadır. Sonuçlar, Cobb-Douglas tipi bir üretim fonksiyonu için sabit çıktı esnekliklerinin seçilmesi ve bu seçimin gerekçelendirilmesinde kullanılan faktör üretkenliklerine dayalı ulusal gelir tahsisinin, geleneksel basit tek sektörlü ve tek ürün modelinin, büyüyen bir ekonominin durumuna uygulanamayacağını ifade etmektedir. Mevcut büyüme modellerinde kullanılan standart üretim fonksiyonunun temel zayıflığının, üretimde malzeme kullanımından sermaye kullanımına ikame gerçekleştiğinde gerçekte ne olduğu hakkında yeterli bilginin elde edilememesi olduğu belirtilmektedir.

Crompton (2015) 1970-2012 döneminde 26 OECD ülkesi için sabit etkili panel modelini kullanarak çelik tüketimindeki zamansal ve ülkeler arası varyasyonun ana itici güçlerini incelemektedir. Sonuçlar, GSYH'nin çelik tüketiminin ana itici gücü olduğunu, aynı zamanda yatırım harcamaları, sanayileşme ve kentleşmenin de önemli belirleyiciler olduğunu göstermektedir. Ayrıca kişi başına çelik tüketiminin kişi başına GSYH'ye göre içbükey olması, bir ülkenin ekonomik kalkınma düzeyi arttıkça çelik tüketimindeki büyüme hızının yavaşladığı şeklinde yorumlanmaktadır. Sıçrama etkisi kanıtlarına göre malzeme kullanımı ve malzeme ikamesi verimlilik iyileştirmeleri, kişi başına çelik tüketimini yılda yaklaşık olarak %1 oranında azaltmaktadır.

Guzmán vd. (2005) Japonya'da bakır kullanım yoğunluğundaki dramatik düşüşün nedenlerini araştırmaktadır. Sonuçlar, kişi başına gelirin artmasının bakır kullanım yoğunluğunu artırdığına işaret etmektedir. Söz konusu olumlu etkinin, kişi başına gelirin 53.000 ABD doları seviyesine ulaşmasına kadar devam ettiği, ardılı bakır tasarrufu sağlayan yeni teknolojilerin bakır kullanım yoğunluğunu azaltma eğiliminde olduğu belirtilmektedir.

Jaunky (2012) 1970-2009 döneminde 20 yüksek gelirli ülke için alüminyum tüketimine ilişkin MKC yaklaşımını test etmektedir. Nedensellik sonuçları, kısa ve uzun vadede kişi başına GSYH'den alüminyum yoğunluğuna doğru tek yönlü ilişkiyi açıklamaktadır. Hipotezin Avusturya, Kanada, Danimarka, Finlandiya, Yunanistan, İtalya, Japonya ve Birleşik Krallık yatay kesit birimlerinde ve tüm panelde bireysel düzeylerde geçerli olduğu görülmektedir. Bu kapsamda GSYH'deki %1'lik bir artışın, kısa vadede metal yoğunluğunda %0,87'lik bir artışa, uzun vadede ise %0,82'lik bir düşüşe neden olduğu ifade edilmektedir.

Jaunky (2014) 1966-2010 zaman aralığında 16 yüksek gelirli ülke için bakır kullanımına ilişkin MKC hipotezini araştırmaktadır. Sonuçlar, uzun vadede kişi başına GSYH'den bakır yoğunluğuna doğru geri besleme etkisi olmayan tek yönlü nedensellik ilişkisini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda teknolojik gelişme modele dâhil edildiğinde hipotezin Avusturya, İtalya ve Portekiz ülkelerinde ve tüm panel için bireysel düzeylerde geçerli olduğu bulunmaktadır.

Wårell (2014) 42 yıl boyunca 61 ülkede çelik tüketimi ve GSYH arasındaki olası ilişkiler için kullanım yoğunluğu yöntemini uygulayarak dünyadaki çelik tüketiminin eğilimlerini ve gelişmelerini analiz etmektedir. Sonuçlar, kullanım yoğunluğu hipotezinin tüm panel için geçerli olmadığını ancak orta gelir grubu ülkelerde geçerli olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum orta gelir grubundaki ülkelerin sanayileşme aşamasından hizmet tabanlı bir ekonomiye doğru geçiş yaşadığı şeklinde yorumlanmaktadır. Ayrıca tahmini dönüm noktasının yaklaşık olarak kişi başına 19.000 ABD doları GSYH seviyesinde olduğu görülmektedir.

Wärell ve Olsson (2009) 35 yıl boyunca 61 ülkeye ait verileri kullanarak kullanım yoğunluğu yaklaşımı odağında dünyadaki çelik tüketiminin eğilimlerini ve gelişmelerini araştırmaktadır. Sonuçlar, hipotez tarafından tahmin edilen kullanım yoğunluğu eğrisinin ters U şeklindeki formunun doğrulandığını göstermektedir. Bu doğrultuda Çin ve Hindistan'daki çelik kullanımının sonunda azalmaya başlayacağı açıklanmaktadır. Ayrıca çelik yoğunluğu eğrisinde zirvenin yaklaşık olarak kişi başına 28.000 ABD doları gelir düzeyinde olduğu ifade edilmektedir.

Ekonomik büyüme ile çevresel hasar arasındaki bağlantılar için bazı çalışmalarda ise tek bir malzeme yerine toplam malzeme kullanımı üzerinden ampirik kanıtlar sağlandığı görülmektedir. Örneğin Bringezu vd. (2004), Focacci (2005), Focacci (2007), Grabarczyk vd. (2018) tarafından yapılan çalışmalar ilgili literatüre atfedilmektedir.

Bringezu vd. (2004) malzeme kaynak kullanımı ile ekonomik büyümenin bağlantısına ilişkin mevcut ampirik kanıtları incelemektedir. Kaynak kullanımı, 11 ülke ve 26 ülke ile AB-15 ülkeleri kapsamında toplam malzeme gereksinimi ve doğrudan malzeme girdisi açısından karşılaştırılmaktadır. Toplam malzeme gereksiniminin ve ana bileşenlerin dinamikleri, ekonomik büyüme ile ilişkili olarak analiz edilerek GSYH'den bir ayrışma olup olmadığı ve ekonomik kalkınma sürecinde yapısal bir değişiklik yaşanıp yaşanmadığı gösterilmektedir. Sonuçlar, doğrudan malzeme girdisinin GSYH'den göreceli olarak ayrıldığını, yani Çek Cumhuriyeti hariç çoğu ülkede sabit bir seviyeye ulaştığını, ancak mutlak bir düşüş göstermediğini; toplam malzeme gereksiniminin iki yüksek ve bir düşük gelirli ülkede siyasi etki nedeniyle azaldığını açıklamaktadır. Ayrıca toplam malzeme gereksinimindeki değişikliklerin, doğrudan malzeme girdisinden çok gizli malzeme akışlarından etkilendiği belirtilmektedir. Ekonomik kalkınma sürecindeki toplam malzeme gereksinimi yapısının ve bileşimi dinamiklerinin analizi ise genel olarak sanayileşmiş ülkelerde yerel kaynak çıkarımından yabancı kaynak çıkarımına doğru bir yönelimin eşlik ettiğini göstermektedir.

Focacci (2005) 1960-1995 yılları arasında sanayileşmiş ülkelerde toplam alüminyum, bakır, kurşun, nikel, kalay ve çinko tüketimi ile kişi başına gelir arasındaki karşılıklı ilişkiyi değerlendirmektedir. Ayrıca EKC yaklaşımının geçmiş ve mevcut eğilimlerinin olası bir açıklayıcı modeli olarak ampirik terimlerle değerlendirilip değerlendirilemeyeceğini araştırmaktadır. Sonuçlar, çevresel bozulmanın ekonomik büyümenin ilk aşamalarında gelirden daha hızlı artma eğiliminde olduğunu, belirli bir eşik seviyeden sonra ise çevresel yük üzerindeki baskıların azaldığını, EKC'nin ters U şeklinde olduğunu açıklamaktadır.

Focacci (2007) gelişmekte olan ülkeler ölçeğinde toplam malzeme kullanımı (alüminyum, bakır, kurşun, nikel, kalay ve çinko tüketimi) ile kişi başına gelir arasındaki ilişkilerin ampirik bir analizini önermektedir. Sonuçlar, teorik beklentilerle ampirik kanıtların tam olarak örtüşmediğini, ancak sanayileşmiş ülkelerde kişi başına gelirin artmasıyla birlikte maddi yoğunlukların azalması yönünde yaygın bir eğilimin bulunduğunu göstermektedir.

Grabarczyk vd. (2018) 1900-2006 zaman aralığında sekiz OECD ülkesi örnekleminde alüminyum, kurşun ve çinko tüketim verileri ile Saikkonen ve Choi (2004), Wagner (2013), Wagner ve Hong (2016) (Aktaran, Grabarczyk vd., 2018) tarafından geliştirilen doğrusal olmayan eşbütünleşme testleri ve tahmin teknikleri metodolojilerini takip ederek MKC hipotezini araştırmaktadır. Sonuçlarda, ülke-metal çiftlerinin yaklaşık yarısı için eşbütünleşen ikinci dereceden MKC'nin yaygınlığına dair kanıtlar bulunmaktadır.

Gelir ve malzeme kullanımı bağlantısına yönelik literatür derlemesi, özellikle son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda yurt içi malzeme tüketimi (Ulucak vd., 2020) ve malzeme ayak izi (Ansari vd., 2020; Charlier ve Fizaine, 2023; Fernström ve Järvinen, 2022; Mukiyen Avcı, 2023; Pothen ve Welsch, 2019; Regueiro-Ferreira ve Alonso-Fernández, 2023; Turgut ve Sarıöz Gökten, 2022) parametrelerinin incelendiğinin bilgisini vermektedir.

Ulucak vd. (2020) 2000-2017 döneminde 28 AB ülkesi için yerel malzeme tüketiminin, ekonomik büyüme/gelir düzeyi, toplam faktör verimliliği, beşeri sermaye, nüfus ve küreselleşmeye nasıl tepki verdiğini ortaya koymak için STIRPAT yaklaşımını izlemektedir. Ampirik sonuçlar, küreselleşme düzeyi eşik seviyenin altında olduğunda ekonomik büyümenin, toplam faktör verimliliğini ve nüfusun malzeme tüketimini artırdığını; beşeri sermayenin ise malzeme kullanımını azalttığını göstermektedir. Ayrıca daha yüksek küreselleşme düzeyinin malzeme tüketimini azaltmaya yardımcı olduğu ve sürdürülebilir kaynak yönetimine katkıda bulunduğu ifade edilmektedir.

Ansari vd. (2020) çevre ve ekonomik büyüme bağlantısını incelemek için tüketim perspektifinden ekolojik ve malzeme ayak izini insanın çevre üzerindeki baskısının bütünsel bir ölçüsü olarak kullanmaktadır. Hipotezler,

1991-2017 döneminde 37 Asya ülkesinden oluşan örneklem kümesi için test edilmektedir. Panel eşbütünleşme, havuzlanmış ortalama grup, dinamik sıradan en küçük kareler ve panel genelleştirilmiş moment yöntemlerinden ulaşılan analiz sonuçları, EKC kullanıldığında hipotezin varlığına ilişkin bulguların heterojen olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda hipotezin Orta ve Doğu Asya ülkelerinde geçerli, Batı, Güney ve Güneydoğu Asya ülkelerinde ise geçersiz olduğu doğrulanmaktadır. Aynı zamanda Orta Asya ülkeleri hariç malzeme ayak izi göstergesi kullanıldığında sonuçların EKC'yi desteklediği belirtilmektedir. Ayrıca enerji tüketimi, küreselleşme ve kentleşmenin, ekolojik ve malzeme ayak izini artırdığı bilgisine ulaşılmaktadır.

Charlier ve Fizaine (2023) malzeme ayak izi ile kişi başına GSYH esnekliğini ampirik olarak tahmin etmektedir. Dört farklı metodoloji ve tersine/eşzamanlı nedensellik analizi sonuçları, GSYH ile hammadde tüketimi arasında mutlak bir ayrışma belirtisi ve hammadde talebinde doygunluk bulunmadığına işaret etmektedir. Elde edilen sonucun malzeme ayak izinin alt bileşenleri, yurtiçi malzeme tüketimi ve yurtiçi çıkarım gibi diğer göstergeler gözlemlendiğinde de değişmediği belirtilmektedir. Ayrıca ekonomilerin ve iktisadi kalkınmada başarıya ulaşılma şeklinin, sonlu doğal kaynaklarla uyumlu olmadığı ifade edilmektedir.

Fernström ve Järvinen (2022) 2008-2019 zaman aralığında 28 Avrupa ülkesini kapsayan panel verileri kullanarak MKC hipotezinin olası varlığını araştırmaktadır. Sabit etkili sıradan en küçük kareler regresyonu ve havuzlanmış ortalama grup tahminci sonuçları, ham madde tüketimi ile kişi başına GSYH arasında pozitif ve azalan bir ilişkiye dair tutarlı kanıtlar sunmaktadır. Aynı zamanda ülkelerin ekonomik olarak büyüdükçe, ekonomik faaliyetleri ile malzeme ayak izleri arasında giderek artan bir ayrışmanın olduğu raporlanmaktadır.

Mukiyen Avcı (2023) 1975-2019 döneminde CIVETS ülkelerinin malzeme ayak izi verilerini kullanarak MKC yaklaşımının geçerliliğini test etmektedir. Panel eşbütünleşme sonuçlarına göre Endonezya, Güney Afrika, Mısır, Türkiye ve Vietnam yatay kesit birimlerinde, aynı zamanda panelin tümünde hipotezin geçerli olduğu ifade edilmektedir.

Pothen ve Welsch (2019) 1990-2008 yılları arasında 144 ülkeden oluşan bir panel oluşturarak, EKC hipotezi çerçevesinde malzeme kullanımının belirli bir ekonomik kalkınma düzeyinde maksimuma ulaşp ulaşmadığını ve gelirden düşüş olup olmadığını araştırmaktadır. Tahmin sonuçları, kişi başına GSYH ile malzeme kullanımı arasında S şeklinde kübik bir ilişki olduğunu, ancak bu ilişkinin gelir aralığının çoğunda monoton olarak pozitif eğilimini göstermektedir. Bununla birlikte malzeme ayak izi için yurtiçi malzeme tüketiminden daha büyük bir gelir-malzeme esnekliği önermektedir.

Regueiro-Ferreira ve Alonso-Fernández (2023) malzeme ayak izi ile GSYH arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurarak, yedi Avrupa ülkesinde EKC hipotezinin varsayımlarını test etmekte ve yenilenebilir enerji tüketiminin malzeme tüketimi üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Model tahmin sonuçları, GSYH ile malzeme ayak izi arasındaki ilişkinin ters N şeklinde bir form izlediğini ve yenilenebilir enerjinin, fosil yakıtların malzeme tüketiminin azaltılmasını desteklediğini göstermektedir.

Turgut ve Sarıöz Gökten (2022) G-7 ülkelerinin 1990-2016 zaman aralığındaki verilerini kullanarak MKC hipotezinin geçerliliğini analiz etmektedir. Panel Durbin Hausman eşbütünleşme sonuçları, malzeme ayak izi ile GSYH değişkenleri için MKC yaklaşımının reddedildiğine işaret etmektedir.

Literatür örneklerinden Canas vd. (2003), Crowson (2018), Dülger vd. (2015), Kassouri vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda ise malzeme kullanım yoğunluğuna ilişkin tahmin sonuçları elde edildiği görülmektedir.

Canas vd. (2003) EKC hipotezinde bağımlı değişken olarak doğrudan malzeme girdisini dikkate alarak demateriyalizasyon tartışmasına analitik değer katmaya çalışmaktadır. Hipotezin kuadratik ve kübik form yapıları, 16 sanayileşmiş ülke için 1960-1998 zaman aralığında test edilmektedir. Sonuçlar, sanayileşmiş ekonomilerde malzeme girdisi ile gelir arasında olası kuadratik ve kübik EKC ilişkilerine dair güçlü ve sağlam bağlantılar olduğunu desteklemektedir. Dolayısıyla sanayileşmiş ekonomiler büyüdükçe, malzeme kullanım yoğunluğunun önce arttığı, belirli bir gelir eşiğine ulaştıktan sonra ise azalan bir eğilim göstermeye başladığı görülmektedir.

Crowson (2018) kullanım yoğunluğu hipotezini test etmek için seçilen verilerdeki önemli zayıflıkları araştırmaktadır. Sonuçlar, sekiz ülkede alüminyum, bakır ve çeliğin ilk kullanım yoğunluğundaki uzun vadeli eğilimleri, kişi başına GSYH arttıkça GSYH birimi başına kullanımın ters U şeklini takip etme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ancak bireysel yıllar için ülkeler arası karşılaştırmalar bu ilişkiyi doğrulamamaktadır. Ayrıca Çin'in kullanım yoğunluğunun anormal görüldüğü, bu durumun ise malzeme kullanımına ilişkin gelecek eğilimler hakkında sorular ortaya çıkardığı ifade edilmektedir.

Dülger vd. (2015) metal kullanım yoğunluğu hipotezini 1955-2013 döneminde zaman serisi yöntemlerini kullanarak Türkiye ekonomisi için sınamaktadır. Ampirik analiz sonuçları, gelir ve çelik tüketimi arasında uzun dönemli bir ilişkinin olduğuna yönelik kanıtlar ortaya koymaktadır.

Kassouri vd. (2021) 1970-2017 döneminde 12 gelişmekte olan ekonomi için STIRPAT çerçevesini kullanarak ekonomik döngünün farklı evrelerinde malzeme kullanım dinamiklerinin anlaşılmasına katkıda bulunmakta, demateriyalizasyon sürecine yeni bakış açıları getirmektedir. Ampirik kanıtlar, ekonomik genişlemenin temel olarak tüketimin yan etkisinden dolayı malzeme tüketiminde artış dönemleri oluşturduğunu, durgunluğun ortaya çıkmasının ise demateriyalizasyonla ilişkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca malzeme üretkenliğinin, malzeme kullanımı üzerinde düzenleyici bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu kapsamda artan malzeme üretkenliğinin, sürdürülebilir uygulamalara ve malzeme kullanım modellerine yol açtığı savunulmaktadır.

Wagner (2023) ise EKC ve MKC hipotezlerinin geçerliliğini ekonometrik yöntemlerle incelemektedir. Bu doğrultuda 1870-2016 zaman aralığında 16 ülke ölçeğinde EKC ve MKC yaklaşımları için eşbütünlük polinom regresyonunun sıfır hipotezi ve eşbütünlüğün yokluğunun sıfır hipotezi parametrik olmayan testlerini ele almaktadır. Sonuçlar, CO₂ emisyonları için Avusturya, Belçika, Finlandiya, Almanya, İsviçre ve Birleşik Krallık ülkelerinde EKC ilişkisinin geçerli, ancak SO₂ emisyonları için geçersiz olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte EKC, MKC ya da döviz kuru hedef bölge ilişkileri gibi tipik uygulamalarda eşbütünlük ve eşbütünlük testlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır.

SONUÇ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Nüfusa ilişkin projeksiyonlar, dünya nüfusunun yirminci yüzyılın ortalarına kıyasla üç kat daha fazla olduğunun bilgisini vermektedir. Küresel nüfus, 1950 yılındaki tahmini 2.5 milyar kişiden 2022 yılında 8 milyar kişiye ulaşmıştır. Nüfusun önümüzdeki 30 yıl içerisinde yaklaşık 2 milyar kişi artarak, 2050 yılında 9.7 milyar kişi olacağı beklenmektedir (UN, 2024). Artan nüfusun ise mal ve hizmetlere yönelik küresel talebin güçlü bir şekilde artmasına neden olacağı varsayılmaktadır. Dünya genelinde kullanılan malzeme miktarının 1970-1990 yılları arasında üç katına yükseldiği ve yılda >100 Gt doğal kaynak çıkarıldığı belirtilmektedir. OECD senaryolarına göre ekonomik büyümenin 2011-2060 döneminde dört katına çıkacağı ve küresel malzeme kullanımının ise iki katından fazla artacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte malzeme kullanımındaki en güçlü artışın, ekonomik büyüme oranlarını artırma olasılığı yüksek olan gelişmekte olan ekonomilerde gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Malzemelerin ve fosil yakıtların çıkarılması, işlenmesi ve kullanımı ise sera gazı emisyonlarından su, hava ve toprak kirliliğine, biyolojik çeşitlilik kaybına kadar uzanan farklı çevresel yükler taşımaktadır. Günümüzdeki sera gazı emisyonlarının yarısından fazlasının malzeme yönetimi faaliyetleri ile ilgili olduğu ifade edilmektedir. Bu bağlamda malzeme kullanımındaki artışların malzeme çıkarma ile birleşmesinin, kaynak tabanları üzerindeki baskıyı artırması ve özellikle düşük gelirli ekonomilerde refah ve küresel sürdürülebilirlik alanlarındaki gelecek kazanımları tehlikeye atması muhtemel görünmektedir (Charlier ve Fizaine, 2023; OECD, 2018; UNEP, 2016).

EKC hipotezi, Kuznets (1955) tarafından ortaya atılan ekonomik kalkınma derecesi ile gelir eşitsizliği arasındaki ters U şeklinde ilişkiye benzetilerek türetilmiştir. Grossman ve Krueger (1991, 1995) ile Holtz-Eakin ve Selden'in (1995) öncü çalışmalarına dayanan ve literatürün öne çıkan konularından birisi olan EKC hipotezinde, çevre kalitesi ile ekonomik faaliyetler arasındaki ilişki incelenmektedir. Ancak hipotez, metodolojik zayıflıklar, çevresel ve ekonomik düzlemde ortak bir kabul ya da ret seviyesine ulaşılamamış olması, kanıtların çoğunlukla emisyonlara dayanması nedeniyle çevre kalitesini azaltan diğer kirleticilerin göz ardı edilmesi, doğrudan yabancı yatırımlar ve ithal mallara olan talebin emisyonların etkisinin net bir şekilde anlaşılmasını engellemesi, yenilenebilir enerji kaynakları artsa ve çevre bilincine yönelik belirli bir farkındalığa ulaşılsa bile teknolojik ilerlemelerin yeni kirleticilere neden olacağı nedenlerine bağlı olarak eleştirilmektedir. Belirtilen eleştiriler sonucunda, EKC hipotezi genişletilerek emisyonlar yerine malzeme kullanımını dikkate alan MKC hipotezi geliştirilmiştir. EKC hipotezinin aksine literatürün oldukça kısıtlı bir alanını oluşturduğu için bu çalışmada, MKC hipotezine ilişkin sistematik literatür derlemesine odaklanılmıştır.

Kavramsal düzlemde ilk kez Focacci (2005) tarafından tanımlanan MKC terimi, ekonomik büyümenin materyalizasyona yol açabileceği ve malzeme tüketiminin kalkınma için ön koşul olabileceğine ilişkin varsayımla ilgilidir. Kavram, literatürde ilk olarak Focacci (2005) tarafından tanımlanmış olmakla birlikte ekonomik büyüme ile malzeme kullanımı arasındaki bağlantıyı inceleyen çalışmaların 1970'li yıllara kadar dayandığı görülmektedir. Bu bağlamda söz konusu parametreler arasındaki ilişki, Malenbaum (1973, 1978) tarafından popülerleştirilen kullanım yoğunluğu hipotezine atfedilmektedir. Hipotezin temel varsayımı, MKC

yaklaşımına benzer şekilde malzeme kullanım yoğunluğunun bir ülkenin ekonomik gelişme döngüsüne bağlı olduğudur.

Sistemik literatür incelemesi, çevresel hasar sorununu değerlendirmek için malzeme kullanımı ile ekonomik büyüme arasındaki olası ilişkilere yönelik daha fazla ampirik kanıtı ihtiyaç duyulduğunun bilgisini vermektedir. Sonuçlar, tek ya da toplam malzeme kullanımına, ülkelere ya da farklı gelişmişlik ölçütlerine, tercih edilen parametrelere, zaman dilimine ve metodolojilere karşı duyarlıdır. Bununla birlikte gelişmiş ve/veya sanayileşmiş ekonomiler, MKC hipotezinin geçerliliğine yönelik daha fazla kanıt oluşturmaktadır (Canas vd., 2003; Crowson, 2018; Fernström ve Järvinen 2022; Focacci, 2005; Focacci, 2007; Jaunky, 2012; Jaunky, 2014). Mukiyen Avcı (2023) CIVETS ülkelerinde, Wårell (2014) orta gelir grubundaki ülkelerde, Wårell ve Olsson (2009) ise gelişmişlik derecesi farklı olan ülkelerde MKC yaklaşımını destekleyen sonuçlara ulaşmaktadır. Bununla birlikte hipotez, Bringezu vd. (2004), Grabarczyk vd. (2018) tarafından yapılan çalışmalarda reddedilememekte, ancak heterojen sonuçlar üretmektedir. Parametreler arasındaki olası doğrusal olmayan ilişki için Pothen ve Welsch (2019) tarafından S şeklinde kübik, Regueiro-Ferreira ve Alonso-Fernández (2023) tarafından ise ters N şeklinde bir form izlendiği belirtilmektedir. Turgut ve Sarıöz Gökten (2022) ise çalışmalarında MKC hipotezinin geçerli olmadığını açıklamaktadır.

Ekonomik sistemlerdeki geçişler, malzeme kullanımı ve çevre kalitesi üzerinde önemli etkiler meydana getirmektedir. Özellikle son yıllarda sanayileşen çoğu ülkenin, gelişmiş ülkelerle yakınlaşmak için hızlı ekonomik büyüme süreçleri yaşadıkları gözlemlenmektedir. Bu yakınsama, ekonomik büyümenin özellikle diğer gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı ekonomik büyümenin etkilerini öngörmek için malzeme kullanımını nasıl etkileyebileceği sorusunu gündeme taşımaktadır. Kaynakların verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanımı, çevresel tehditlerle mücadele ve insanlığı kaynak kıtlığından uzak tutma noktalarında büyük önem kazanmaktadır. Sürdürülebilir kaynak politikası için ekolojik varlıkların durumunu izleme ve analiz etmenin etkili bir yolu ise malzeme tüketiminin belirleyicilerini anlamaktır (Ulucak vd., 2020). Bu kapsamda sonuçlar, refahı ekonomik büyümeden ve hammadde tüketiminden ayırma olasılığı üzerine yapılacak yeni çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Ansari, M.A., Haider, S. & Khan, N.A. (2020). Environmental Kuznets curve revisited: An analysis using ecological and material footprint. *Ecological Indicators*, 115, 1-14.
- Ayres, R.U., & van den Bergh, J.C.J.M. (2005). A theory of economic growth with material/ energy resources and dematerialization: interaction of three growth mechanisms. *Ecological Economics*, 55(1), 96-118.
- Bringezu, S., Schütz, H., Steger, S., & Baudisch, J. (2004). International comparison of resource use and its relation to economic growth: the development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR. *Ecological Economics*, 51(1), 97-124.
- Canas, A., Ferrão, P., & Conceição, P. (2003). A new environmental Kuznets curve? Relationship between direct material input and income per capita: evidence from industrialised countries. *Ecological Economics*, 46, 217-229.
- Charlier, D., & Fizaine, F. (2023). Decoupling gross domestic product and consumption of raw materials: A macro-panel analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 194-206.
- Crompton, P. (2015). Explaining variation in steel consumption in the OECD. *Resources Policy*, 45, 239-246.
- Crowson, P. (2018). Intensity of use reexamined. *Mineral Economics*, 31, 61-70.
- Dülger, F., Gencer, S., & Burgaç Çil, A. (2015). Metal (çelik) kullanım yoğunluğu hipotezinin Türkiye ekonomisi için sınanması. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 24(2), 365-380.
- Fernström, E., & Järvinen, P. (2022). A European Material Kuznets Curve. Stockholm University. 1-35. Erişim adresi: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1733642/FULLTEXT02>
- Focacci, A. (2005). Empirical relationship between total consumption-GDP ratio and per capita income for different metals of a series of industrialised nations. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 5(4), 347-377.

- Focacci, A. (2007). Empirical analysis of the relationship between total consumption-GDP ratio and per capita income for different metals: The cases of Brazil, China and India. *International Journal of Social Economics*, 34(9), 612-636.
- GFN. Global Footprint Network (2022). Earth overshoot day. Erişim adresi: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>
- Grabarczyk, P., Wagner, Martin., Frondel, M., & Sommer, S. (2018). A cointegrating polynomial regression analysis of the material Kuznets curve hypothesis. *Resources Policy*, 57, 236-245.
- Grossman, G.M., & Krueger, A.B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. National Bureau of Economic Research (Working paper no. 3914).
- Grossman, G.M., & Krueger, A.B. (1995). Economic growth and the environment, *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- Guzmán, J.I., Nishiyama, T., & Tilton, J. E. (2005). Trends in the intensity of copper use in Japan since 1960. *Resources Policy*, 30(1), 21-27.
- Holtz-Eakin, D., & Selden, T.M. (1995). Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *Journal of Public Economics*, 57 (1), 85-101.
- Jaunky, V.C. (2012). Is there a material Kuznets curve for aluminium? Evidence from rich countries. *Resources Policy*, 37, 296-307.
- Jaunky, V.C. (2014). Does a material Kuznets curve exist for copper? *Economic Paper*, 33(4), 374-390.
- Karsch, N.M. (2019). Examining the validity of the Environmental Kuznets Curve. *Consilience*, 21, 32-50.
- Kassouri, Y., Alola, A.A., & Savas, S. (2021). The dynamics of material consumption in phases of the economic cycle for selected emerging countries. *Resources Policy*, 70, 1-9.
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 45(1), 1-28.
- Li, S., Wang, Z., Yue, Q., & Zhang, T. (2022). Decomposition and decoupling analysis of aluminum in-use stocks in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 185, 1-10.
- Malenbaum, W. (1978). *World demand for raw materials in 1985 and 2000*. McGraw-Hill, New York.
- Malenbaum, W., Cichowski, C., Mirzabagheri, F., & Riordan, J. (1973). *Materials requirements in the United States and abroad in the year 2000*. Technical Report No. PB-219675.
- McMillan, C.A., Moore, M.R., Keoleian, G.A., & Bulkley, J.W. (2010). Quantifying U.S. aluminum in-use stocks and their relationship with economic output. *Ecological Economics*, 69(12), 2606-2613.
- Mukiyen Avcı, G. (2023). Malzeme Kuznets eğrisi hipotezi geçerli mi? CIVETS ülkelerinden ampirik kanıtlar. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 52, 336-351.
- OECD. Organisation for Economic Co-Operation and Development (2018). *Global material resources outlook to 2060 - Economic drivers and environmental consequences*. OECD Publishing, Paris.
- Pothen, F., & Welsch, H. (2019). Economic development and material use. Evidence from international panel data. *World Development*, 115, 107-119.
- Radetzki M., & Tilton, J. (1990). Conceptual and methodological issues. In *World metal demand, trends and prospects* (J. Tilton (ed.)) (pp. 13-34). Washington.
- Regueiro-Ferreira, R.M., & Alonso-Fernández, P. (2023). Interaction between renewable energy consumption and dematerialization: Insights based on the material footprint and the Environmental Kuznets Curve. *Energy*, 266,1-12.
- Turgut, E., & Sariöz Gökten, Y. (2022). Malzeme Kuznets eğrisi malzeme ayak izi için geçerli mi? G-7 ülkeleri örneği. *Fiscaoconomia*, 6(2), 823-841
- Vehmas, J., Luukkanen, J., & Kaivo-oja, J. (2007). Linking analyses and environmental Kuznets curves for aggregated material flows in the EU. *Journal of Cleaner Production*, 15, 1662-1673.

- Wagner, M. (2023). Residual-based cointegration and non-cointegration tests for cointegrating polynomial regressions. *Empirical Economics*, 65, 1-31.
- Wårell, L. (2014). Trends and developments in long-term steel demand–The intensity-of-use hypothesis revisited. *Resources Policy*, 39, 134-143.
- Wårell, L., & Olsson, A. (2009). Trends and developments in the intensity of steel use: an econometric analysis, paper presented at securing the future and 8th ICARD, June 23-26, 2009, Skellefteå, Sweden. Erişim adresi: <http://pure.ltu.se/portal/files/3157773/paper.pdf>
- Ulucak, R., Koçak, E., Erdoğan, S., & Kassouri, Y. (2020). Investigating the non-linear effects of globalization on material consumption in the EU countries: evidence from PSTR estimation. *Resources Policy*, 67, 1-8.
- UN. United Nations (2024). Global issues: Population. Erişim adresi: <https://www.un.org/en/global-issues/population>
- UNEP. United Nation Environment Programme (2016). Global material flows and resource productivity: Assessment report for the UNEP International Resource Panel. United Nation Environment Programme, Paris.
- Zhang, C., Chen, W-Q., Liu, G., & Zhu, D.-J. (2017). Economic growth and the evolution of material cycles: an analytical framework integrating material flow and stock indicators. *Ecological Economics*, 140, 265-274.

**YENİLENEBİLİR ENERJİ (GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİ) VE MUHASEBE BOYUTU****Mehmet Mustafa DENİZ**

Çevre Yüksek Mühendisi, Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Stratejik Hammaddeler Ve İleri Teknoloji Uygulamaları ABD Doktora Öğrencisi
ORCID: 0009-0008-5234-1495

Mehtap BULUT DENİZ

Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi, Malatya Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Malatya, Türkiye. (Sorumlu Yazar)
ORCID: 0000-0002-6826-5502

ÖZET

Çalışmada yenilenebilir enerji ile ilgili genel bilgiler verilerek, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerji kavramlarının ne olduğu, gelişim süreçleri ve üretim süreçlerinde katlanılan maliyetlerin muhasebeleştirme işlemlerine yönelik bilgi sunulması amaçlanmıştır. Güneş ve rüzgar enerji tesislerinin kurulma aşaması, faaliyete başlama aşaması ve faaliyetini devam ettirme aşamalarında katlandığı maliyetlere ilişkin örneklerle de çalışma kapsamında yer verilmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Yenilenebilir Enerji, Muhasebe, Rüzgar ve Güneş Enerjisi.

RENEWABLE ENERGY (SOLAR AND WIND ENERGY) AND ACCOUNTING DIMENSION**ABSTRACT**

In the study, it is aimed to provide general information about renewable energy and to provide information about the concepts of solar and wind energy from renewable energy sources, their development processes and accounting for the costs incurred in production processes. The study also aims to include examples of the costs incurred by solar and wind energy facilities during the establishment phase, the start-up phase and the continuation of their operations.

Keywords: Energy, Renewable Energy, Accounting, Wind and Solar Energy.

GİRİŞ

Günümüzde enerji, en temel ve en önemli ihtiyaçların başında gelmektedir. Sürdürülebilirlik, verimlilik, çevresel etkiler ve kaynak yönetimi gibi konular enerjinin önemini daha da artırmıştır. Enerji talebinin büyük ölçüde fosil yakıtlardan elde ediliyor olmasından kaynaklı çevresel endişeler ve kaynakların yakın gelecekte tükenmesine dair yaygın kanı, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi her geçen gün artırmaktadır.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji ile ilgili genel bilgiler verilerek, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerji kavramlarının ne olduğu, gelişim süreçleri ve üretim süreçlerinde katlanılan maliyetlerin muhasebeleştirme işlemlerine yönelik bilgi sunulmuştur. Güneş ve rüzgar enerji tesislerinin kurulma aşamaları, faaliyete başlama aşamaları ve faaliyetini devam ettirme aşamalarında katlandığı maliyetlere ilişkin örneklerle de çalışma kapsamında yer verilmiştir.

1.YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yenilenebilir enerjide enerji akışı, doğal ve sürekli devam eden kaynaklardan sağlanırken çevresel duyarlılığı ise en üst noktadadır. Bu enerji kaynaklarıyla beraber Tablo 1'de verilmiş olup güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik, biyokütle, dalga ve hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir. Bu kaynaklardan elde edilen enerjilerin

sürdürülebilirliği mümkün olup, sağlanan enerji ile küresel ısınma ve çevre kirliliği sorunlarının da önüne geçeceği beklenmektedir.

Tablo 1. Yenilenebilir Enerji Çeşitleri ve Kaynakları

Yenilenebilir Enerji Çeşitleri	Enerjinin Kaynağı
Güneş Enerjisi	Güneş
Rüzgar Enerjisi	Rüzgar
Jeotermal Enerji	Yeraltı suları
Hidrolik Enerji	Nehir ve Akarsular
Biyokütle Enerjisi	Biyolojik Atıklar
Dalga Enerjisi	Okyanus ve Denizler
Hidrojen Enerjisi	Su ve Hidroksitler

Güneşin yer yüzeyini farklı ısıtması ve farklı basınç oluşması havanın hareket etmesine ve rüzgârların oluşmasına neden olmaktadır. Rüzgârın özellikleri, yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün homojen olmayan ısınmasına bağlı olarak, zamansal ve yöresel değişiklik göstermektedir. Yenilenebilir enerjinin önemli bir kısmı fotovoltaik hücreler vasıtasıyla güneşten direk olarak fotonların yakalanmasıyla ve ana kaynağı güneş olan rüzgâr hareketinin türbinlere aktarılmasıyla sağlanmaktadır.

Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi üretim tesisi için katlanılan maliyetler; araştırma geliştirme giderleri, arazi maliyetleri, lisans ödemeleri, kiralama giderleri, satın alma giderleri, finansman giderleri, faaliyet giderleri, üretim giderleri, amortisman giderleri vb. şeklinde sıralanabilir.

Son yıllardaki uygulamalara bakıldığında ABD, Çin, AB Ülkeleri ve diğer birçok ülkede yenilenebilir kaynaklardan enerji elde edilmesinde önemli gelişmeler yaşandığı görülmektedir. Yenilenebilir enerjiye ve teknoloji üretimine yönelik küresel yatırımlar 2023 yılında %70 oranında artmıştır. Bu artışın başlıca nedenleri güneş fotovoltaikleri ve piller olmuştur. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımı son yirmi yılda, özellikle de güneş fotovoltaiklerinin (PV) ve rüzgar enerjisinin hızla yaygınlaşmasının etkisiyle enerji sektöründe keskin bir artış göstermiştir. Küresel olarak güç sistemlerindeki değişken yenilenebilir enerjinin (rüzgar ve güneş) payı 2023'te %13'ü aşmış ve bazı ülkelerde %67 gibi çok daha yüksek paylara ulaşmıştır. Sanayi, en büyük enerji tüketen ve yenilenebilir enerji kaynaklarının en yüksek paya sahip olduğu sektördür. Sanayide enerji kullanımı, madencilik, inşaat, makine imalatı, pestisit ve gübre üretimi ile gıda paketleme, işleme ve taşımacılığında kullanılan enerjiyi kapsamaktadır. İki ana sektör - demir ve çelik (%17,2) ve kimyasallar (%16,7) - birlikte 2021 yılında endüstriyel enerji talebinin üçte birinden fazlasını (%34) oluştururken, bunları metalik olmayan mineraller (çimento ve beton dahil %13,2), gıda ve tütün (%6,4), demir dışı metaller (%5,5), kağıt hamuru ve kağıt (%5,2) ve madencilik (%2,7) takip etmektedir. Diğer taraftan bina sektörü önemli bir enerji tüketicisidir ve güneş panelleri ve enerji tasarruflu sistemler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesi karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Binaların enerji talebinde yenilenebilir kaynakların payı 2011 yılında %11,3 iken 2021 yılında %15,9'a yükselmiştir. Araç elektrifikasyonunda kaydedilen ilerlemeye ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan politika ilgisine rağmen, ulaşım, nihai enerji tüketiminde fosil yakıt kullanımının en yüksek olduğu sektördür. Taşımacılıkta enerji kullanımı ve emisyonlar, esas olarak ekonomik büyümeye artan yük taşımacılığı talebine bağlı olarak, ulaşım talebinin artması nedeniyle artmaya devam etmektedir. Tarım, ormancılık ve balıkçılık sektörlerinde yenilenebilir enerji kullanım payı 2011 yılında % 10,8 iken 2021 yılında %15,4'e yükselmiştir. Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler, bu enerjinin çiftçiler için uygun fiyatlı ve erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2023 yılında 2022 yılına göre tek büyüme, toplam kurulu kapasitesi %50'den fazla artarak neredeyse 33 GW'a ulaşan güneş fotovoltaiklerinde (PV) olmuştur. Avrupa Birliği'nde, güneş fotovoltaiklerindeki kapasite eklemeleri 2023'te 56 GW ve rüzgar enerjisi eklemeleri ise 17 GW olarak gerçekleşmiştir. Çin sadece 2023 yılında, 2022 yılındaki toplam küresel güneş enerjisi kapasitesine eşdeğer miktarda güneş enerjisi kapasitesini devreye almıştır. Çin ayrıca 2023 yılı sonuna kadar yaklaşık 30 GW açık deniz rüzgar enerjisi işletmiştir ki bu da küresel kapasitenin yaklaşık yarısıdır. (Renewables 2024 Global Status Report, 2024).

1.1.Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi güneş ışınlarından elde edilir ve sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, kurulum ve kullanım kolaylığı, çevre dostu teknolojileri içermesi ve zararlı yan ürün ya da atık oluşturmaması gibi avantajlara sahip olup ısı ve elektrik üretmek için çeşitli amaçlarla kullanılabilen, tükenmeyen ve temiz bir enerji kaynağıdır. Güneş, güneş enerjisinin kaynağı olan görünür ışık, kızılötesi ve ultraviyole ışınlar gibi elektromanyetik dalgalar yayar ve tüm güneş cihazları için ana enerji kaynağı bu güneş radyasyonudur. Güneş enerjisi çeşitli teknolojilerden oluşsa da genel olarak fotovoltaikler (PV) ve ısıl güneş enerji teknolojileri olmak üzere iki ana türü vardır: Güneş panelleri olarak da adlandırılan güneş fotovoltaik hücreleri, elektrik üretmek için doğrudan güneş enerjisi dönüşümünü kullanır. Güneş hücrelerine çarpan güneş ışığı ile elektrik akımı üretilir ve bu akım binalara, ticari kuruluşlara ve çeşitli elektronik ekipmanlara güç sağlamak için kullanılabilir. PV panelleri doğrudan güneş ışığından elektrik üretirken ısıl güneş enerji teknolojileri suyun ve havanın sıcaklığını değiştirmek için güneşin termal (ısı) enerjisini kullanır. Güneş radyasyonundan elde edilen ısı solartermal sistemler tarafından üretilir ve endüstriyel faaliyetler, su ısıtma ve alan ısıtma için kullanılabilir. Güneş kolektörleri termal enerji üretmek için güneş ışığını toplayıp odaklayan sistemlerdir. Aynalar veya mercekler kullanan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri güneş ışığını küçük bir bölgeye yönlendirir, buhar yapmak için bir sıvıyı ısıtır ve enerji üretmek için bir türbine güç sağlar. Güneş enerjisiyle ısıtma ve soğutma sistemleri genellikle konut veya ticari alanlarda, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri ise büyük ölçekli elektrik santrallerinde kullanılır. (Hussain vd., 2024)

Dünyada ülke ve bölgeye göre solar PV kapasitesinde önde gelen ülkeler Çin, ABD, Japonya, Almanya ve Hindistan'dır. Kişi başına düşen kapasite de ise lider ülkeler Avustralya, Almanya ve Japonya'dır. Ayrıca son yıllarda Covid-19 pandemisi sırasında evde yaşama artan ilgiden dolayı birçok ülkede yeni konut sistemlerine olan talep artmıştır. Güneş PV kapasitesi 2010-2023 yılları arasında 35 kat artarak bu dönemin sonunda 1.412 GW'ın üzerinde kurulu kapasiteye ulaşmıştır. Toplamda yaklaşık 346 GW'lık yeni kurulan sistemler 2023 yılında devreye alınmıştır. Bu, 2022 yılına kıyasla %73 daha fazladır ve 2011'den bu yana yıllık devreye alınan kapasitede yıldan yıla en büyük artışı temsil etmektedir. Güneş PV, 2016 yılından bu yana tüm yenilenebilir teknolojiler arasında en yüksek yıllık yeni kapasite ilavesine sahip teknoloji olmuştur (Renewable Power Generation Costs in 2023).

1.2.Rüzgar Enerjisi

Rüzgar, hareket halindeki atmosferik havadır. Az ya da çok her yerde bulunur ve çevremizin temel fiziksel unsurlarından biridir. Rüzgar enerjisinde hareket eden havanın kinetik enerjisinin önce mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanır. Bu sistemlerin verimliliği yerel rüzgar koşulları ile rüzgar türbinlerinin enerji üretme yeteneğine bağlı olarak değişir.

Özellikle, modern büyük rüzgar türbinleri tipik olarak yaklaşık 3 ila 4 m/s hızlarda (kesme hızı) rüzgardan enerji çıkarmaya başlayan rotorlar kullanır. Bir rüzgar türbini, genellikle 11 ila 15 m/s rüzgar hızına karşılık gelen nominal güç seviyesine ulaşana kadar rüzgar hızıyla birlikte güç üretimini artırır. Daha da yüksek rüzgar hızlarında, kontrol sistemleri, durma kontrolü, kanatları eğme veya her ikisinin bir kombinasyonu yoluyla rüzgar türbininin aşırı yüklenmesini önlemek için güç çıkışını sınırlar. Çoğu türbin, rotor üzerindeki yükleri sınırlamak ve türbinin yapısal bileşenlerine zarar gelmesini önlemek için yaklaşık 20 ila 25 m/s rüzgar hızlarında (kesme hızı) enerji üretimini durdurur. Günümüzde kara rüzgar türbinlerinin neredeyse tamamı yatay eksenlidir, çoğunlukla üç kanat kullanır ve kanatları rüzgara karşıdır. Son otuz yılda, rüzgar türbini tasarımındaki yenilikler önemli maliyet düşüşlerine yol açarken, bireysel türbinlerin kapasitesi ve fiziksel boyutu belirgin şekilde artmıştır. Gelişen mühendislik çalışmaları ile tasarımlar optimize edilerek, malzeme kullanımı azaltılarak ve daha hafif ama daha güçlü malzemelerin kullanılması sayesinde daha büyük bir türbinin maliyetinin önemli ölçüde artması önlenmiştir. (Wiser, Yang vd, 2011).

Kara rüzgarının küresel kümülatif kapasitesi 2010-2023 yılları arasında dört kattan fazla artarak 178 GW'den 944 GW'ye çıkmıştır. Açık deniz rüzgarının küresel kümülatif kurulu kapasitesi ise 2010 ile 2023 arasında 3 GW'tan 73 GW'a çıkarak yirmi üç kattan fazla artmıştır (Renewable Power Generation Costs in 2023).

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİM MALİYETLERİ

Dünya nüfusunun artması ve teknoloji süreçlerinde meydana gelen ilerleme enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün daha fazla artmasına sebep olmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak amacıyla kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil kaynaklar yoğun olarak kullanılmakta ve bu durum çevre kirliliğinin tehlikeli seviyelere ulaşmasına neden olmaktadır. Türkiye'de çevre kirliliğini önlemek adına, ithalat gerektirmeyen ve düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı büyük önem arz etmektedir (Varlı vd., 2022:657).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşumunu sağlayan tesisler için katlanılan maliyetler yenilenebilir enerji maliyetleri olarak ifade edilmektedir. Bu maliyetlerden bazıları üretim tesisinin kurulum aşamasında gerçekleşirken bazıları da tesisin üretime geçtiği aşamada ortaya çıkmaktadır.

Yenilenebilir enerji üretim tesisinin kurulum aşamasında yatırım, yakıt, ulaştırma, atık, bakım onarım, araştırma geliştirme gibi birçok maliyet türü bulunmaktadır. Bu maliyetlerden en önemlisi yatırım maliyetleridir. Yatırım maliyetleri, tesisin inşaat sürecinden başlayarak ruhsat alma, mühendislik ve işletim maliyetlerini içine alan inşaat öncesi ve dolaylı maliyetleri de kapsamaktadır (Sabuncu, 2020:71).

Yenilenebilir enerji üretim tesisinin üretime geçtiği aşamada ortaya çıkan maliyetler ise yenilenebilir enerji tesisine göre farklılık göstermektedir. Bu maliyetlerden başlıcaları mühendislik hizmetleri, danışmanlık hizmetleri, gümrük ve nakliye giderleri, lisans giderleri vb. şeklinde sıralanabilir.

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en yüksek potansiyele sahip enerji türüdür. Güneş enerjisi sınırsız, düşük maliyetli, ve çevre dostu bir enerji türü olduğundan, dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bir bölümü güneş enerjisi ile sağlanmaktadır (Yalılı Kılıç vd., 2022:898). Günümüzde güneş enerjisi; günlük yaşamdan iletişime, tarımdan sanayiye, enerji santrallerinden askeri hizmetlere ve hatta uzaya kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Varlı vd., 2022:659). Güneş enerjisinden elektrik üretim modeli, güneş panelleri, invertör, panel sehpaları ve elektrikli aksam bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Güneş enerji santrali yapımı için katlanılacak yatırım maliyetleri; lisanslı elektrik üretimi yapılacaksa şirket kurulumu, proje etüdü bir danışman firmayla yürütülecekse danışmanlık hizmetleri, mühendislik hizmetleri, makine ve teçhizat giderleri, gümrük ve nakliye giderleri, sistem montajı ve inşaat giderleri, bakım onarım giderleri, sistem kullanım gideri ve sigorta giderleri gibi kalemlerden oluşmaktadır (Özdoğan ve Bitlisli, 2019:258). Son on yılda, her MW kapasite için gereken yüzey alanını azaltan modül verimliliği iyileştirmeleri sayesinde kamu hizmeti ölçeğindeki güneş PV santrallerinin maliyetleri düşmektedir ve 2023 yılında devreye alınan projeler için bu maliyet 758 ABD doları/kW olmuştur. Bu değer 2022 yılına göre %17, 2010 yılına göre ise %86 daha düşüktür (Renewable Power Generation Costs in 2023).

Rüzgar enerjisi ise, dışa bağımlılık olmadan temiz enerji üretmesi, işletme giderlerinin düşük olması ve asgari fiyat belirsizliği riski nedeniyle yatırımcılar tarafından tercih edilen projelerin başında gelen yenilenebilir enerji kaynaklarından. Yatırım yapılmadan önce, rüzgar enerjisi santrali (RES) kurma ve işletme maliyetleri büyük ölçüde belli olmaktadır (Saray, 2019:41). Ortalama 5-6 yıl süren yatırım süreci, rüzgar gözetleme istasyonunun kurulumu ile başlayıp, lisans ve işletmeye alma faaliyetleriyle sona ermektedir. Yatırımcı, santral kurmak için belirlenen rüzgâr sahasında en az bir yıl boyunca rüzgâr ölçümü yaptırarak rüzgarın kalitesinin ölçülmesini sağlamalıdır. Rüzgâr gücünün, rüzgâr hızıyla doğru orantılı olması sebebiyle yapılacak ölçümler yatırımın ekonomik karlılığını etkiler. Bu sebeple alanda yapılan ölçümlerin tecrübeli ve iyi mühendislik bilgisine sahip kişi ya da kurumlarca yapılması gerekmektedir (Yalçın, 2017:49). Bir kara rüzgar projesinin toplam kurulum maliyeti birkaç bileşenden oluşur ve rüzgar türbinleri toplamın %64 ila %84 arasında en büyük payını oluşturur. Karasal rüzgarın küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulu maliyeti 2010 ile 2023 arasında %49 düşerek 2272 ABD doları/kW'tan 1160 ABD doları/kW'a gerilemiştir. Açık deniz rüzgarının küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetleri ise %48 azalarak 5409 ABD Doları/kW'dan 2800 ABD Doları/kW'a düşmüştür (Renewable Power Generation Costs in 2023).

Rüzgar enerji santrali yapımı için katlanılacak maliyetler; tesis için belirlenen arazide rüzgar ölçümü, araştırma-geliştirme giderleri, yabancı paralı işlemlerdeki borçlanma sebebiyle kur farkları, mühendislik firmalarına yapılan uzmanlık ödemeleri, direkler, rüzgar türbinleri, tesis kiralaması söz konusu ise bu kiralamalar için yapılan ödemeler, amortisman tabi varlıkların yıpranma payları, bakım onarım giderleri, personel giderleri, lisans hakkı giderleri, finansman giderleri, inşaat işleri giderleri, elektrik tesisatı ve trafo gibi malzemelerle ilgili ödemeler, enerji nakil hattına ilişkin ödeme, şebeke bağlantısı, sigorta giderleri gibi gider kalemler bulunmaktadır (Sabuncu, 2020:73-76'dan alıntılanan Akbaba, 2024:19). Ayrıca, rüzgar enerji santrali tesisinde kullanılan malzemeler için ekonomik değerini ve faydalı ömrünü artıran harcamalar var ise bunların da özel maliyetler olarak muhasebeleştirilmesi gerekmektedir (Yılmaz, 2020:2777).

Rüzgar Enerjisi ve Güneş enerjisi santrali yapımı için çok geniş araziye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple yatırım teşvik belgesi düzenlenmiş stratejik yatırımlar ile bölgesel ve öncelikli yatırımlar için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca (Milli Emlak Genel Müdürlüğü) belirlenen usul ve esaslar çerçevesinde yatırım yeri tahsis edilebilmektedir. İlgili işletmelerin yatırım yeri tahsis desteğinden faydalanabilmesi için gerekli başvurularını yapmaları gerekmektedir. Sağlanan bu destek ile söz konusu yatırımlar için kamuya ait araziler, yatırımcılara tahsis edilerek, bu yatırımların daha hızla ve düşük maliyetle başlamasına imkan sağlanacaktır (Dibi, 2024 <https://vergiport.com/blog/gunes-ve-ruzgar-enerji-sistemleri-yatirimlarinda-indirimli-kurumlar-vergisi-ve-tesvik-kapsamindaki-degisiklikler>).

2.1.Yenilenebilir Enerji Maliyetlerinin Muhasebeleştirilmesi ve Örnek Uygulamalar

Yenilenebilir enerji sektöründe özellikle ulusal ve uluslararası muhasebe standartları, vergi işlemleri ve yasal mevzuatlar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların başında, muhasebe açısından araştırma-geliştirme giderlerinin, lisans bedellerinin, değer artırıcı harcamaların ve borçlanma maliyetlerinin aktifleştirilmesi ve itfası gelmektedir. Bununla birlikte; rüzgar türbin parçalarının farklı üretim hatlarından gelmesi nedeniyle maliyetlerinin aynı olmaması, amortisman hesaplanması ve muhasebe kayıtlarına alınması da önemli bir kriter olarak öne çıkmaktadır (Yılmaz, 2019:2774).

Güneş enerjisi ve Rüzgar enerjisi yatırımına ilişkin yapılan güneş panelleri alımı, rüzgar türbinleri kurulumu nakliye ve montaj gibi giderler yatırım tamamlanıncaya kadar 258 Yapılmakta Olan Yatırımlar Hesabının alt hesaplarına kaydedilir. Yatırım tamamlanıp enerji üretmeye başlayınca bu gibi giderler 258 numaralı hesaptan çıkarılarak ilgili hesaplara aktarılır.

Yenilenebilir enerji yatırımlarına ilişkin muhasebeleştirme işlemlerinde tesis yapımı için başlangıçta yapılan yatırımlar için yapılan harcamalar yapılmakta olan yatırımlar olarak kayıtlara alınmalı daha sonra ilgili hesap olan tesis makine ve cihazlar hesabına alınmalıdır. Santrallerde olan aşınma payları giderleri için amortisman ayrılmalıdır. Ayrıca, üretilen enerjinin mamul olarak mı yoksa hizmet üretimi olarak mı kaydedilmesi gerektiği konusunda belirsizlikler ve farklı görüşler bulunmaktadır. Enerji üretimi ve sunulmasının hizmet kapsamına girmesi nedeniyle, bu tür maliyetlerin hizmet üretim maliyeti olarak kaydedilmesinin daha uygun olacağı söylenebilir (Sabuncu, 2020:77-90, Akbaba, 2024:20).

Rüzgar enerji santrallerinde muhasebe işlemleri diğer işletme türlerinden farklı olmaktadır. Bu santrallerden elde edilen elektrik enerjisi stoklanamaz. Elde edilen enerji daha önceden yapılan anlaşmalara bağlı olarak direkt piyasaya sunulduğundan bu işletmelerde hammadde, yarı mamul ve mamul süreci işlememekte ve buna bağlı olarak stok takibi de yapılamamaktadır (Yalçın, 2017:75). Dolayısıyla bu işletmelerde 151 Yarı mamul ve 152 Mamul hesapları kullanılmaz.

Örnek Uygulama 1:

Eliz Enerji Anonim Şirketi Rüzgar Enerji Santral tesisi kurabilmek için teşvik kapsamında 2.500.000 TL değerinde rüzgar türbinleri satın almıştır.

258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR	2.500.0000	
258.10. Rüzgar Türbini		
102 BANKALAR		2.500.000
Rüzgar türbini alımı kaydı		

Örnek Uygulama 2:

Eliz Enerji Anonim Şirketi Rüzgar Enerji Santral tesisini kuracağı arazide 500.000 TL tutarında çevre düzenlemesi yapmıştır.

258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR	500.0000	
258.30. Çevre Düzenlemesi		
102 BANKALAR		500.000
Rüzgar enerji santrali çevre düzenlemesi kaydı		

Eliz Enerji Anonim Şirketi Rüzgar Enerji Santral tesisi kurulum aşaması tamamlandığında; rüzgar türbinleri alımı için açılan 258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR hesabının alt hesabı 258.10. Rüzgar Türbini hesabı 253 TESİS, MAKİNA VE CİHAZLAR hesabına, arazide yapılan çevre düzenlemeleri için açılan 258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR hesabının alt hesabı 258.30. Çevre Düzenlemesi hesabı ise 251 YER ALTI VE YER ÜSTÜ DÜZENLERİ hesabına aktarılarak 258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR hesabı kapatılır.

Örnek Uygulama 3:

Eliz Enerji Anonim Şirketi Rüzgar Enerji Santral tesisinin kurulum işlemlerini tamamlamıştır. Yatırım tamamlandıktan sonra tesis enerji üretmeye başladığı için yukarıda belirtilen giderler 258 numaralı hesaptan çıkarılarak ilgili hesaplara aktarılır.

253 TESİS, MAKİNA VE CİHAZLAR 258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR 258.10. Rüzgar Türbini Rüzgar Enerji Santral yatırımının tamamlanması kaydı	500.0000	500.000
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	---------

251 YER ALTI VE YER ÜSTÜ DÜZENLERİ 258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR 258.30. Çevre Düzenlemesi Rüzgar Enerji Santral yatırımının tamamlanması kaydı	2.500.0000	2.500.000
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------	-----------

Örnek Uygulama 4:

Aknaz Enerji Anonim Şirketi Güneş Enerji Santral tesisinin kurulumu için 750.000 TL değerinde arazi satın almıştır.

250 ARAZİ VE ARSALAR 102 BANKALAR Arazi alımı kaydı	750.0000	750.000
-----------------------------------------------------------	----------	---------

Örnek Uygulama 5:

Aknaz Enerji Anonim Şirketi Güneş Enerji Santral tesisi için teşvik kapsamında 1.500.000 TL değerinde güneş panelleri satın almıştır.

258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR 258.20. Güneş Paneli 102 BANKALAR Güneş paneli alımı kaydı	1.500.0000	1.500.000
----------------------------------------------------------------------------------------------------	------------	-----------

Örnek Uygulama 6:

Aknaz Enerji Anonim Şirketi Güneş Enerji Santral tesisinde güneş panellerinin bakım ve onarımı için Özay Anonim Şirketi ile 5.000 TL + %18 KDV'ye anlaşma sağlanmıştır.

740 HİZMET ÜRETİM MALİYETİ 191 İNDİRİLECEK KDV 102 BANKALAR Bakım onarım ödemesi kaydı	5.000 900	5.900
-------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------	-------

3.SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda enerji dönüşümüne yönelik küresel çabalar önemli bir ivme kazanmıştır. Birleşik Arap Emirlikleri'nde düzenlenen COP28'de yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin üç katına ve 2030 yılına kadar

enerji verimliliğinin iki katına çıkarılması çağrısı yapılmıştır. Önümüzdeki yıllarda tüm yenilenebilir enerji kaynaklarında kayda değer bir büyüme beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kapasitesinin üçe katlanmasında en büyük etkiye sahip olacak teknolojiler güneş fotovoltaik ve kara rüzgarıdır. Diğer taraftan rüzgar ve güneş enerjisi üretimindeki küresel yönelim ile teknolojik ve mühendislik gelişmelerin yenilenebilir enerji üretimi birim maliyetlerini düşüreceği beklenmektedir.

Güneş enerjisi endüstrisi son yıllarda hızlı bir büyüme göstererek istihdam ve iş olanakları yaratmanın yanı sıra tüketici enerji faturalarını düşürmeye de yardımcı olmuştur. Dünya çapında daha yeşil ve daha sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişte, karbon emisyonlarının azaltılmasında ve küresel ısınmanın durdurulmasında güneş enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemli bir yeri vardır.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarına değinilerek, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerjisi santrallerinde karşılaşılan maliyetlerin nasıl muhasebeleştirilmesi gerektiğine yönelik bilgiler verilmiştir.

Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi üretim tesisi için katlanılan maliyetler; araştırma geliştirme giderleri, arazi maliyetleri, lisans ödemeleri, kiralama giderleri, satın alma giderleri, finansman giderleri, faaliyet giderleri, üretim giderleri, amortisman giderleri, sigorta giderleri, bakım onarım giderleri vb. şeklinde sıralanabilir.

Güneş Enerji ve Rüzgar Enerji Santrallerinin kurabilmek için yapılan yatırımlar 258 YAPILMAKTA OLAN YATIRIMLAR hesabına kaydedilir. Yatırım tamamlandı tesis enerji üretmeye başlayınca bu gibi giderler 258 numaralı hesaptan çıkarılarak ilgili hesaplara aktarılır.

KAYNAKÇA

Buyruk Akbaba, A. (2024). Yenilenebilir enerji ve muhasebeleştirilmesi: Güneş enerjisi santrallerine yönelik uygulama, *Turkish Business Journal*, 5(9), s.14-27, Doi: 10.51727/tbj.1472712

Dibi, E. (2024). Güneş ve rüzgar enerji sistemleri yatırımlarında indirimli kurumlar vergisi ve teşvik kapsamındaki değişiklikler (30.11.2024): <https://vergiport.com/blog/gunes-ve-ruzgar-enerji-sistemleri-yatirimlarinda-indirimli-kurumlar-vergisi-ve-tesvik-kapsamindaki-degisiklikler>

Hussain, M., Zaman, M., Halim, M., Ali, M., & Khan, M. (2024). A comprehensive review of renewable and sustainable energy sources with solar photovoltaic electricity advancement in bangladesh. *Control Systems and Optimization Letters*, 2(1), s.1-7. doi:<https://doi.org/10.59247/csol.v2i1.59>

Özdoğan, F.S. & Bitlisli, F. (2019). Güneş enerjisi ile elektrik üreten işletmelerin muhasebe uygulamalarının TDHP ve TMS/TFRS çerçevesinde karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(42), s.255-279, Doi: 10.31795/baunsobed.657853

Renewables 2024 Global Status Report (2024). <https://www.ren21.net/gsr-2024/> :Erişim Tarihi:04.12.2024.

Renewable Power Generation Costs in 2023 (2024). <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> . Erişim Tarihi: 04.12.2024.

Sabuncu, B. (2020). Yenilenebilir enerji ve muhasebe uygulamaları. Gazi Kitabevi, Ankara.

Saray, E. (2019). Yenilenebilir enerji üretim ve yatırım maliyetleri karşılaştırması: Ege Bölgesi örneği. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

Varlı, H., Tuna, M. & Tombul, M (2022). Bölgesel güneş enerji potansiyeli ve enerji santralleri yatırımı değerlemesi: sancan örneği. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 34(2), s.657-666. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1117094>

Yalçın, M. (2017). Yenilenebilir enerji sektöründe muhasebe organizasyonu. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir

Yılılı Kılıç, M., Adalı, S. & Aydın, M. (2022). Elektrik İhtiyacının sağlanmasında hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Bursa tekstil fabrikası örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(3), s.897-909. DOI: 10.17482/uumfd.1161361

Yılmaz, B. (2019). Yenilenebilir enerji (rüzgar enerjisi) üreten işletmelerin Türkiye muhasebe standartları açısından değerlendirilmesi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 11(4), <https://doi.org/10.20491/isarder.2019.774>

Wilder, R., Yang, Z. vd. (2011). Wind Energy. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, s. 535 – 608, DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153.011>.



TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİMİ VE BU ALANDA FAALİYET GÖSTEREN BİR ŞİRKETİN FİNANSAL TABLOLARINI DENETLEYEN BAĞIMSIZ DENETÇİNİN DENETİM RAPORUNUN BDS 700 FİNANSAL TABLOLARA İLİŞKİN GÖRÜŞ OLUŞTURMA VE RAPORLAMA STANDARDI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehtap BULUT DENİZ

Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi, Malatya Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Malatya, Türkiye. (Sorumlu Yazar). ORCID: 0000-0002-6826-5502

Mehmet Mustafa DENİZ

Çevre Yüksek Mühendisi, Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları ABD Doktora Öğrencisi. ORCID: 0009-0008-5234-1495

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye’de yenilenebilir enerjinin üretiminden bahsedilerek ve yenilenebilir enerji sektöründe faaliyet gösteren bir şirketin finansal tablolarını denetleyen bağımsız denetçinin denetim raporunun Bağımsız Denetim Standardı (BDS) 700 Bağımsız Denetim Raporlarında Görüş Oluşturma ve Raporlama Standardı açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, BDS 700, Denetim Görüş Türleri.

EVALUATION OF THE AUDITING REPORT OF THE INDEPENDENT AUDITOR WHO AUDITED THE FINANCIAL STATEMENTS OF A COMPANY OPINIONING IN THIS FIELD AND RENEWABLE ENERGY PRODUCTION IN TURKEY IN TERMS OF IAS 700 FORMING AN OPINION ON FINANCIAL STATEMENTS AND REPORTING STANDARD

ABSTRACT

In this study, the production of renewable energy in Turkey was mentioned and the audit report of the independent auditor who audited the financial statements of a company operating in the renewable energy sector was evaluated in terms of the Independent Auditing Standard (IAS) 700 Standard for Forming an Opinion and Reporting in Independent Audit Reports.

Keywords: Renewable Energy, IAS 700, Types of Audit Opinions.

1.GİRİŞ

Fosil yakıtların kullanılması ile enerji üretimi çevreye verdiği zararlar ve canlıların sağlığı üzerine olumsuz etkileri sebebiyle ciddi endişeleri beraberinde getirmiştir. Artan dünya nüfusu, kentleşme ve sanayileşme ile birlikte enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu nedenle, ülkeler daha temiz ve ucuz enerji elde etmek için çeşitli projeler geliştirmiş bu da yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi her geçen gün artırmıştır. Tüm bu hususlar göz önüne alındığında enerjinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi; çevresel kirlilik, sürdürülebilirlik, verimlilik ve kaynak yönetimi açısından son derece önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik, biyokütle, dalga ve hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir. Dünyada ve Türkiye’de faaliyet konusu yenilenebilir enerji üretimi olan birçok işletme bulunmaktadır. 2010 yılından bu yana Türkiye’de yenilenebilir enerji sektörü hızla büyüme kaydetmektedir. Bu enerji şirketlerinin ana amaçları arasında; doğal kaynakları korumak, karbon emisyonunu azaltmak ve yerli enerji kaynaklarını kullanarak enerji konusunda Türkiye’nin dışa bağımlılığını azaltmak bulunmaktadır.

İşletmelerin faaliyetleri hakkında bilgi veren finansal tablolar, işletmeler tarafından belli standartlar çerçevesinde ve bu tablolara ilgi duyan kullanıcılara belli bir makul güven verilerek sunulmalıdır. Finansal tablolarda yer alan bilgiler, işletmenin paydaşları ve üçüncü taraflar açısından hayati öneme sahip olduğundan

bu tabloların sunulmasında güven faktörü önem taşımaktadır. Finansal tabloları inceleyen bağımsız denetçinin denetim raporunda verdiği görüş, bu makul güvenin sağlanması açısından önemlilik arz etmektedir.

Kamu Gözetimi Muhasebe ve Denetim Standartları Kurumu tarafından yayımlanan BDS 700 standardının ilk sürümü 01.01.2013 tarihinde ve sonrasında başlayacak hesap dönemlerinin denetiminde uygulanmak üzere 18.03.2014 tarihinde Resmi Gazete’de yayımlanmıştır. İlgili standarda ilişkin son değişiklikler 31.12.2023 tarihinde ve sonrasında başlayacak hesap dönemlerinin denetiminde uygulanmak üzere 16.01.2023 tarihinde Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. BDS 700, denetçinin finansal tablolara ilişkin görüş oluşturma sorumluluğunu düzenleyen bir standarttır.

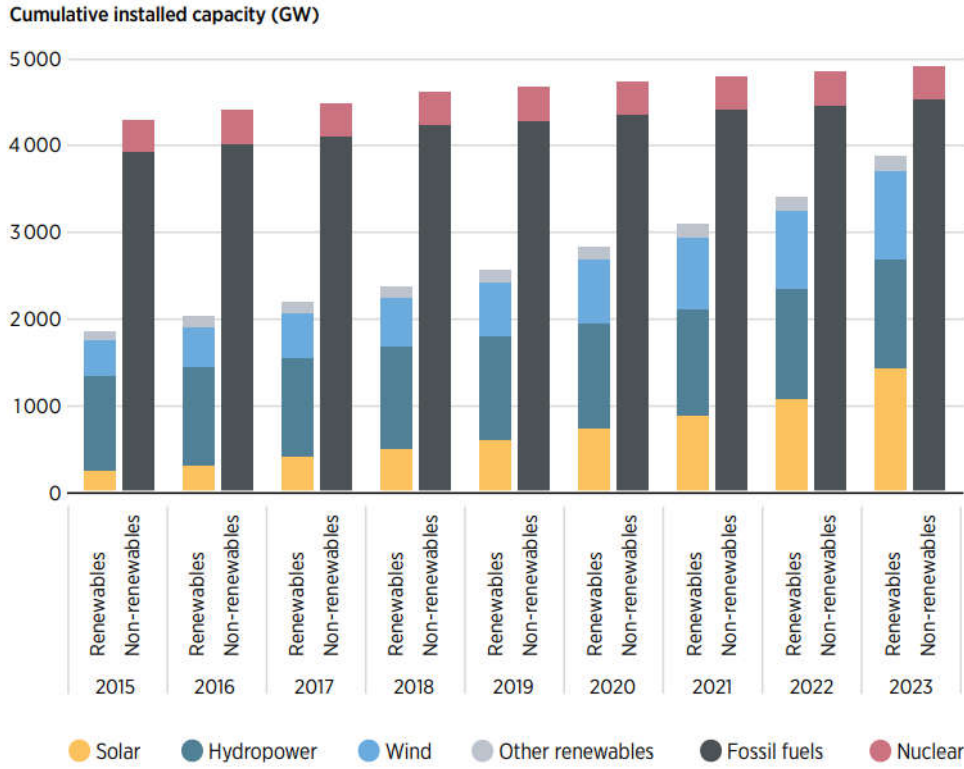
Bu çalışmada, Türkiye’de yenilenebilir enerji üretiminden bahsedilmiş ve bu alanda faaliyet gösteren bir şirketin finansal tablolarını denetleyen bağımsız denetçinin denetim raporunun Bağımsız Denetim Standardı (BDS) 700 Bağımsız Denetim Raporlarında Görüş Oluşturma ve Raporlama Standardı açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

2.TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİMİ

Dünyada Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) verilerine göre hidroelektrik dahil olmak üzere yenilenebilir enerjinin toplam enerji tüketimi içerisindeki payı 2014 yılında %20 civarında olduğu hesap edilmiştir. Elektrik sektörü, (hidroelektriğin zaten önemli katkısına dayanarak) son yıllarda güneş fotovoltaiklerinin ve rüzgarın güçlü büyümesiyle yenilenebilirler için en parlak nokta olmaya devam etmektedir. Ancak elektrik, küresel enerji tüketiminin yalnızca beşte birini oluşturmakta ve ulaşım ve ısıtma sektörlerinde yenilenebilir kaynakların rolü, enerji geçişi için kritik olmaya devam etmektedir. Uluslararası Enerji Ajansının 2021 yılı raporuna göre 2040 yılında küresel olarak en hızlı büyümenin yenilenebilir enerji sektöründe gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Dünyada fosil yakıtlara olan bağımlılık yüksek seviyelerde olmasına rağmen gün geçtikçe yenilenebilir enerji kullanımı artarak devam etmektedir. (Electricity Market Report 2021).

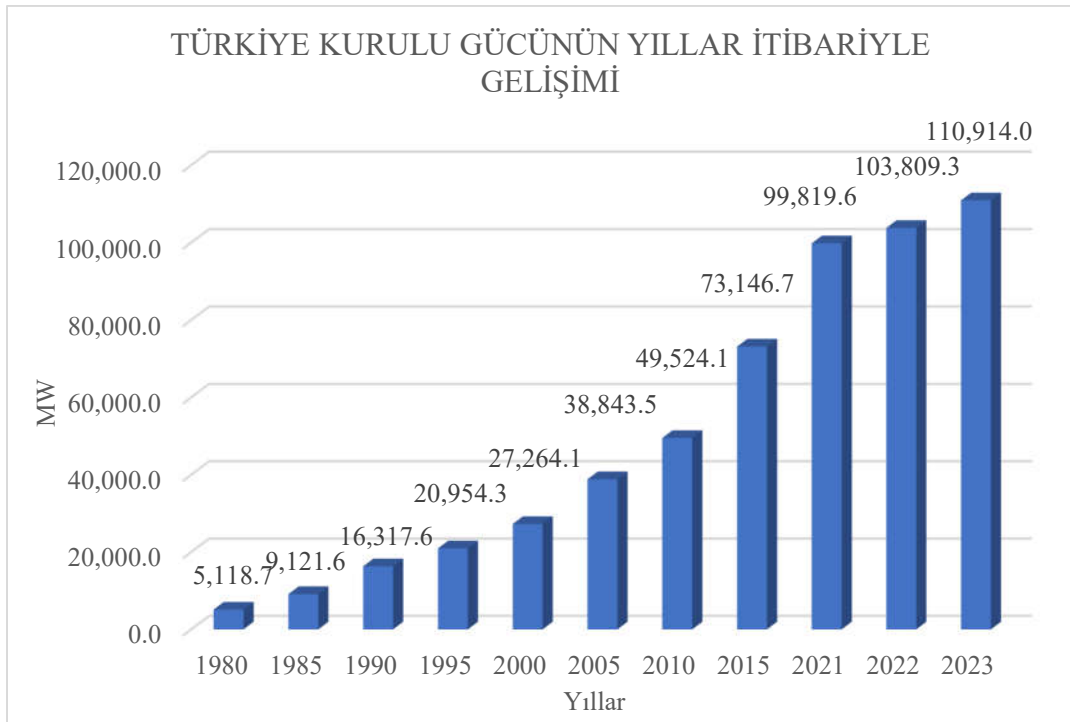
Son 10 yılda yenilenebilir enerji diğer tüm enerji formlarından daha hızlı büyümektedir. 2021 yılı itibarıyla küresel elektriğimizin %29’undan fazlası artık yenilenebilir enerjiden gelmektedir. Son yıllarda Çin, iklim krizine karşı eylem taahhütlerini güçlendiren ve karbon nötr bir hedef belirleyen ülkeler arasında yer almış ve Amerika Birleşik Devletleri 2021’in başlarında Paris Anlaşması’na yeniden katılmıştır. Bu arada, 2020 boyunca yenilenebilir enerji sektöründe ilerlemenin önündeki önceki engeller devam etmiştir. Bunlar arasında; yenilenebilir enerjilerin toplam nihai enerji tüketimindeki payındaki artışın yavaş olması ve yeniliğin yetersiz olması yer almaktadır. Yenilenebilir enerji, COVID-19 pandemisinin etkilerine rağmen 2020’de yeni güç kapasitesinde rekor kırmış ve toplam kapasitede net artış kaydeden tek elektrik üretim kaynağı olmuştur (Renewables Global Status Report, 2021).

Teknolojiye göre küresel güç kapasitesinin 2015-2023 yılları arasında değişimi Şekil 1’deki gibidir. Küresel toplam güç kapasitesinde yenilenebilir kaynakların yeri her geçen yıl artmaktadır (World Energy Transitions Outlook, 2024).



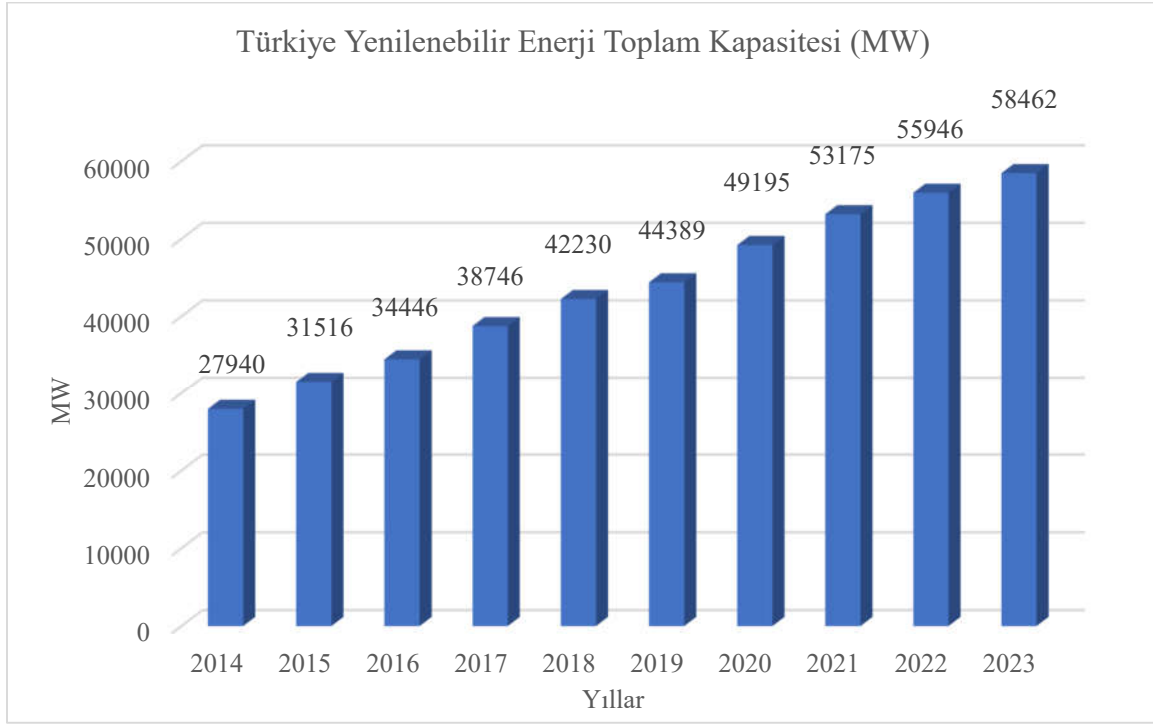
Şekil 1. Teknolojiye göre küresel güç kapasitesinin 2015-2023 yılları arasında değişimi (World Energy Transitions Outlook, 2024).

Ülkemizde elektrik enerjisi kurulu gücü 2000'li yılların başında 27.000 MW civarında iken 2023 yılında 110.914 MW'a yükselmiştir. Şekil 2. Türkiye'nin kurulu gücünün yıllar içinde gelişimini göstermektedir (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).



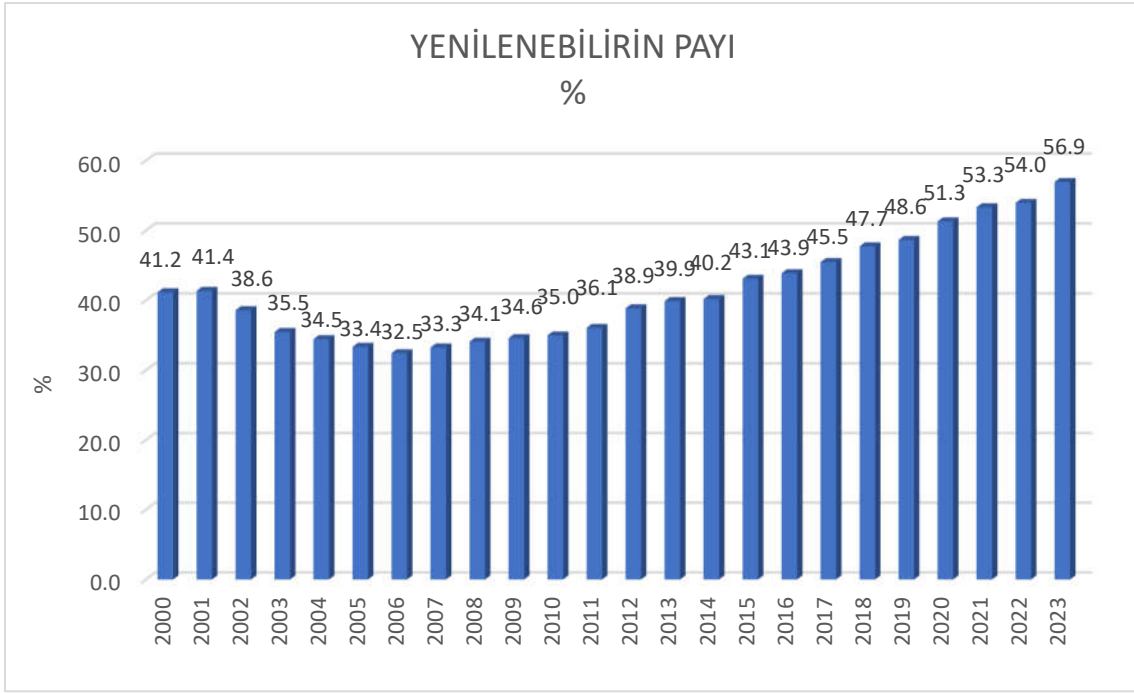
Şekil 2. Türkiye'nin kurulu gücünün yıllar içinde gelişimi (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).

Türkiye'nin, hidroenerji, jeotermal, güneş ve rüzgar enerjisi bakımından yüksek potansiyeli bulunmaktadır. Bir başka deyişle yenilenebilir enerji kaynakları yönünden dünyanın şanslı bölgelerinden birinde yer almaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), ülkeleri sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişlerinde destekleyen bir hükümetler arası kuruluştur ve uluslararası iş birliği için başlıca platform, mükemmellik merkezi ve yenilenebilir enerji konusunda politika, teknoloji, kaynak ve finansal bilgi deposu olarak hizmet vermektedir. Şekil 3'de görüldüğü üzere, ajans 2023 yılı Türkiye'nin yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesini 58.462 MW olarak rapor etmiştir (Renewable Capacity Statistics 2024). Bu kapasite ile birlikte Türkiye 2023 yılı yenilenebilir kurulu gücü sıralamasında dünyada 11'inci sıralamaya yükselmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).



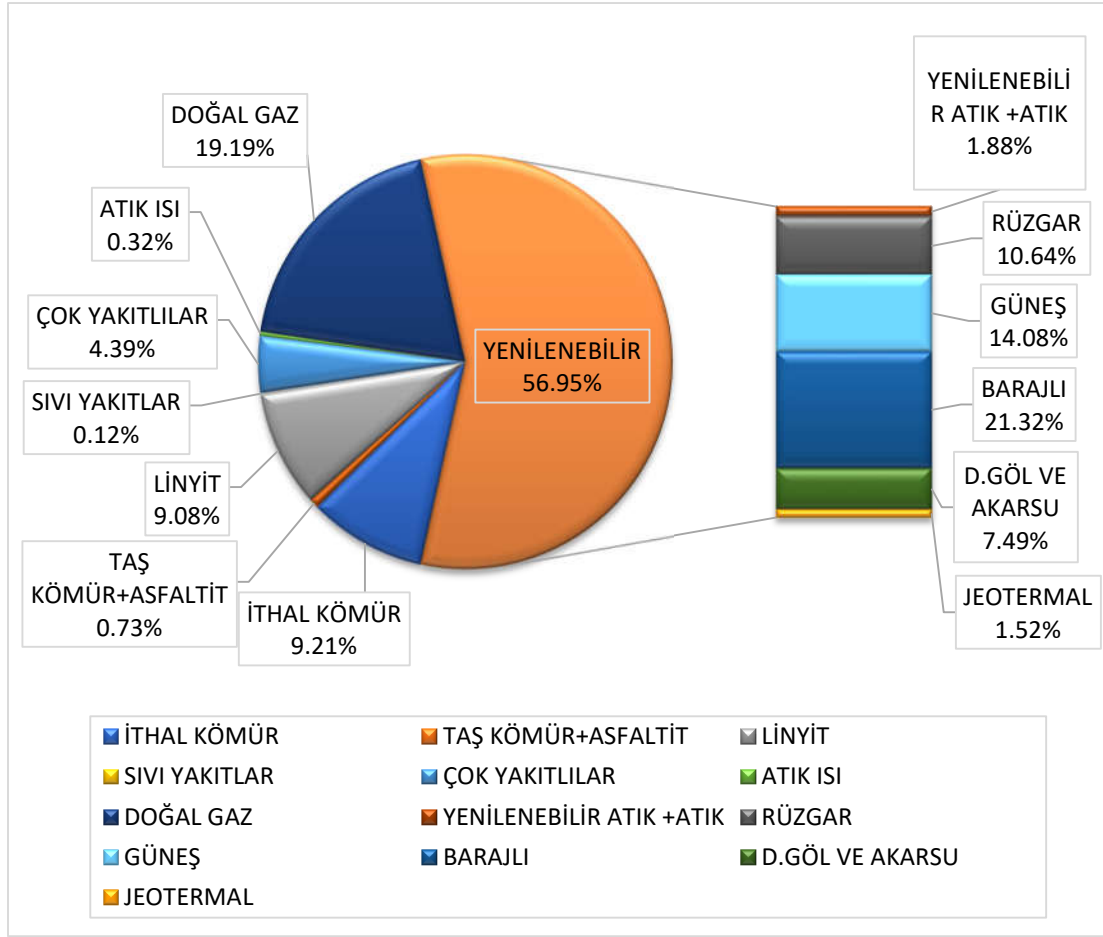
Şekil 3. Türkiye Yenilenebilir Enerji Toplam Kapasitesi (MW) (Renewable Capacity Statistics 2024).

Yenilenebilir kaynaklı kurulu gücün Türkiye toplam kurulu gücü içindeki payının yıllar itibariyle gelişimi Şekil 4'de verilmiştir. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içindeki payı 2010 yılında %35 iken 2020 yılında %51,3'e, 2023 yılında ise %56,95'e yükselmiştir (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).



Şekil 4. Türkiye yenilenebilir kaynaklı kurulu gücünün toplam kurulu gücü içindeki payı (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).

Türkiye'nin 2023 yılı kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 5'deki gibidir. Buna Göre 2023 yılında ulaşılan kurulu güç kapasitesinin %56.95'i yenilenebilir kaynaklardır (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).



Şekil 5. Türkiye'nin 2023 yılı kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).

Türkiye'de 2023 yılı elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı ve üretime katkısı Tablo 1 'de verilmiştir. Buna göre yenilenebilir kaynaklardan üretim %42.71 olarak gerçekleşmiştir. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin %31.61'i Barajlı, %14.06'sı D. Göl ve Akarsu, %24.34'ü Rüzgar, %15.76'sı Güneş, %7.92'si Jeotermal ve %6.32'si Yenilenebilir+ Atık kaynaklarından karşılanmıştır (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).

Tablo 1. Türkiye 2023 yılı elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı ve üretime katkısı (Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri, 2023).

KAYNAK	ÜRETİM (GWh)	KATKISI (%)
İthal Kömür	72.719,40	21,96
Taşkömürü + Asfaltit	5.341,69	1,61
Linyit	41.735,31	12,60
Doğal Gaz	69.452,23	20,97
Sıvı Yakıtlar	471,42	0,14
Barajlı	44.302,17	13,38
D.Göl ve Akarsu	19.700,28	5,95
Rüzgar	34.109,05	10,30
Yenilenebilir + Atık + Atık Isı	10.124,73	3,06
Jeotermal	11.102,08	3,35
Güneş	22.090,56	6,67
TOPLAM	331.148,90	100,00

3.BDS 700 STANDARDININ KAPSAMI VE İÇERİĞİ

İşletmelerin faaliyetlerine dair bilgi sunan finansal tablolar, belirli standartlara uygun olarak hazırlanmalı ve bu tablolardan faydalanan bilgi kullanıcılarına makul bir güven sunacak şekilde sunulmalıdır. İşletmeler tarafından finansal tablolar aracılığıyla sunulan bilgilerin bağımsız denetim faaliyeti ile denetlenmesi çıkar gruplarına makul bir güvence sunması açısından önem arz etmektedir. Bağımsız denetim, işletmede üretilen finansal bilgileri kullanarak karar veren kullanıcılara işletmeler tarafından sunulan bilgilere ne kadar güvenebilecekleri konusunda makul bir güvence vermektedir.

Bağımsız denetim faaliyetinde denetçinin sorumluluğu, işletmelerin finansal tablolarını dürüst bir şekilde sunup sunmadığına yönelik görüşünü bildirmektir. Denetçi, bu amacına ulaşmak amacıyla yürüttüğü denetim faaliyeti ile ilgili olarak denetim kanıtları toplar ve bu kanıtları değerlendirerek denetim raporu halinde finansal tablo kullanıcılarına sunar (Aydın ve Çürük, 2017:226).

BDS 700, işletmelerin finansal tablolarını yorumlayacak ve denetleyecek olan denetçilerin, görüş oluştururken yükleneyeceği sorumlulukları düzenleyen standarttır. Bu sorumluluğun yanı sıra BDS 700’de finansal tabloların denetimi sonucunda denetçinin hazırlayacağı denetçi raporunun içerik ve şekil bakımından nasıl olması gerektiği konusunda da bilgiler yer almaktadır (BDS 700, paragraf 1). Standarda göre denetçinin, denetime ilişkin elde ettiği denetim kanıtlarından finansal tablolara dair görüş oluşturması ile yazılı rapor halinde açık ve anlaşılır bir şekilde görüşünü bildirmesi gibi iki temel amacı bulunmaktadır (BDS 700, paragraf 6).

BDS’de yer alan ilgili hükümler denetçi raporlarının; dünya genelinde karşılaştırılabilir, tutarlı ve ilgili taraflar açısından ihtiyaçlarına cevap verecek ölçüde olmasını sağlayarak raporun değerliliğini artırmayı amaçlamaktadır (BDS 700, paragraf 4).

4.BDS 700 AÇISINDAN BİR ENERJİ ŞİRKETİNİN BAĞIMSIZ DENETÇİ RAPORUNUN İNCELENMESİ

BDS 700’ e göre, denetçi finansal tabloların tüm yönleriyle finansal raporlama çerçevesine uygun bir şekilde hazırlandığı kanısına varırsa olumlu görüş vermektedir (BDS 700, paragraf 16). Eğer denetçi; elde ettiği denetim kanıtlarına dayanarak finansal tablolarda önemli bir yanlışlık olduğunu tespit ederse veya finansal tabloların önemli yanlışlık içermediği hususunda yeterli ve uygun denetim kanıtına sahip değilse, BDS 705 standardı hükümleri gereğince olumlu görüş dışında bir görüş bildirir (BDS 700, paragraf 17 ve BDS 705, paragraf 6).

Denetçinin denetlediği işletmenin finansal tablolarıyla ilgili olarak olumlu görüş haricinde bir görüş vermesi gerektiği durumlarda denetçi BDS 705 standardında yer alan hükümlerden yararlanır (BDS 705, paragraf 1). BDS 705 standardı uyarınca denetçi, denetim raporunda olumlu görüş dışında “Sınırlı Olumlu Görüş (Şartlı Görüş)”, “Görüş Vermekten Kaçınma” ve “Olumsuz Görüş” gibi görüşlerden birini verebilir.

BDS 700’de denetçinin denetim sonucunda düzenlediği raporun nasıl olması gerektiğine dair bilgiler yer almaktadır. Standarda göre denetçinin görüşünü bildirdiği bağımsız denetçi raporunda şu bölümler yer alır:

ABC Şirketi Genel Kuruluna (ya da uygun olan Muhatap)

A) Finansal Tabloların Bağımsız Denetimi

1) Görüş

2) Görüşün Dayanağı

3) Kilit Denetim Konuları

4) Yönetimin ve Üst Yönetimden Sorumlu Olanların Konsolide Finansal Tablolara İlişkin Sorumlulukları

5) Bağımsız Denetçinin Finansal Tabloların Bağımsız Denetimine İlişkin Sorumlulukları

B) Mevzuattan Kaynaklanan Diğer Yükümlülükler

Bağımsız Denetçi Raporu Tarihi

Bağımsız Denetçinin İmzası

Sorumlu Denetçinin Adı, Soyadı

BDS 700'de belirtilen bağımsız denetçi raporuna göre aşağıda yenilenebilir enerji sektöründe faaliyet gösteren Zorlu Enerji Elektrik Üretim Anonim Şirketi'nin finansal tablolarının (finansal durum tablosu, konsolide kar veya zarar tablosu, konsolide kapsamlı gelir tablosu, konsolide özkaynaklar değişim tablosu, konsolide nakit akış tablosu ve konsolide finansal tablo dipnotları) denetlenmesi sonrası bağımsız denetçi raporu verilmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023):

BAĞIMSIZ DENETÇİ RAPORU

Zorlu Enerji Elektrik Üretim Anonim Şirketi Genel Kurulu'na

A) Konsolide Finansal Tabloların Bağımsız Denetimi

1)Görüş

Denetçi; Zorlu Enerji Elektrik Üretim Anonim Şirketi'nin ve bağlı ortaklıklarının (birlikte "Grup" olarak anılacaktır) 31.12.2023 tarihli finansal tablolarının işletmenin konsolide finansal durumunu, konsolide finansal performansını ve konsolide nakit akışlarını Türkiye Finansal Raporlama Standartlarına (TFRS) uygun olarak ve gerçeğe uygun bir şekilde sunduklarını belirterek bağımsız denetçi raporunda olumlu görüş verdiklerini bildirmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023).

2)Görüşün Dayanağı

Denetçi, denetim sırasında elde ettiği bağımsız denetim kanıtlarının, olumlu görüşün oluşturulması açısından yeterli ve uygun bir dayanak oluşturduğunu belirterek; denetim raporunun olumlu görüşün dayanağı bölümünde Kamu Gözetimi Muhasebe ve Denetim Standartları Kurulu (KGG) tarafından yayımlanan Bağımsız Denetçiler için Etik Kurallar ile SPK mevzuatında ve ilgili diğer mevzuatta yer alan finansal tabloların bağımsız denetimiyle ilgili olarak etik ilkelere uygun bir şekilde bildirerek Etik Kurallar ve mevzuat kapsamındaki etiğe ilişkin diğer sorumlulukların da taraflarınca yerine getirildiğini bildirmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023).

3)Kilit Denetim Konuları

Kilit Denetim Konuları, denetçinin meslekî muhakemesine göre üst yönetimden sorumlu olanlara bildirdiği konular olarak tanımlanmaktadır. Denetçi kilit denetim konularını, konsolide finansal tabloların bağımsız denetimi kapsamında ve konsolide finansal tablolara ilişkin görüşlerini oluştururken değerlendirdiklerini ifade etmiştir. Grup'un 31 Aralık 2023 tarihli finansal tablolarında maddi duran varlıkların yeniden değerlendirme tutarları, konsolide finansal tablolar açısından önemlidir. Maddi duran varlıkların değerlendirme işlemlerinde kullanılan bazı girdi ve hesaplamaların karmaşıklığı ile önemli yönetim tahmin ve varsayımlar içermesi sebebiyle, maddi duran varlıkların yeniden değerlendirme yöntemiyle muhasebeleştirilmesinin kilit denetim konularından biri olduğuna karar verilmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023).

4) Yönetimin ve Üst Yönetimden Sorumlu Olanların Konsolide Finansal Tablolara İlişkin Sorumlulukları

Denetçi; üst yönetimden sorumlu olanların, Grup'un finansal tablolarının gerçeğe uygun bir şekilde Türkiye Finansal Raporlama Standartlarına (TFRS) uygun olarak hazırlandığından ve raporlama sürecinin gözetiminden sorumlu olduklarını belirtmiş ayrıca konsolide finansal tabloları hazırlarken yönetimin; Grup'un sürekliliğini devam ettirme kabiliyetinin değerlendirilmesinden de sorumlu olduğunu ifade etmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023).

5) Bağımsız Denetçinin Finansal Tabloların Bağımsız Denetimine İlişkin Sorumlulukları

Denetçi bu başlıkta bağımsız denetimdeki amacını belirtmiştir. Denetçinin amacı, konsolide finansal tablolarda hata ya da hile kaynaklı önemli bir yanlışlık bulunup bulunmadığına yönelik makul güvence elde etmek ve görüşlerinin yer aldığı bağımsız denetçi raporu düzenlemektir. Denetçi ayrıca, denetim faaliyetini Bağımsız Denetim Standartlarına uygun bir şekilde sürdürdüklerini belirtmiş, denetim sürecinde mesleki muhakemelerini kullandıklarını ve mesleki şüpheciliklerini sürdürdüklerini ifade etmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023).

B) Mevzuattan Kaynaklanan Diğer Yükümlülükler

Denetçi bu başlıkta usulüne uygun düzenlenen Denetçi Raporunun Grup Şirket'inin yönetim kuruluna sunulduğunu ifade etmiş, Türk Ticaret Kanunu'nun (TTK) 402' inci maddesinin dördüncü fıkrası uyarınca Yönetim Kurulunun kendilerine denetim kapsamında istenen açıklamaları yaptığını ve istedikleri belgeleri verdiklerini belirtmiştir (KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2023).

5.SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Dünya nüfusunun hızla artması, kentleşme ve sanayileşme enerji ihtiyacının her geçen gün daha da artmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda, ülkeler daha temiz ve ucuz enerji temin edebilmek için çeşitli projeler geliştirmiş ve bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi daha da artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik, biyokütle, dalga ve hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir. Dünyada ve Türkiye'de faaliyet konusu yenilenebilir enerji üretimi olan birçok işletme bulunmaktadır. 2010 yılından bu yana Türkiye'de yenilenebilir enerji sektörü hızla büyüme kaydetmektedir. Bu enerji şirketlerinin ana amaçları; doğal kaynakları korumak, karbon emisyonunu azaltmak ve yerli enerji kaynaklarını kullanarak enerji konusunda Türkiye'nin dışa bağımlılığını azaltmak olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, Türkiye'de yenilenebilir enerjinin üretiminden bahsedilerek ve yenilenebilir enerji sektöründe faaliyet gösteren bir şirketin finansal tablolarının bağımsız denetçi raporunun Bağımsız Denetim Standardı (BDS) 700 Bağımsız Denetim Raporlarında Görüş Oluşturma ve Raporlama Standardı açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

BDS 700, denetçilerin finansal tabloları incelerken verecekleri görüş ve raporlama süreçlerinde onlara rehberlik etmektedir. Denetçiler, finansal tablolarla ilgili görüşlerini ve raporlarını oluştururken mesleki muhakemelerinin yanı sıra bu standart hükümlerini de dikkate alırlar.

Çalışmada yenilenebilir enerji sektöründe faaliyet gösteren Zorlu Enerji Elektrik Üretim Anonim Şirketi'nin finansal 2023 yılına ait finansal tablolarını denetleyen denetim şirketinin denetim raporları esas alınmış ve bu rapor BDS 700 kapsamında değerlendirilmiştir.

KAYNAKÇA

Aydın, A. ve Çürük, T. (2017). Bağımsız denetçinin finansal tablolara ilişkin görüş oluşturma ve raporlama standardından kaynaklanan yükümlülükleri. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 26 (2), s.226-238.

Electricity Market Report (2021). <https://www.iaea.org/reports/electricity-market-report-july-2021> : Erişim Tarihi:08.12.2024.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2024). <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji> : Erişim Tarihi:04.12.2024.

KPMG Bağımsız Denetim Ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş. Denetim Raporu (2023). <https://www.kap.org.tr/Bildirim/1266079> : Erişim Tarihi:04.12.2024.

Renewables 2021 Global Status Report (2021). <https://ren21.net/gsr-2021/> : Erişim Tarihi:04.12.2024.

Türkiye Elektrik İletim İstatistikleri (2023), Türkiye Elektrik İletim A.Ş. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> :Erişim Tarihi:04.12.2024.

Türkiye Denetim Standartları, Bağımsız Denetim Standardı 700, Finansal Tablolara İlişkin Görüş Oluşturma ve Raporlama, Kamu Gözetimi Muhasebe ve Denetim Standartları Kurulu, <https://www.kgk.gov.tr/>

World Energy Transitions Outlook 2024 (2024). <https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024> : Erişim Tarihi:04.12.2024.

**ENERJİ BELİRSİZLİĞİNİN EKONOMİK BÜYÜME ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: SEÇİLMİŞ AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİ İÇİN PANEL VERİ ANALİZİ****Fatih AKIN**

Öğr. Gör. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Refahiye MYO, Erzincan-Türkiye
(Sorumlu Yazar), ORCID: 0000-0002-7741-4004

Selin DİNÇER

Öğr. Gör. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Keskin MYO, Kırıkkale-Türkiye
ORCID: 0000-0003-3233-493X

Özet

Enerji belirsizliği ekonomik koşullar, siyasi gelişmeler, doğa olayları, teknolojik değişiklikler ve küresel enerji arzı ve talebi olmak üzere pek çok faktörden etkilenmektedir. Enerji piyasalarındaki belirsizlik, enerji fiyatlarının istikrarsızlığı, arz güvenliği sorunları, jeopolitik riskler ve diğer dışsal faktörler nedeniyle ekonomiler üzerinde çeşitli etkiler oluşturabilir. Bu etkiler, doğrudan veya dolaylı olarak ekonomik büyümeyi etkileyebilir. Çalışmada, seçilmiş Avrupa Birliği ülkelerinde 2003-2021 döneminde (Belçika, Fransa, Almanya, İtalya, Hollanda, İspanya ve İsveç) enerji belirsizliğinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisinin Panel Rassal Etkiler Modeli kullanılarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmadan elde edilen bulgular, seçilmiş AB ülkelerinde enerji belirsizliğinde meydana gelen %1'lik bir artışın ekonomik büyümeyi % 0.066 oranında azalttığını ortaya koymaktadır. Bulgular enerji piyasasında yaşanan belirsizliklerin ekonomik büyümeyi azalttığını ortaya koymaktadır. Bu noktada sürdürülebilir enerji yatırımları, enerji fiyat istikrarı ve uluslararası iş birlikleri ile enerji belirsizliği azaltılarak ekonomik büyümeye katkı sağlanabilir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Belirsizliği, Ekonomik Büyüme, Avrupa Birliği, Panel Veri Analizi

THE IMPACT OF ENERGY UNCERTAINTY ON ECONOMIC GROWTH: A PANEL DATA ANALYSIS FOR SELECTED EUROPEAN UNION COUNTRIES**Abstract**

Energy uncertainty is affected by many factors, including economic conditions, political developments, natural events, technological changes, and global energy supply and demand. Uncertainty in energy markets can have various effects on economies due to the instability of energy prices, supply security problems, geopolitical risks, and other exogenous factors. These effects may directly or indirectly affect economic growth. The study aims to analyse the impact of energy uncertainty on economic growth in selected European Union countries (Belgium, France, Germany, Italy, Netherlands, Spain, and Sweden) for the period 2003-2021 using Panel Random Effects Model. The findings of the study reveal that a 1% increase in the energy uncertainty decreases economic growth by 0.066% in selected EU countries. The findings reveal that uncertainties in the energy market reduce economic growth. At this point, sustainable energy investments, energy price stability, and international cooperation can contribute to economic growth by reducing energy uncertainty.

Keywords: Energy Uncertainty, Economic Growth, European Union, Panel Data Analysis

Giriş

Enerji, sanayinin üretim süreçlerinden günlük yaşamda kullanılan ev aletlerine, ulaşım sistemlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılan toplumun temel bir ihtiyacıdır. Bu sebeple enerji, toplumun işleyişi için temel bir yapı taşıdır. Enerjinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için enerji politikalarının geliştirilmesi ise bir zorunluluktur. Enerji geçişlerinin ekonomik istikrarın sağlanması açısından kritik önem taşıdığı bir dönemde enerji belirsizliği, enerji tüketim kalıplarını etkileyen önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır (Dai vd.,

2024). Verimli enerji politikaları, enerjinin kaynaklarıyla uyumlu ve sürdürülebilir bir biçimde tüketilmesini sağlayarak enerji krizlerinin önüne geçebilir.

Diğer taraftan enerji politikaları, bir ülkenin enerji güvenliğini sağlamak ve ekonomik büyümeyi desteklemek için gereklidir. Aynı zamanda enerji politikaları, bir ülkenin enerji kaynaklarını nasıl kullanacağını, hangi enerji türlerini tercih edeceğini ve bu kaynakların nasıl sürdürülebilir bir şekilde yönetileceğini belirleyen temel araçlardır (Dai vd., 2024). Enerji alanında yaşanan belirsizlikler fosil yakıt enerjisi ve yenilenebilir enerji gibi belirli enerji türlerinin tüketimini şekillendiren düzenlemelerdeki, hükümet direktiflerindeki ve piyasa koşullarındaki belirsizliği ve değişkenliği kapsamaktadır. Bu belirsizlik, siyasi geçişlerden, değişen düzenleyici çerçevelerden, teknolojik gelişmelerden ve dalgalanan küresel enerji piyasalarından kaynaklanmaktadır (Dang vd., 2023). Dolayısıyla enerjiye dayalı sektörlerde yaşanan belirsizlikler ülke ekonomisinde yatırım kararlarını etkileyerek ekonomik büyüme üzerinde olumsuz etki meydana getirebilmektedir.

Enerji belirsizliği, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında farklılıklar gösterebilir. Bu durumun sebebi ise gelişen ekonomilerin enerji fiyatlarına ve politikalarına karşı daha hassas olmalarından kaynaklanabilmektedir. Küreselleşme ekseninde dünyada hızla artan enerji talebi ve ülkelerin enerjide dışa bağımlılığı enerji politikalarının güncellenmesine, alternatif enerji kaynaklarının öneminin artmasına sebep olmaktadır (Akın ve Dinçer, 2024). Son zamanlarda, ticaret çatışmaları, Birleşik Krallık'ın Avrupa Birliği'nden çıkışı, Rusya-Ukrayna savaşı ve Filistin-İsrail çatışması gibi pek çok olay, küresel ekonomik, siyasi ve enerji piyasalarında belirsizlik risklerinin artmasına yol açmıştır (Zhang ve Guo, 2024).

Bu minvalde AB ülkeleri incelendiğinde, enerji tedarikinde büyük ölçüde dışa bağımlı oldukları görülmektedir. Özellikle enerjiye bağımlı ülkeler enerji fiyatlarındaki değişimlerden büyük ölçüde etkilenmektedir (Kanellakis vd., 2013). Son yıllarda Rusya'nın Ukrayna'ya müdahalesi gibi jeopolitik gerilimler, siyasi ve ekonomik gelişmeler AB ülkelerinde enerji belirsizliklerinin yaşanmasına sebep olmuştur. AB'nin en büyük enerji tedarikçisi konumunda olan Rusya'nın Ukrayna'ya müdahalesi ve ardından gelen yaptırımlar, AB ülkelerinin Rusya'ya olan enerji bağımlılığını azaltmaya zorlayan bir gelişme oluşturmuştur. Bu süreç içerisinde enerji tedarikinde büyük belirsizlikler yaşanarak enerji fiyatlarında dalgalanmalar yaşanmıştır. Bu zorluklar Avrupa ekonomilerini kırılgan hale getirmektedir. Diğer taraftan Birlik bünyesinde bulunan ülkelerin enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından farklı önceliklere sahip olması Birlik temelinde tek bir enerji politikası oluşumunu zorlaştırmaktadır (Kuzemko vd., 2022). Ayrıca, tüm ülkelerdeki enerji politikaları sürekli olarak düzenlenmekte ve değişmekte, bu da politika belirsizliğine yol açmaktadır (He ve Xu, 2024).

Enerji Belirsizlik Endeksi, enerji sektörü ve enerji piyasalarındaki belirsizlikleri ölçmek için geliştirilmiş bir endekstir. Bu endeks enerji belirsizliğini ölçmek amacıyla Baker vd. (2016) tarafından ilk olarak 2016 yılında yayınlanan bir çalışma ile geliştirilmiştir. Endeks, medya haberlerinden ve hükümet açıklamalarından alınan verilerle oluşturulmuştur. Daha sonra Dang vd. (2023) 1996-2022 döneminde gelişmiş ve gelişmekte olan 28 ülke için üç adımda Enerji Belirsizlik Endeksini oluşturmuşlardır. Öncelikle Ahir, Bloom ve Furceri'nin (2022) Dünya Belirsizlik Endeksi yaklaşımını izleyerek her ülke için bir ekonomik belirsizlik endeksi oluşturulmuştur. İkinci adımda, her ülke için aynı kaynaktan enerji ile ilgili bir endeks oluşturmak için benzer bir yaklaşım izlenmiştir. Üçüncü adımda ise, aylık ülke düzeyindeki enerji belirsizlik değerlerini, ekonomik belirsizlik endeksi ve enerji ile ilgili endeksin basit ortalaması olarak hesaplamışlardır (Dang vd., 2023; EPU, 2024). Geleneksel belirsizlik göstergelerinin aksine, Enerji Belirsizlik Endeksi enerji piyasalarıyla ilgili belirsizliklere, örneğin enerji fiyatı şokları ve savaş riski gibi konulara dair bilgileri yakalamak için özel olarak oluşturulmuştur (Zhang ve Guo, 2024).

Işık vd. (2024) ise 1996-2021 döneminde Dang vd. (2023) tarafından geliştirilmiş Enerji Belirsizlik Endeksini ARCH (Otogresif Koşullu Heteroskedastisite) ve GARCH (Genelleştirilmiş Otogresif Koşullu Heteroskedastisite) modellerini kullanarak metodolojik olarak genişletmişlerdir. Bu modellerden faydalanarak enerji belirsizliğinin zaman içinde nasıl geliştiği ve bunun çeşitli faktörler üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmışlardır. ARCH modelinden elde edilen bulgular, küresel enerji belirsizliğinin 0,63 katsayısıyla oldukça oynak olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, yazarlar yenilenebilir enerjinin yükselişinin, dışsal şoklara ve fosil yakıt fiyat dalgalanmalarına daha az duyarlı olduğu için enerji piyasalarındaki bağımlılığı ve belirsizliği azaltabileceğini vurgulamaktadır.

Saliba (2024) 2000-2020 döneminde gelişmiş 16 ülkede Enerji Belirsizlik Endeksinin yenilenebilir enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Bulgular, Enerji Belirsizlik Endeksinin yenilenebilir enerji tüketimi

üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, enerji piyasalarındaki yüksek belirsizliklerin yenilenebilir enerjiyi artırmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Zhang ve Guo (2024) Enerji Belirsizlik Endeksinin petrol fiyatı volatilitesi üzerindeki etkinliğini GARCH-MIDAS modeli ile incelemişlerdir. Bulgular, kullanılan modelin performans açısından oldukça yüksek sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, belirli bir piyasadaki belirsiz bilgi etkisinin, o piyasanın volatilitesini modellemede dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Usman vd. (2024) 2000-2019 döneminde enerji belirsizlik şoklarının ABD enflasyonu üzerindeki etkisini regresyon analizi ile incelemektedir. Bulgular, enerji belirsizlik şoklarının maliyet itici şoklar olarak enflasyonu artırdığını ortaya koymaktadır.

Literatür incelendiğinde, Enerji Belirsizlik Endeksinin yeni ve önemli bir değişken olduğu görülmektedir. Bu endeksin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi konusunda ise literatürde önemli araştırma boşluğu bulunmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, Enerji Belirsizlik Endeksinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisini inceleyerek literatüre katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Yöntem

Çalışmada, seçilmiş Avrupa Birliği ülkelerinde (Belçika, Fransa, Almanya, İtalya, Hollanda, İspanya ve İsveç) 2003-2021 dönemi için enerji belirsizliğinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi Panel Rassal Etkiler yöntemi kullanılarak incelenmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmanın amacı, 2003-2021 dönemi için seçilmiş Avrupa Birliği (Belçika, Fransa, Almanya, İtalya, Hollanda, İspanya ve İsveç) ülkelerinde enerji belirsizliğinin ekonomik büyüme üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Panel veri analizi yöntemi kullanılarak, enerji belirsizlik endeksinin ekonomik büyüme üzerindeki etkileri incelenecek ve bu ilişkinin yönü ve büyüklüğü değerlendirilecektir. Çalışmada yıllık veriler, aylık ortalamalardan oluşturulmuştur. Bu çalışma, enerji belirsizliklerinin ekonomik performans üzerindeki potansiyel etkilerini ortaya koyarak, politika yapıcılar için önemli çıkarımlar sağlamayı hedeflemektedir. Çalışmanın modeli 1' nolu denklemde ve kullanılan veriler ise Tablo 1' de verilmiştir.

$$GDP_{it} = \beta_0 + \beta_{i1}EUI_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Tablo 1: Çalışmada Kullanılan Veriler

Veriler	Kısaltma	Veri Kaynağı
Ekonomik Büyüme	GDP	Dünya Bankası
Enerji Belirsizlik Endeksi	EUI	https://www.policyuncertainty.com/energy_uncertainty.html

Çalışmada sırasıyla; tanımlayıcı istatistiklere, yatay kesit bağımlılık testine, birim kök testine ve panel rassal etkiler modelinin test bulgularına değinilecektir. Tablo 2' de yer alan tanımlayıcı istatistiklere göre, ortalama GDP 1.227, EUI ise 23.865'tir. GDP'nin standart sapması 2.899, EUI'nin ise 7.555 olduğu görülmektedir. Korelasyon ilişkisine göre ise GDP ve EUI arasında negatif ilişki olduğunu göstermektedir. Yani, enerji belirsizlikleri arttıkça ekonomik büyüme azalacaktır.

Tablo 2: Tanımlayıcı İstatistikler

Değişkenler	Ortalama	Std. Sapma	Minumum	Maxsimum	Gözlem Sayısı
GDP	1.227	2.899	-11.167	8.310	133
EUI	23.865	7.555	8.36	47.45	133
Korelasyon Matrisi					
GDP		1.000			
EUI		-0.168		1.000	

Tablo 3'te uygulanan CD_{lm1} (BP, 1980), CD_{lm2} (Pesaran, 2004), CD_{lm} (Pesaran, 2004 CD) ve LM_{adj} (PUY, 2008) yatay kesit bağımlılık testlerine göre, H_0 hipotezi %1 anlamlılık düzeyinde reddedilmektedir. Yani, hem GDP hem de EUI değişkenlerinde yatay kesit bağımlılığı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3: Yatay Kesit Bağımlılık Testi Bulguları

CD Tests	CD_{lm1} (BP, 1980)	CD_{LM2} (Pesaran, 2004)	CD_{lm} (Pesaran, 2004 CD)	LM_{adj} (PUY, 2008)
GDP	292.494 (0.000)***	41.892 (0.000)***	17.029 (0.000)***	41.698 (0.000)***
EUI	116.290 (0.000)***	14.704 (0.000)***	10.348 (0.000)***	14.510 (0.000)***

Not: ***, %1 anlamlılık düzeyini göstermektedir.

Tablo 4'te uygulanan CIPS birim kök testi (Pesaran, 2007) bulgularına göre, her iki değişkenin de $I(0)$ seviyesinde durağan ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir.

Tablo 4: Birim Kök Testi Bulguları

Değişkenler	Düzy	Sonuç
GDP	-2.653***	$I(0)$
EUI	-2.730***	$I(0)$
Kritik Değerler	%1 (2.60)	%5 (-2.34) %10 (-2.21)

Not: ***, **, ve * sırasıyla 1, 5, ve 10% anlamlılık düzeyini ifade etmektedir.

Tablo 5'te, farklı panel veri modellerinin uygunluğunu değerlendirmek için yapılan testlerin sonuçları özetlenmektedir.

- **F Testi:** Sabit Etkiler Modelinin Klasik Modele göre daha uygun olduğunu göstermektedir
- **LM Testi:** Rassal Etkiler Modelinin Klasik Modele göre daha uygun olduğunu göstermektedir.
- **Hausman Testi:** Rassal Etkiler Modelinin Sabit Etkiler Modeline göre daha uygun olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Rassal Etkiler Modeli en uygun model olarak belirlenmiştir.

Tablo 5: Model Seçimi İçin Test İstatistikleri

Modeller	Testler	İstatistik	Sonuçlar
Klasik Model ve Sabit Etkiler Modeli	F Testi	24.811(0.000)	Sabit Etkiler Modeli Kabul
Klasik Model ve Rassal Etkiler Modeli	LM Testi	146.805 (0.000)	Rassal Etkiler Modeli Kabul
Rassal Etkiler Modeli ve Sabit Etkiler Modeli	Hausman Testi	0.18 (0.673)	Rassal Etkiler Modeli Kabul

Tablo 6’da, model varsayımlarının geçerliliğini test eden sonuçlar özetlenmektedir.

- **Değişen Varyans Testleri:** Tüm testler (W0, W50, W10) değişen varyansın olmadığını göstermektedir.
- **Otokorelasyon Testleri:** Bhargava vd. Durbin Watson Testi ve Baltagi-Wu Testi otokorelasyonun olmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, modelde değişen varyans ve otokorelasyon bulunmamaktadır.

Tablo 6: Varsayımların Test Edilmesi

Varsayımlar	Testler	İstatistik
Değişen Varyans	W0	1.152 (0.336)
	W50	0.658 (0.683)
	W10	1.006 (0.424)
Otokorelasyon	Bhargava vd. (1982) Durbin Watson Testi	2.127
	Baltagi-Wu (1999) Testi	2.317

Değişen varyans ve otokorelasyon olmadığı için klasik rassal etkiler modeli uygulanmıştır. Tablo 7’de Rassal Etkiler Modelinin bulguları verilmiştir. Bulgulara göre;

- **EUI Katsayısı:** -0.066, bu katsayı enerji belirsizlik endeksindeki %1’lik oranında bir artışın GDP’yi ortalama olarak %0.066 oranında azalttığını göstermektedir. Bu etki istatistiksel olarak anlamlıdır.
- **Wald X^2 Testi:** 4.37, modelin genel anlamlılığını test eder ve sonuçlar modelin anlamlı olduğunu göstermektedir.
- **$corr(u_i, X) = 0$:** Bu sonuç, modelde hata terimleri ile bağımsız değişkenler arasında korelasyon olmadığını belirtir, bu da rassal etkiler modelinin geçerliliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, enerji belirsizliğinin ekonomik büyüme üzerinde negatif ve anlamlı bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, enerji belirsizliklerinin ekonomik performans üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymaktadır.

Tablo 7: Rassal Etkiler Modeli Bulguları

Bağımlı Değişken: GDP	Katsayı	Standart Hata	Z-İstatistik	Olasılık
EUI	-0.066	0.032	-2.09	0.037**
Sabit	2.767	0.827	3.35	0.001***
			Wald X^2	4.37
			$corr(u_i, X)=0$	0.03**

Not: ***, **, ve * sırasıyla 1, 5, ve 10% anlamlılık düzeyini ifade etmektedir

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, seçilmiş AB ülkelerinde 2003-2021 döneminde (Belçika, Fransa, Almanya, İtalya, Hollanda, İspanya ve İsveç) enerji belirsizliğinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi Panel Rassal Etkiler Modeli ile incelenmiştir. Enerji Belirsizlik Endeksi yeni bir değişkendir. Bu endeksin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi

konusunda literatürde önemli bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile enerji belirsizlik endeksinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisini inceleyerek literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Enerji alanında yaşanan belirsizlikler, ülke ekonomisinde kaynakların dağılımını etkileyerek ekonomik büyüme üzerinde olumsuz etki oluşturabilmektedir. AB ülkeleri, son yıllarda enerji arzında yaşanan kesintiler, enerji fiyatlarındaki artışlar ve enerji talebinin karşılanamaması gibi çeşitli enerji sorunları ile karşı karşıya kalmıştır. Enerji krizi, AB ülkeleri için hem ekonomik hem de siyasi açıdan önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu çerçevede çalışmada elde edilen bulgular, seçilmiş AB ülkelerinde enerji belirsizliğinde meydana gelen artışın ekonomik büyümeyi azalttığını ortaya koymaktadır. Öte yandan, AB ülkelerinde enerji belirsizliği, jeopolitik faktörler, teknolojik zorluklar, ulusal çıkarlar, politik ve ekonomik etkiler bakımından çok boyutlu bir sorundur. Bu sorun alanları ise, AB'nin enerji stratejilerini daha karmaşık hale getirmektedir. Bu ekseninde ortak enerji politikası, güçlü yatırımlar ve sosyal politikaların yanı sıra yenilikçi teknolojilere dayalı çözümler, bu belirsizliği aşmak için gerekli adımları oluşturabilir. Ayrıca, belirsizliği azaltmaya yönelik hedefli müdahaleler yenilenebilir enerji altyapısının geliştirilmesini teşvik edebilir ve daha öngörülebilir enerji piyasalarını destekleyebilir.

Kaynakça

- Ahir, H., Bloom, N., & Furceri, D. (2022). *The world uncertainty index* (No. w29763). National bureau of economic research.
- Akın, F., & Dinçer, S. (2024). Endüstri 4.0 ve Çevresel Sürdürülebilirlik Arasındaki İlişki: Avrupa Birliği Ülkeleri Üzerine Ampirik Bir Analiz. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 22(54), 2449-2469.
- Baker, S., Faro, N., & Davis, S. J. (2016). The Energy Policy Uncertainty Index: A New Measure of Policy Uncertainty. *Journal of Applied Econometrics*, 31(5), 1223-1248.
- Bhargava, A., Franzini, L. & Narendranathan, W. (1982). Serial correlation and the fixed effects model. *The Review of Economic Studies*, 49(4), 533-549.
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics. *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253.
- Dai, J., Farooq, U., & Alam, M. M. (2024). Navigating energy policy uncertainty: Effects on fossil fuel and renewable energy consumption in G7 economies. *International Journal of Green Energy*, 1-14.
- Dang, T. H. N., Nguyen, C. P., Lee, G. S., Nguyen, B. Q., & Le, T. T. (2023). Measuring the energy-related uncertainty index. *Energy Economics*, 124, 106817.
- Economic Policy Uncertainty (EPU). (2024). Energy-Related Uncertainty Indexes. (20.09.2024): https://www.policyuncertainty.com/energy_uncertainty.html.
- He, X., & Xu, C. (2024). Is policy uncertainty always harmful?-Empirical evidence from China's energy policy and city green transition. *Energy*, 291, 130204.
- Işık, C., Kuziboev, B., Ongan, S., Saidmamatov, O., Mirkhoshimova, M., & Rajabov, A. (2024). The volatility of global energy uncertainty: Renewable alternatives. *Energy*, 297, 131250.
- Kanellakis, M., Martinopoulos, G., & Zachariadis, T. (2013). European energy policy—A review. *Energy Policy*, 62, 1020-1030.
- Kuzemko, C., Blondeel, M., Dupont, C., & Brisbois, M. C. (2022). Russia's war on Ukraine, European energy policy responses & implications for sustainable transformations. *Energy Research & Social Science*, 93, 102842.
- Levene, H. (1960). Robust testes for equality of variances. In "Contributions to Probability and Statistics" (I. Olkin), Stanford Univ. Press, Palo Alto, CA. MR0120709, 278-292.
- Pesaran, M. H. (2004). General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels. *Cambridge Working Papers in Economics*, No. 0435, University of Cambridge.

- Pesaran, M. H. (2007). A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312.
- Pesaran, M. H., Ullah, A., & Yamagata, T. (2008). A Bias-Adjusted LM Test of Error Cross-Section Independence. *The Econometrics Journal*, 11(1), 105-127.
- Saliba, C. (2024). Do the Energy-Related Uncertainties Stimulate Renewable Energy Demand in Developed Economies? Fresh Evidence from the Role of Environmental Policy Stringency and Global Economic Policy Uncertainty. *Energies*, 17(18), 4746.
- Usman, O., Ozkan, O., Koy, A., & Adebayo, T. S. (2024). Energy-related uncertainty shocks and inflation dynamics in the US: A multivariate quantile-on-quantile regression approach. *Structural Change and Economic Dynamics*, 71, 235-247.
- World Bank (2024). <https://databank.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD/1ff4a498/Popular-Indicators>, Erişim Tarihi: 05.10.2024.
- Zhang, X., & Guo, Q. (2024). How useful are energy-related uncertainty for oil price volatility forecasting?. *Finance Research Letters*, 60, 104953.

**DISCUSSING THE RELATIONSHIP BETWEEN ENERGY POVERTY AND HUMAN RIGHTS IN TÜRKİYE'S ENERGY POLICY: THE CASE OF COAL SUBSIDY****Ferhat ARI**

Lecturer. Dr., Bingöl University, Vocational School of Social Sciences, Department of Law, Bingöl-Türkiye
(Responsible Author) ORCID: 0000-0001-6397-1398

Abstract

Türkiye provides social assistance to the energy poor in the context of the social state principle. One of these is coal aid. Depending on criteria such as household size or population, a certain amount of free coal is provided. However, many environmental problems arise due to the low quality of this free coal, its high carbon value and its combustion. The first of these is air pollution, which poses serious risks to human health. The effects of coal on public health threaten the right to life, which is guaranteed under the 1982 Constitution. A second example is the emergence of greenhouse gas emissions, again based on air pollution. Greenhouse gas emissions trigger global warming. This leads to sudden and drastic changes in climates and causes many problems. Similar to air pollution, coal use also causes soil and water pollution. However, according to paragraph 1 of Article 56 of the 1982 Constitution, “Everyone has the right to live in a healthy and balanced environment”. Paragraph 2 of this article is regulated as “It is the duty of the state and citizens to improve the environment, protect environmental health and prevent environmental pollution”. From this perspective, people have the right to live in a healthy and clean environment that does not threaten their physical and mental health. However, environmental pollution caused by the distribution of coal to alleviate energy poverty poses a risk to the right to the environment. For this reason, the protection of human rights defined within the scope of the 1982 Constitution and the social policy of distributing free coal to alleviate energy poverty contradict each other. Therefore, this policy should be abandoned and more investment should be made in renewable and nuclear energy, which have less environmental risks, or policies such as increasing support for natural gas, which is cleaner than coal, should be pursued.

Keywords: Energy Policy, Energy Poverty, Human Rights, Energy.

Introduction

In the shaping of Turkey's energy policy, environmental problems and 2053 zero waste targets, global energy crises, the difficulties faced by the country's economy, as well as social inequalities, play an important role. In this respect, individuals or households' limited access to sufficient, safe and affordable energy, in other words, energy poverty, emerges as an important social problem. Especially people living in rural areas and low-income households experience serious difficulties in accessing energy. This situation negatively affects the living standards of people living in these areas on the one hand, and creates social injustice in the country on the other.

The relationship between energy poverty and human rights in Turkey is one of the important issues in the context of social justice. Human rights play an important role in ensuring that every individual in the country has access to basic needs so that they can continue their lives in a dignified manner. Energy is one of these basic needs, and equal access to energy is indispensable for improving the quality of life. In this study, the relationship between energy poverty and human rights will be examined through coal support practices in Turkey. For this purpose, firstly Turkey's energy policy will be discussed, then the relationship between energy poverty and human rights will be discussed and finally, coal aid, which is a method used by Turkey to reduce energy poverty, will be mentioned.

Turkey's Energy Policy

Energy has become an indispensable part of our lives at almost every point, from daily life to production. However, during the process we are in - especially during the COVID-19 pandemic and the war between

Russia and Ukraine - there has been an energy crisis all over the world. For this reason, many countries have faced various difficulties in accessing energy resources. Turkey, as a country that meets a significant portion of its energy needs through imports, is among the countries most affected by this crisis. One of the striking aspects of this crisis is the increase in energy prices in the international market. While this situation causes an increase in Turkey's energy costs on the one hand, it also poses a serious risk to the country's economy on the other (Arı & Yılmaz, 2023).

The energy crisis and fluctuations in energy prices, which are seen as a serious risk source for the Turkish economy, symbolize the current account deficit in the Turkish economy during the period of late 2023 and early 2024 - as seen in Figure 1 below. It is noteworthy that the current account deficit in the country's economy coincides with the winter and spring months when energy needs are at their highest. According to Figure 1, there is a negative outlook in the specified months in terms of the balance between exports and imports in Turkey. Accordingly, in October, November and December 2023, a current account deficit of (-362), (-3,029), (-2,278) million dollars was given, respectively. Again, in January, February, March, April and May 2024, a current account deficit of (-2,713), (-3,613), (-4,478), (-5,095) and (-1,045) million dollars was seen, respectively.

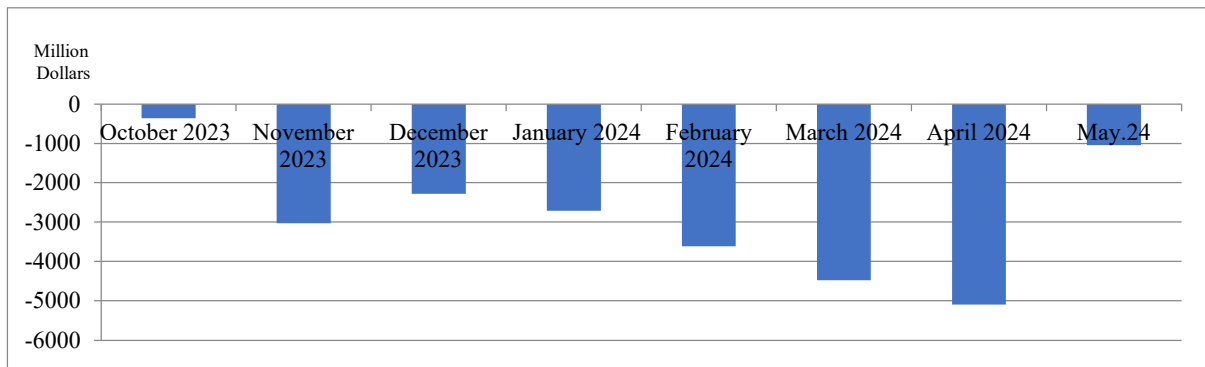


Figure 1. Turkey's Basic Foreign Trade Indicators (Million Dollars) (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2024)

Turkey is developing a number of policies to ensure energy supply security and combat the current account deficit. These policies include making maximum use of fossil fuel reserves in the country, increasing the potential of renewable energy resources and generating energy through nuclear power plants. It is possible to see these conclusions more clearly in Table 1 below. In the table, based on the Twelfth Development Plan (2024-2028), the items related to energy investments have been selected and shown - in the context of the Plan's objectives and policies -. In this context, it is mentioned that the use of domestic coal will continue in order to establish energy supply security, that nuclear energy will be included in the electricity production portfolio and that studies will be carried out on the construction of new power plants, that electricity production from renewable energy will be increased in the context of the 2053 zero waste targets, that natural gas will continue to be brought into the economy, and that studies will be carried out on the technical and economic usability of hydrogen.

Table 1. Turkey's Energy Policy within the Framework of the Twelfth Development Plan. (Presidency of the Republic of Türkiye Presidency of Strategy and Budget, 2023)

Objective	The main objective is to achieve a competitive structure that maximizes self-sufficiency in energy by utilizing domestic and renewable energy resources, uses nuclear technology in electricity generation, increases energy efficiency, prioritizes localization in energy technologies, integrates new technologies, and strengthens our strategic position in international energy trade, based on the uninterrupted, high-quality, sustainable, reliable and affordable supply of energy, source diversification in energy supply and the 2053 net zero emission target.	
Policies and Measures	1	Within the scope of ensuring energy supply security, the use of domestic coal will continue, taking into account environmental impacts to the maximum extent.
	2	Improvements in terms of environmental impact and efficiency will be achieved by making the necessary rehabilitations in the existing coal-fired power plants.
	3	R&D activities will be carried out to use coal in more environmentally friendly ways such as hydrogen, methanol and ammonia production, and studies will be carried out to utilize our reserves with clean coal technologies.
	4	Nuclear energy will be included in the electricity generation portfolio, and efforts will be carried out on the installation and localization of nuclear technologies.
	5	Akkuyu Nuclear Power Plant (NPP) will start electricity generation with all its units.
	6	Efforts to increase the installed capacity of nuclear power plants will continue.
	7	Efforts to increase the installed capacity of nuclear power plants will continue.
	8	Within the scope of the 2053 net zero emission target, renewable energy-based electricity generation will be increased and integrated into the grid in order to meet the increasing electrification with cleaner sources.
	9	Natural gas supply security will be strengthened, and efforts will continue to bring domestic natural gas into the economy.
	10	In the Tuz Gölü Natural Gas Underground Storage Project, the storage capacity will be increased to 8.8 billion m ³ and the withdrawal capacity to 80 million m ³ /day.
	11	Efforts will be carried out to develop hydrogen technologies and infrastructure, especially green hydrogen, and international collaborations will be supported in the necessary areas.
	12	Sectoral analyses will be conducted regarding the technical and economical usability of hydrogen.
	13	R&D studies on the transportation and storage of hydrogen will be continued.

Energy Poverty and Human Rights

There are many definitions in the literature on energy poverty. In general, a definition such as "the absence of sufficient choice in accessing adequate, affordable, reliable, high-quality, safe and environmentally benign energy services to support economic and human development" will provide sufficient information about energy poverty (Reddy et al., 2000). According to this definition, energy production technologies must be "reliable", meaning that frequent interruptions in service must be minimized. In addition, they must be "safe", meaning that situations that endanger health must be avoided. In addition, this definition states that technologies must be "environmentally harmless". In this respect, it is important that they do not endanger future generations. Technological solutions produced to reduce energy poverty must make future development sustainable by taking into account climate change and environmental impacts (González-Eguino, 2015).

Energy poverty has major impacts on health, economic activity and the environment because it reduces current and future productivity and limits development potential. One of the major impacts of energy poverty is the impact on human health due to the burning of wood and waste. Studies in this area have shown that indoor air pollution increases the risk of many diseases in people, especially women, children and the elderly, who spend more time at home. According to figures published by WHO in 2010, indoor pollution causes an estimated 1.3 million deaths per year in low-income countries, and is therefore one of the highest risk factors for premature death (González-Eguino, 2015). This situation also indicates that energy poverty causes environmental injustice. In this respect, distributive injustice occurs due to the inability to share environmental risks fairly (Yılmaz & Arı, 2023). These situations that create distributive injustice also pose a threat to many basic human rights.

There are certain characteristics of human resources. These characteristics include innateness, individuality, indispensability, universality, opposition to the state, absoluteness, basic quality and freedom. *Innateness*

expresses that human rights are acquired with the birth of the individual and that they exist. *Individuality* expresses that human rights are rights acquired by people as individuals on their own. *Indispensability* expresses that individuals cannot waive these rights even with their own will and consent. *Universality* expresses that human rights cannot be limited to a certain place and time. *Opposition* to the state expresses that human rights are rights that can be claimed against the state. *Absoluteness* expresses that human rights exist without any conditions. *The basic characteristic* expresses that human rights are basic rights for people and *libertarianism* expresses that human rights are the rights of freedom of the person and are outside of any intervention (Torun, 2012; Erdogan, 2012).

Modern human rights are rights that allow individuals to meet their basic needs in a dignified manner. Without these rights, it is not possible for people to continue their existence and live in safety. For this reason, modern human rights guarantee the basic rights and freedoms that will allow individuals to meet their basic needs (Akyüz, 2020).

Energy is one of the basic needs for every individual to survive. Article 25 of the United Nations Universal Declaration of Human Rights guarantees the right to a healthy life. At the same time, this right includes a standard of living adequate for health and well-being, including necessary social services such as food, clothing, and housing for every human being. Therefore, this right is a basic compass for eliminating the factors that cause energy poverty (UN, 1948).

Coal Subsidy as a Tool to “Digest” Energy Poverty

The fact that coal is cheap and easily accessible makes the use of coal widespread. For this reason, the type of fuel used by economically disadvantaged groups in Turkey for heating is coal. However, the coal used releases toxic gases, pollutants and heavy metals, especially carbon dioxide, into the atmosphere. At the same time, coal is one of the main pollutants of the air (Akyüz, 2021).

Especially in this process that started with the COVID-19 pandemic and continued with the war between Russia and Ukraine, it has become a necessity to abandon the use of fossil fuels, especially coal. Because the use of fossil fuels causes irreparable or impossible damage in many areas, especially environmental pollution (Ari, 2023).

The problem of energy poverty in Turkey is encountered both in cities and rural areas. It is observed that people in cities, especially in low-income neighborhoods, have difficulty meeting their heating and electricity needs. In rural areas, the lack of energy infrastructure and transportation difficulties make access to energy even more difficult. In this context, coal aid for low-income families in Turkey is an important practice carried out within the scope of the state's social assistance programs. This practice provides free coal to low-income families in order to meet their heating needs. Although coal aid is seen as a solution in the fight against energy poverty, it can also be said that this practice has caused some debates in terms of human rights. Considering the effects of coal on the environment and human health, it is understood that it is not one of the sustainable energy sources. In addition, short-term solutions such as coal aid do not replace more permanent and sustainable energy policies in the long term. In addition, coal aid also has some criticisms. Many people argue that coal is only a transitional solution and that people should seek permanent solutions. While coal subsidies provide a solution to energy poverty, they may not be sufficient to address social inequalities in the long run.

Conclusion and Recommendations

Energy poverty in Turkey is more prevalent, especially among low-income families and in rural areas. It is difficult for these groups to obtain the energy they need to fulfill their basic human rights. However, equal access to energy is an important factor in eliminating social inequalities and injustices. Therefore, it is important to take this situation into consideration when determining energy policies.

In order to combat energy poverty, not only temporary solutions but also permanent and sustainable policies need to be developed. In this respect, environmentally friendly solutions such as renewable energy sources come to the fore. By increasing its investments in renewable resources such as solar and wind energy and also using these resources more effectively, Turkey can achieve energy independence on the one hand and improve low-income groups' access to energy in a sustainable way on the other.

In today's conditions, where issues such as global warming and climate change have become one of the main agendas of all countries, the low level of use of renewable energy sources, which are considered to be a cleaner energy source compared to fossil fuels, is a concern for the future in terms of environment and energy. From this point on, alternative energy sources to fossil fuels should be used. It is important to increase the use of renewable energy sources on a global scale, especially since these sources are abundant in nature and easy to access (Arı & Yılmaz, 2023).

In addition, policies to increase energy efficiency and raising citizens' awareness on this issue can contribute to reducing energy poverty. In order to save energy, households should be informed and the use of energy-efficient devices should be encouraged. Energy poverty is a major problem, especially for low-income households, and solving this problem is of critical importance in terms of human rights. Policies implemented against energy poverty in Turkey should not be limited to temporary solutions such as coal aid, but should be supported by more sustainable and long-term policies. Increasing renewable energy resources, supporting energy efficiency projects, and restructuring social aid for low-income segments in a way that provides permanent solutions will be important steps in combating energy poverty. In cases where renewable energy resources are insufficient, providing citizens with direct natural gas support instead of free coal will be more beneficial for the environment and human health.

References

- Akyüz, E. (2020). *Çevre ve İnsan Hakları: Türkiye Üzerine Bir Araştırma*. Çanakkale: Paradigma Akademi Yayınları.
- Akyüz, E. (2021). Bölüşüm Adaleti: Kömür Kullanımı Örneği. İçinde E. Akyüz (Ed.). *Çevresel Adalet*, (ss.15-42). Çanakkale: Paradigma Akademi Yayınları.
- Arı, F. (2023). Başlıca Enerji Kaynakları ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(26), 697-718. <https://doi.org/10.53092/duibfd.1340196>
- Arı, F., & Yılmaz, V. (2023). Türkiye'de ve Dünya'da Enerji Kaynaklarının Genel Görünümü ve Alternatif Enerji Kaynaklarının Önemi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* (34), 496-519. <https://doi.org/10.15182/diclesosbed.1340642>.
- Erdoğan, M. (2012). *İnsan Hakları Teorisi ve Hukuku*, Orion Kitabevi, Ankara.
- González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 377-385.
- Presidency of the Republic of Türkiye Presidency of Strategy and Budget. *The Twelfth Development Plan. (2024-2028)* Retrieved: December 10, 2024, from https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2024/06/Twelfth-Development-Plan_2024-2028.pdf.
- Reddy, A. K., Annecke, W., Blok, K., Bloom, D., Boardman, B., Eberhard, A., & Ramakrishna, J. (2000). Energy and social issues. *World energy assessment*, 39-60.
- Torun, Y. (2012). *Hukuk Felsefesi*, Orion Kitabevi, Ankara.
- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2024). *Cari Denge*. Retrieved: December 10, 2024, from <https://www.sbb.gov.tr/cari-denge/>.
- United Nations. *Universal Declaration of Human Rights*. (1948). Retrieved: December 08, 2024, from <https://www.un.org/en/about-us/universal-declaration-of-human-rights>.
- Yılmaz, V. & Arı, F. (2023). Bölüşüm Adaleti ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları. İçinde F. ARI (Ed.). *Çevresel Adalet ve Enerji*, ss. 35-58). Çanakkale: Paradigma Akademi Yayınları.

**ANALYSIS OF LEGAL RECOGNITION OF THE RIGHT TO ACCESS ENERGY IN TÜRKİYE****Ferhat ARI**

Lecturer. Dr., Bingöl University, Vocational School of Social Sciences, Department of Law, Bingöl-Türkiye
(Responsible Author) ORCID: 0000-0001-6397-1398

Abstract

Human rights are rights that exist in all countries in terms of being universal, for which guarantees are provided through legal means, and criminal sanctions are applied in case these rights are violated or violated. With the 1948 Universal Declaration of Human Rights, human rights have gained a universal dimension. There are many human rights conventions protecting human rights on a regional and international scale. In Türkiye, fundamental human rights are included in the second part of the 1982 Constitution under the title “Fundamental Rights and Duties”. In this context, fundamental human rights such as the right to life, the right to travel and the right to education are some of these rights guaranteed in the Constitution. The right to access energy has an important role in the realization of many of these rights defined in the Constitution. Especially for economically disadvantaged groups and people living in rural areas, it can be very difficult to implement human rights on the basis of sustainability when access to clean and safe energy is not ensured. The right to clean and sustainable energy is not recognized as a fundamental human right in Türkiye. However, energy directly or indirectly affects almost every aspect of human life in the modern world. If access to energy is disrupted, our lives are negatively affected and the realization of many human rights can be jeopardized. From this point of view, the right to access energy is the minimum condition for the fundamental human rights defined in the constitution. If this right is a minimum condition for the realization and protection of many human rights, it should be recognized as a fundamental human right. Therefore, it may be important to recognize the right to access to energy as a fundamental human right in the new draft constitution to be prepared while the current civil constitutional debates are ongoing in Türkiye in order to protect existing human rights. The main purpose of this study is to discuss the advantages and disadvantages of constitutionalizing the right to access to energy in the context of the relationship between energy and human rights.

Keywords: Enerjiye Erişim Hakkı, İnsan Hakları, Enerji

Introduction

Human rights are the rights that humanity has achieved through struggle throughout history. Human rights, which express the rights that people have simply because they are human, exhibit a universal quality. At the same time, human rights have a comprehensive structure. Therefore, they include many rights. These rights are special rights that arise from the fact that humans are thinking beings.

Human rights are the rights included in the constitutions of today's modern states and recognized by the states. It is an important issue for any right to be regulated by the constitution. Because constitutions are at the highest level in the hierarchy of norms. They guide all legal regulations within the country. In addition, a right included in the constitution creates a basic judgment regarding the relevant right and increases the importance of the right. Fundamental rights and freedoms have been regulated in Turkey with the 1982 Constitution.

The right to access energy is a right that is not included in the 1982 Constitution. However, it is one of the rights that is considered to be included in the constitution due to its importance. This necessity stems from the importance of energy in human life. Energy has penetrated into every area of human life today and has risen to a priority position in the daily activities of people. Meeting basic human needs now requires energy. Access to energy has become a necessity for human survival. Therefore, it is important that the right to access energy is regulated as a constitutional human right.

In light of this information, this study will first explain what human rights and the right to access energy mean. In the continuation of the study, the right to access energy within the framework of the 1982 Constitution will be examined and the necessity of accepting the right to access energy as a human right in the constitution will be discussed.

Human Rights and the Right to Access Energy

İnsan hakları, yaşadığımız çağın en önemli ve çokça tartışılan kavramlarında biridir. Siyasal sistemlerin aristokrasiden veya monarşiden demokrasiye evrildiği dönemde ortaya çıkmıştır. Bu anlamda insan hakları, 20. yüzyılın popüler kavramlarından biri haline gelmiş ve önemli gelişmeler göstermiştir. İnsan hakları kavramı etkisini 21. yüzyılda da artırarak sürdürmüştür. Çünkü insan hakları, kimsenin karşı çıkamadığı ve desteklediği üst düzey hukuksal değerlerden biridir (Torun, 2000; Çeçen, 2013).

Human rights, as a concept, exhibit a very comprehensive nature. This situation stems from the fact that humans have different rights just as humans. The abundance of rights that people should have has broadened their perspective on the concept. This situation has ensured that human rights have a rich content.

Humans have a “special” position due to their existence. This special position stems from the fact that humans are conscious elements that think, evaluate and attribute values (Gül, 2013). The fact that humans are different from other living beings requires them to have certain rights. The fundamental rights that humans have today have emerged as a result of struggles experienced in human history. Declarations on human rights have been published in many countries throughout history. The declarations have enabled human rights to experience significant developments. Human rights have been shaped by studies carried out especially since the 17th and 18th centuries. Among the historical texts that have made significant contributions to the development of human rights, the English Declaration of Rights dated 1689, the Virginia Declaration of the Rights of Man and the American Declaration of Independence dated 1776, the French Declaration of the Rights of Man and the Citizen dated 1789 and the United Nations Declaration of Human Rights published in 1948 are the most important ones. (Yayla, 1991; Üskül Engin, 2014).

Human rights are a concept that rises on the concepts of "human" and "right". Human is a neutral word. It covers everyone regardless of language, color, religion, physical characteristics, level of education, culture or age (Department of Training). The human condition is the same for everyone. People may have different aspects. However, people are human everywhere and are similar (Çeçen, 2020). The concept of right refers to a legitimate demand or claim that an individual can make against others. When a person says that he has a right against any situation, it reveals that the relevant demand is recognized and indisputable by everyone (Erdoğan, 2012). Right can be defined as the authority, opportunity or freedom to act in certain ways recognized by some universal declarations, laws or some oral traditions. It can also be defined as the authority, privilege or freedom given, sanctified and supported by an authority such as a king, law, god or tradition (Can, 2019). Therefore, human rights are a structure consisting of rights that humans have and can assert against everyone.

The concept of human rights is, in its most general form, a concept that expresses the rights that humans have simply because they are human (Torun, 2000). Human rights are “*the rights that all humans have due to being human, regardless of religion, language, race, political views and gender.*” Human rights, which express the rights that a person has regardless of where and who they are, are the value given to humans and the demands for controlling this value (Can, 2019; Tepe, 2000).

Human rights are one of the concepts with certain characteristics. Human rights have characteristics such as innateness, individuality, indispensability, universality, opposition to the state, absoluteness, basic quality and freedom. Innateness expresses that the individual gains human rights by being born and exists. Individuality explains that human rights are rights that people gain individually as individuals. Indispensability explains that individuals cannot give up these rights even of their own will. Universality expresses that human rights are devoid of space and time. Opposition to the state explains that human rights are rights that can be claimed against the state. Absoluteness explains that human rights are absolute without any conditions. Basic quality expresses that human rights are basic rights for people. Libertarianism expresses that human rights are the freedom rights of the person and are outside of any intervention (Torun, 2012; Erdoğan, 2012).

Energy is a vital resource for human activities and life, providing power to perform daily routine activities of people. Energy, which is the basic element required for the realization of any work, has become one of the primary needs in today's modern world (Izci and Çamur, 2023). The development of technology and the fact that people continue their business and social life depending on technology have made energy a basic necessity for all people.

The concept of energy is a concept that can have different meanings depending on its wide area of use. In this direction, energy is the power needed to move any object from one place to another. Energy is the power that

provides the ability to move. In other words, energy is the capacity or ability to do work (Hepbaşlı, 2000; Hecht, 2019).

The concept of energy describes the state of an object or system. Everything in the universe, from atoms to galaxies, is in motion. The existence of motion is expressed as energy. Therefore, the ability of anything to move is evaluated as energy (Izci & Çamur, 2023).

Energy is considered one of the basic needs of humans. Due to its importance in human life, energy has become a basic need. It is very important for people to have access to energy resources in order to live a healthy life. Energy, as a basic need and necessity, has become one of the basic rights that are demanded and desired to be achieved today.

The common demand of humanity for energy has led to the emergence of the concept of the right to access energy. The right to access energy is a right officially presented by the global community (Özcan Buckley & Demirtaş, 2022).

There is no agreed definition of the concept of the right to access energy. In its most general form, the right to access energy refers to the access of households to energy in order to meet their basic needs (Aksakal Aydın, 2020). The right to access energy is people's access to the energy they need to sustain their lives at a certain standard.

The concept of the right to access energy is quite broad. In this context, the lighting of a household, cooling or heating the household according to climatic conditions, heating and cooling of food, cooking meals, which are the basic source of nutrition for people, ensuring communication between people and the world, communication, education, health, agricultural activities, lighting, etc. constitute the scope of the right to access energy. Therefore, it is seen that the right to access energy is a concept related to every area of life (Aksakal Aydın, 2020).

In today's world, energy is not a luxury need, but a fundamental right that is effective in ensuring the continuity of social life (EPSU & EAPN, 2017). Energy has a quality that encompasses life. It also ensures the continuity of life. The problems that arise in accessing energy cause all human activities to almost come to a standstill. Because people today operate in a way that is dependent on energy.

The right to access energy is based on three basic elements: 'affordability', 'reliable energy service' and 'being modern' (Aksakal Aydın, 2020). Being affordable is related to users being able to afford the energy services provided. In other words, being affordable, which refers to the fee that people pay for the energy they need, is the fact that the fee for the energy used is affordable. Reliable energy service is an element related to individuals who benefit from energy being able to use energy uninterruptedly. Reliable energy service, which refers to people continuously benefiting from energy services within a certain framework, includes taking the necessary precautions regarding energy outages. Being modern, on the other hand, includes people accessing the energy services required by the age.

The right to access energy, which has emerged due to the importance of energy in human life, is a public service that must be provided by states. Public services refer to services provided by the state or under the supervision of the state to meet common needs. (Onar, 1966). Energy is a common need of humanity. This situation requires citizens to provide the need for energy as a public service and states to carry out the necessary activities in this regard.

Right to Access Energy on a Legal Recognition

The regulation of human rights on a constitutional basis is an important issue. Norms are regulated, removed, narrowed or expanded according to needs. Norms regulating human rights are not norms that change or are established and removed in line with daily needs. Rights related to human rights have a privileged position. Therefore, human rights should be made a part of the constitution, which is accepted as the superior norm. The acceptance of human rights by the founding power expresses the importance given to human rights and creates a judgment on its position in the hierarchy of norms (Kılınç, 2005).

In Turkey, human rights are one of the important constitutional rights regulated in the 1982 Constitution. In the 2nd article of the 1982 Constitution, while discussing the characteristics of the republic, respect for human rights was mentioned and the importance the state gave to the issue of human rights was emphasized. Such an

expression in the 2nd article of the Constitution expresses a certain understanding (Gözübüyük, 2000). Within the framework of this understanding, it was aimed to emphasize the importance of the concept of human dignity and to state that individuals will benefit from the rights and freedoms they are born with simply because they are human.

Human rights are comprehensively regulated in the 1982 Constitution. It is possible to state the rights and duties of individuals included in the Constitution as “right to life, personal inviolability, personal liberty and security, privacy and protection of private life, freedom of residence and travel, freedom of religion and conscience, freedom of thought and opinion, freedom of science and art”. There is no such right as “right to access energy” in the 1982 Constitution. The rights included in the constitutions of countries are rights that have developed throughout the historical process. The content of human rights changes in parallel with the development of societies. Today, human rights can be classified as first generation, second generation and third generation rights. This classification is made depending on the diversification of the rights that people have acquired throughout the historical process or that people should have in line with the requirements of the age.

First generation rights, according to Jellinek's classification, correspond to negative status rights, which do not require any active action from the state, on the contrary, impose an obligation not to interfere, and active status rights, which allow people to participate in political life. Second generation rights are rights expressed as social and economic rights or rights of request. Second generation rights correspond to positive status rights. Many rights such as the right to work, the right to education, the right to social security, and the right to health are among the second generation rights. Third generation rights are the rights called collective rights, solidarity rights, or group rights. The scope of this right includes rights such as the right to the environment, the right to peace, the right to development, and the right to respect for the common property of humanity (Department of Training).

The right to access energy can be evaluated within the third generation rights class that can be evaluated within the scope of environmental rights. The right to access energy is one of the rights that should be adopted as a fundamental human right when considered in terms of human life today. The right to access energy, which has a direct effect on human life and represents a common need of humanity, enables people to perform their daily activities and sustain their lives. Human life has changed significantly in today's modern age. People have now switched from traditional methods to modern methods to meet their needs. The basis of human daily activities is now energy and systems that work depending on energy. In this direction, the basic needs of human life such as eating, drinking, sheltering, heating, working, earning income, etc. are made possible by energy and access to energy.

The right to access energy, when considered from a broad perspective, is also effective in the use of all other rights that humans have. Rights such as education, health, communication, work, transportation, etc., which are guaranteed by the 1982 Constitution, can be used with the presence of energy. The fact that energy affects all areas of life has made the use of human rights dependent on energy. For example, services such as education, health, communication, etc. operate on the basis of technology and therefore energy today. Problems experienced in access to energy cause people to not be able to benefit from the relevant services. Therefore, the right to access energy is directly effective in the use of human rights that the Constitution has adopted for humanity.

The right to access energy is a necessity brought about by the age. In today's world where energy dependency has increased and energy forms the basis of any formation, it is very important to adopt access to energy as a fundamental human right. According to Walker (2015), recognizing the right to energy as a fundamental human right will bring together everyone who wants to work for the sharing of energy resources and the protection of the global environment. This will, on the one hand, ensure that everyone has access to energy as a human being, while on the other hand, it will bring about protective measures for the environment.

Conclusion and Recommendations

In this study, where the right to access energy is discussed within the framework of human rights, it is suggested that the right to energy be accepted as a fundamental human right. Energy is a phenomenon that directly affects the basic activities of human life. People's ability to continue their daily lives depends on access to energy. It

is very difficult for individuals who cannot access energy to meet their basic needs and therefore to continue their lives in a healthy way.

Human rights are the rights that a person has simply because they are human. Human rights have developed throughout history and have found a place for themselves in legal texts. The 1982 Constitution in Turkey has regulated human rights in detail. However, the 'right to access energy' is not included as a human right in the 1982 Constitution.

The right to access energy is a right that is effective in the use of the fundamental rights that a person has. The ability of a person to use their rights such as education, health, communication, etc. is directly related to their access to energy today. Because in today's modern world, energy is at the basis of almost every activity. It is almost impossible to operate where there is no energy or when energy cannot be accessed. Therefore, accessing energy is not a luxury, but a basic human need. The strongest way to meet this need is to ensure that access to energy is accepted by the state as a fundamental human right.

References

- Can, M. (2019). İnsan Hakları ve Demokrasi Arasındaki İlişkinin Felsefi Analizi, *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23 (4), 2155-2167.
- Çeçen, A. (2013). İnsan Hakları ve İnsancıl Hukuk, *Journal of Yaşar University*, 8 (Özel Sayı), 809-830.
- Çeçen, A. (2020). *İnsan Hakları*, Astana Yayınları, Ankara.
- EPSU & EAPN. (2017). *Right to Energy for All Europeans*. Retrieved: December 07, 2024, from <https://www.eapn.eu/wp-content/uploads/2017/05/EAPN-2017-EAPN-EPSU-energy-poverty-leaflet-1138.pdf>.
- Erdoğan, M. (2012). *İnsan Hakları Teorisi ve Hukuku*, Orion Kitabevi, Ankara.
- Gözübüyük, A. Ş. (2000), *Anayasa Hukuku*, Turhan Kitabevi Yayınları, Ankara.
- Gül, F. (2013). Bir Değer Olarak İnsan Hakları ve İnsan Hakları Bilincinin Gelişiminde Demokrasinin Rolü, *Muhafazakar Düşünce Dergisi*, 9 (36), 67-75.
- Hecht, E. (2019). Understanding Energy As A Subtle Concept: A Model for Teaching and Learning Energy. *American Journal of Physics*, 87 (7), 495-503.
- Hepbaşlı, A. (2000). Sanayide Enerji Yönetim Programının Temelleri, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 33-45.
- Izci, F. ve Çamur, Ö. (2023). Çevresel Adalet ve Enerji Yönetimi, F. Arı (Ed.), *Çevresel Adalet ve Enerji*, Paradigma Akademi Yayınları, Çanakkale, 155-190.
- Kılınç, A. (2005). İnsan Haklarının Anayasal Konumu, *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 9 (1-2), 279-290.
- Onar, S, S. (1966). *İdare Hukukunun Umumi Esasları*. Hak Kitabevi, İstanbul.
- Özcan Buckley, A. ve Demirtaş, I. (2022). Sürdürülebilirlik Ekseninde, Türkiye Cittaslow Belediyelerinin Yenilenebilir Enerji Yatırımlarına İlişkin Bir Değerlendirme, I. Uluslararası Çevre, Enerji ve Ekonomi Kongresi Özet Bildiriler Kitabı, 48-49.
- T.C. Adalet Bakanlığı Eğitim Dairesi Başkanlığı. *Aday Memur Hazırlayıcı Eğitimi: İnsan Hakları Ders Notu*. Retrieved: December 07, 2024, from <https://edb.adalet.gov.tr/SayfaDetay/hazirlayici-egitim12052020022909>.
- Tepe, H. (2000). İnsan Hakları ve Anayasalarımız: 1924, 1961 ve 1982 Anayasaları, *Frankofoni*, 12, 337-345.
- Torun, Y. (2000). İnsan Hakları, *Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Dergisi*, (16), 415-424.
- Torun, Y. (2012). *Hukuk Felsefesi*, Orion Kitabevi, Ankara.
- Üskül Engin, Z. Ö. (2014). Birey Kavramının Gelişimi ve İnsan Hakları, *İstanbul Üniversitesi Hukuk Fakültesi Mecmuası*, 72 (1), 201-218.

Walker, G. (2015). The Right to Energy: Meaning, Specification and the Politics of Definition, *L'Europe en Formation*, 4, 26-38.

Yayla, A. (1991). İnsan Hakları'nın Kavramsal ve Aktüel Anlamı, *Türkiye Günlüğü Dergisi*, (14), 103-118.

**PERFORMANCE ANALYSIS OF HIGH-GAIN QUADRATIC BUCK-BOOST CONVERTER FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS****Mehmet BÜYÜK**

Adiyaman University, Electrical and Electronics Engineering, 02040, Adiyaman, Turkey

Ömer BERBERİskenderun Technical University, Erzin OSB Vocational High School, 31600, Dörtöyol, Hatay Turkey,
(Responsible Author)**Necdet Sinan ÖZBEK**Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Electrical and Electronics Engineering, 01250, Adana,
Turkey, ORCID: 0000-0002-7184-9015

University of California, Merced, Mechanical Engineering (MESA-Lab). Merced, CA 95343, USA

Mustafa İNCİİskenderun Technical University, Mechatronics Engineering, 31200, İskenderun, Hatay, Turkey
ORCID: 0000-0002-0900-59460**Abstract**

In this study, a high-gain quadratic buck-boost converter topology is proposed to provide electrical power to feed a load from different rated electric vehicle batteries. The designed circuit uses two switching elements to step up and step down the supply voltage at the output-side. In the designed system, a constant current controller method is used to supervise the energy transfer between vehicle batteries to feed a constant value resistive load with a 48 ohm rating. With a reference value of 1 A, it is proposed to maintain the output voltage at 48 V value. In order to validate the buck-boost operation of the designed converter, a 12 V battery and a 72 V battery at the input are used for step-up and step-down to supply the electrical power for the resistive load, respectively. The performance results validate that the designed converter effectively converts the desired voltage value at the output.

Keywords: High-gain quadratic buck-boost converter, Electric vehicle, Battery, Resistive load, Constant Current Mode Control.

Introduction

Electric vehicles (EVs) play a crucial role in today's society by helping to reduce greenhouse gas emissions and lessen the reliance on fossil fuel extraction (Islam, Iqbal, Marzband, Khan, & Al-Wahedi, 2022; Savrun, İnci, & Büyük, 2022). Since EVs rely on electrochemical batteries for energy storage, the process of recharging these batteries involves drawing electrical current, which is done by connecting to the power grid using suitable power converters (Sousa et al., 2018).

Power converters are widely utilized in numerous applications, spanning from low-power to high-power ranges (Büyük, Avşar, & İnci; Büyük, Tan, İnci, & Tümay, 2017; Sivakumar, Sathik, Manoj, & Sundararajan, 2016). One of the most promising uses of power converters is EV charging systems (İnci, Büyük, & Özbek, 2022; Kumar, Panda, Naayagi, Thakur, & Panda, 2024). External DC-DC power converters with buck/boost capabilities are recently examined for EV applications, where the input voltage can vary significantly over time due to various factors. Despite these fluctuations, a regulated voltage is necessary at the output terminals.

In such situations, the conventional buck–boost converter can be useful due to its ability to either increase or decrease the voltage relative to the input voltage level. However, its voltage gain is limited by the parasitic effects of the circuit elements, making it less suitable for applications requiring high voltage gain.

In literature, several buck–boost converters exist that suppose high-voltage gain. However, these studies have not taken full advantage of the gain feature (Ajami, Ardi, & Farakhor, 2014). Additionally, it is preferable to

choose converters with fewer active and passive components to reduce the size and complexity of the control circuit. Some quadratic buck–boost converters, described in (Ding & Wang, 2017), use two power switches in their design.

In this study, we have investigated a quadratic buck-boost (QBB) converter (García-Vite et al., 2019) with high-gain property for applications in EVs. In the proposed model, the EVs can supply different electric loads by adjusting duty cycle ratio in the pulse. The operating modes and detailed design are extensively presented for various applications. Furthermore, a constant current control method is applied to the proposed system for energy supply the load from the EV through the converter system. To show the effectiveness the proposed system, a simulation model is implemented and analysed through different cases. The system performance is examined under two distinct EVs having different battery voltages and capacities. Additionally, the battery characteristics of EVs are introduced. The performance results of two cases are evaluated and illustrated by considering State of Charge (SoC), battery current/voltage, duty ratio and load current/voltage values.

The current study is organized as follows: The design procedure regarding high-gain QBB converter topology is present in Section 2. Then, the control method is expressed in Section 3. The case studies are given in Section 4 to validate the efficacy of the designed converter. And, the study is summarized in Section 5.

Quadratic Buck-Boost Circuit Design

In this study, a high gain QBB converter interface is utilised to perform energy transfer from an EV to a resistive load. In the current section, the mathematical model, operating modes and system design principle for power transfer are explained in detail. The general structure of the converter and system interface are illustrated in Figure 1. As shown from the circuit, the converter includes, two electronic switches, three diodes, three inductances and four capacitors. Mosfets are used as switches in the designed circuit.

Operating Modes of Converter

The buck/boost converter used in this paper has two electronic control switches, where the switches are activated or deactivated at the same time. Thus, the converter has two operation situations due to simultaneous activation/deactivation of the switches. The operation modes and voltage/current waveforms of the critical points of the converter are demonstrated in Figure 2. Since the control switches operate synchronously, the converter has switch-on (Figure 2a) and switch-off (Figure 2b) cases.

In switch-on case, electronic switches S_1 and S_2 are turned on, and they behave as short-circuit during the pulse. On the other hand, the diodes (D_1, D_p and D_n) are in reverse biased state once the transistors are in conduction state. The currents of the inductors (L_1, L_2 and L_o) increase during switch-on state, and they store energy at this time. In ON-state time interval, the current and voltage relationships of the inductors are determined as follows (García-Vite et al., 2019);

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{V_{in}}{L_1} \quad (1)$$

$$\frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{V_{C_1} - V_{in}}{L_2} \quad (2)$$

$$\frac{di_{L_o}}{dt} = \frac{2V_C - V_{out}}{L_o} \quad (3)$$

where, (i_{L_1}, i_{L_2} and i_{L_o}) are currents of the inductors (L_1, L_2 and L_o), respectively. (V_{in}, V_{out}, V_{C_1} and V_C) are the input battery voltage, output load voltage, capacitor voltages of C_1 and $C_{1p,n}$, respectively.

In switch-off state, the transistors are turned-off, and they behave as open-circuit at this time. Differently, the diodes are in forward biased during inactive state of the electronic switches. In this state time interval, the

currents of the inductors decline, in which they support energy to the system. Thus, the current and voltage equations of the inductors in OFF-state time interval are defined as Eqs. (4-6) (García-Vite et al., 2019).

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{V_{in} - V_{C_1}}{L_1} \quad (4)$$

$$\frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{V_{C_1} - V_{in} - V_C}{L_2} \quad (5)$$

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{V_C - V_{out}}{L_0} \quad (6)$$

The absolute changes of the inductor currents in ON-state and OFF-state are equal over a commutation time period. Thus, the relations between the input battery voltage and output load voltage with respect to duty cycle (D) are obtained by rearranging the Eqs. (1-3) and Eqs. (4-6) as follows.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D \cdot (1 + D)}{(1 - D)^2} \quad (7)$$

From Eq. (7), the ratio between the input voltage and output voltage is unity when the duty equals to 0.3333. Under the unity value, the converter works in buck mode, and on the other side, the converter operates in boost mode over the unity value.

Parameter Selection

There are seven parameters are to be designed for the analysed converter model. Three inductances and four capacitors are required to be calculated. The values of the components are mainly dependent to input/output voltages, switching frequency, duty cycle, load resistance and ripple ratios of currents and voltages.

By considering switching ON state, the inductance L_1 can be derived from (1) as follows,

$$\Delta i_{L_1} = \frac{V_{in} D}{L_1 f_s} \quad (8)$$

where f_s is the switching frequency of the switches.

On the other hand solving Eqs. (1-6), the inductance L_2 and L_0 are obtained as below (García-Vite et al., 2019).

$$\Delta i_D = \frac{V_{in} D^2}{2 f_s (1 - D)} \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_2} \right) \quad (10)$$

The capacitor values are acquired from the capacitor currents. The capacitor values depend on voltage ripples over the capacitors. Thus, the capacitor values are generated as following (García-Vite et al., 2019).

$$\Delta V_{C_1} = \frac{V_o D (1 + D)}{RC_1 f_s (1 - D)} \quad (11)$$

$$\Delta V_{C_o} = \frac{V_o D}{RC f_s} \quad (12)$$

The output filter capacitor value can be computed from Eq. (12) through output voltage with ripple factor, duty cycle, frequency and load resistive value. In addition, the capacitors (C_p and C_n) can be selected similar to output filter capacitor.

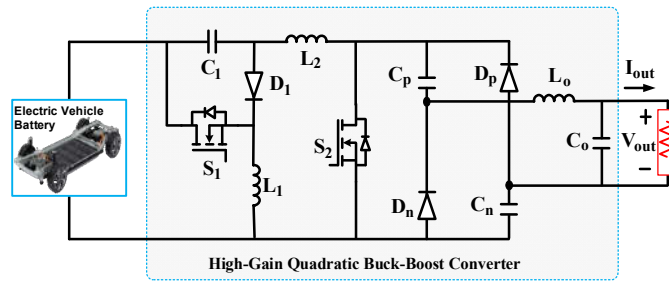


Figure 1. High-gain QBB converter circuit

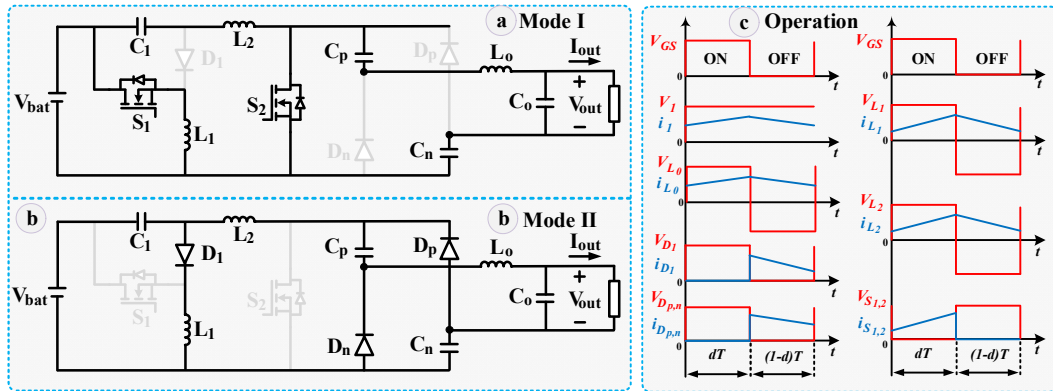


Figure 2. Equivalent circuits (mode 1 and mode 2) and operating waveforms

Constant Current Control Method

Compared to other current control methods, constant current control (CC) method control is significant and widely implemented control scheme utilized in controlling the current probe within the electrical system (Safayatullah, Elrais, Ghosh, Rezaii, & Batarseh, 2022). This is the case if the power supply is at varying voltage and constant current control, however, when it is at varied current and constant voltage control (CV control), the voltage is relatively steady, with a higher stress on current management (Pareek, Sujil, Ratra, & Kumar, 2020). The CC control method are employed in battery charger application, LED driver and other industrial problem need to use constant current (Dar, Siddiqui, & Bakhsh, 2022).

In Figure 3, CC control method is used to force the output current to a constant value depending with the load or when the input voltage is changing. A current feedback loop is depicted in the block diagram, wherein output current measurement with the amount of current supplied by the high-gain QBB converter through the feedback path.

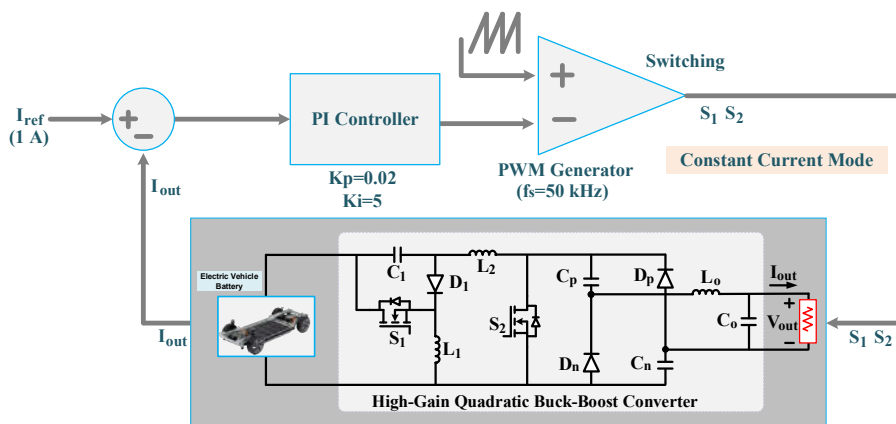


Figure 3. Constant current control method applied in battery charging

The actual output current, which act as the dependent variable of the compensator percent, is compared with reference current value. Then, the error signal is used to drive the controller (Shao et al., 2021). The control input should be employed to define the duty cycle of the switching element. One can easily imagine the ways in which the rate and capacity of the energy transfer may be controlled for every cycle of the switching process.

For instance, in case there is an enhancement of load resistance, it leads to current degradation in the present instance, and thus, the control loop will augment the duty ration in an effort to supply energy staggers to sustain a set state of the present current. Similarly, if the load resistance is less and the current increases from the reference value, the control loop in this case lowers the duty cycle of the PWM to stabilize the current,

This constant current control approach, as the name implies, works in tandem with the flexibility of the power converter, which allows the duty cycle to be modified in order to manage the current at a steady state. This is accomplished by feedback that samples the output current and prohibits the converter from delivering more than the allowable current, which is considered the optimal current level. The output voltage and output resistance are inversely related; as the resistance increases, so does the voltage.

Performance Results

This section examines the performance of the QBB circuit modelled in MATLAB/Simulink. Voltage is provided to the circuit via two independent batteries of varying voltage levels, and the results for each battery were compared. The goal of replicating the QBB circuit with two distinct voltage levels is to investigate its operation in both step-up and step-down modes. The two distinct voltage levels are given by EV1 and EV2 batteries, which have different characteristics. Table I shows the parameters of vehicle batteries.

Table 1. Parameter values of the batteries

	INPUTS	
	EV 1	EV2
Nominal voltage	12V	72V
Full charging voltage	13.967V	83.807V
Cut-off Voltage	9V	54V
Capacity	7Ah	5Ah
Nominal discharge current	3.0435A	2.1739A
Internal resistance	17.143mΩ	144 mΩ
Initial state of charge	%60	%80

Figure 4 shows the battery characteristic curves for EV1 and EV2 in two different cases. The curves show the discharge curves of the charged batteries with a rate of 0.43478C. Both batteries reach below their nominal voltage at 2.08 hours and reach their cut-off voltage at 2.3 hours. When they reach the cut-off voltages of 9V for EV1 and 54V for EV2, the batteries are discharged.

The lower curves show the discharge graphs of the initially charged batteries with 13.01 V and 78.07 V voltage with the same currents. In both 10A and 30A discharges, EV1 battery discharged in a longer time than EV2. This is because the battery capacity of EV1 is 7Ah and EV2 is 5Ah. In both cases, when the batteries are discharged with 10A, the time to reach the cut-off voltage level is longer than 30A.

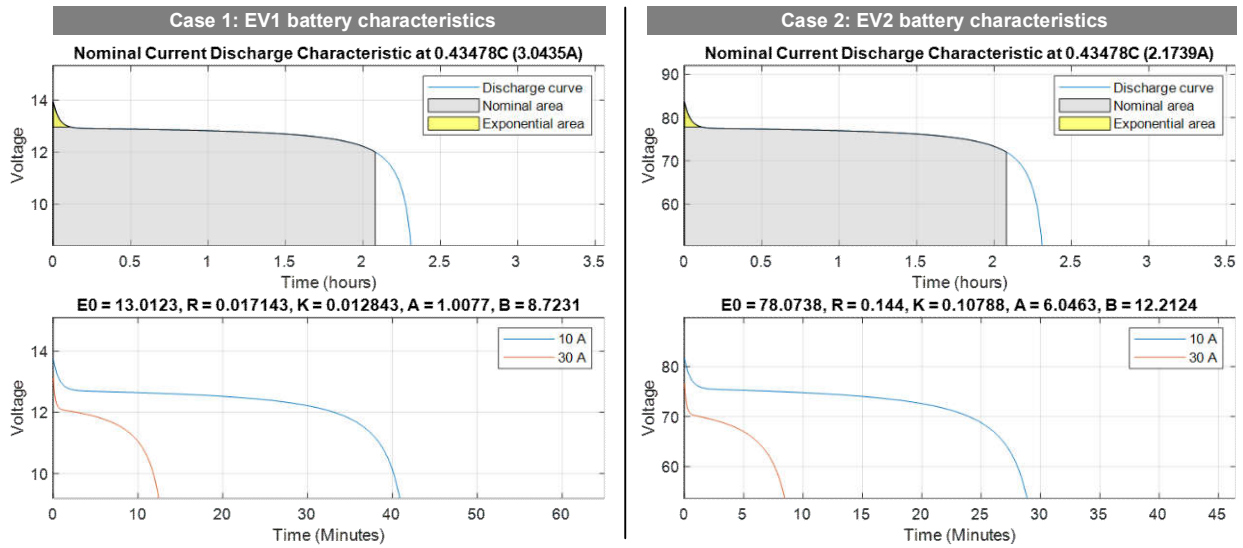


Figure 4. Electrical characteristics of batteries for case 1 and case 2

EV1 and EV2 batteries are connected to the input of the QBB circuit simulated for 2 seconds, and a constant current of 1A is required to pass through the 48Ω load at the output.

Figure 5 shows the simulation results for case 1, in which EV1 feeds the QBB converter circuit. In this situation, the circuit runs in step-up mode. At the end of the simulation, EV1's SoC value, which was 80% and had a voltage of 13 V at the start, had dropped to 79.97% and a voltage of 12.87V. Battery voltage and SoC levels indicate that the battery is discharged. As the output current is equal to 1A, the input current for the EV1 battery equals to 4 A, and the transistors are switched at a duty cycle of 0.534.

In the second case, the QBB circuit is operated in step-down mode and EV2 battery is connected to its input. EV2, which started the simulation with a 60% SoC value, decreased to 59.992% SoC value at the end of the operation. The voltage of EV2 decreased from 77.72V to 77.5V. As the battery continues to discharge, both SoC and voltage decrease. The output current reaches the reference value of 1A in 250 milliseconds, to create an output voltage of 48V at the load. The EV2 battery delivers 0.735A. The duty cycle is 0.263 at steady-state.

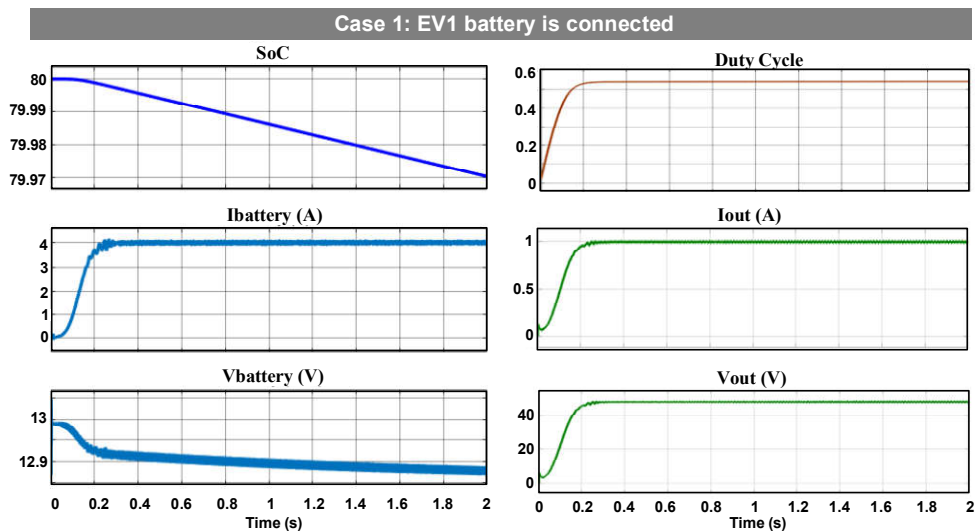


Figure 5. Performance results for case 1

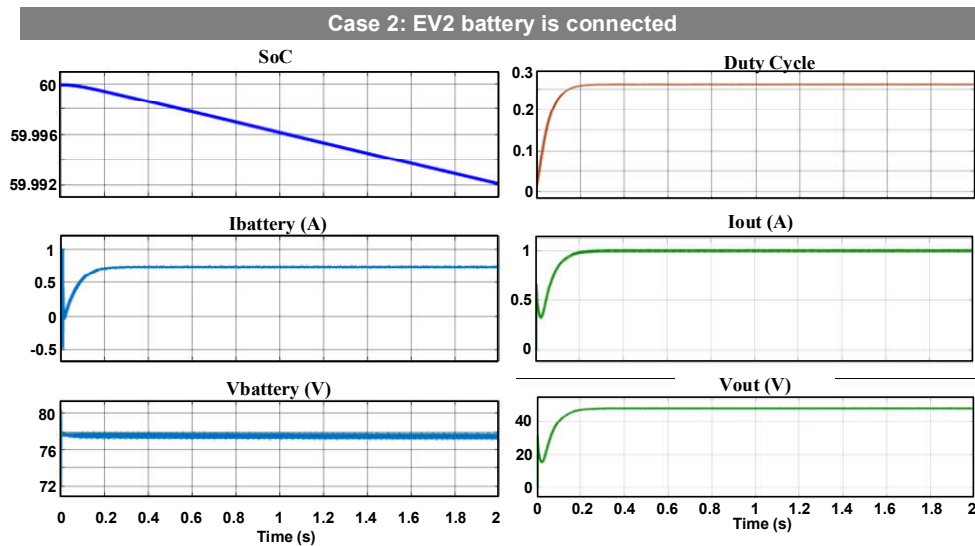


Figure 6. Performance results for case 2

Conclusions

This study investigates the accurate operation of a fixed load employing a QBB circuit that can operate through a broad voltage range and has high voltage conversion capabilities. The current flowing through the load was regulated using the constant current control approach by using Simulink program. In the simulations, the converter circuit is fed with batteries of two different voltages. When the performance results with both batteries are discussed, constant current controller method provides that the output current and voltage remain constant in both case studies, demonstrating the circuit's step-down and step-up functioning modes. As a result, EV batteries with large energy storage capacity can be used as stationary energy units and provide electrical power into a wide range of consumer loads.

Thanks and Information Note

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the Grant Number 123E452. The authors thank to TUBITAK for their supports.

Dr. Necdet Sinan Özbek was supported by the TÜBİTAK under the BİDEB 2219 International Postdoctoral Research Fellowship Programme with reference number 1059B192300663.

References

- Ajami, A., Ardi, H., & Farakhor, A. (2014). Design, analysis and implementation of a buck–boost DC/DC converter. *IET Power Electronics*, 7(12), 2902-2913.
- Büyük, M., Avşar, E., & İnci, M. (2022). Overview of smart home concepts through energy management systems, numerical research, and future perspective. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-26.
- Büyük, M., Tan, A., İnci, M., & Tümay, M. (2017). A notch filter based active damping of LLCL filter in shunt active power filter. Paper presented at the 2017 International Symposium on Power Electronics (Ee).
- Dar, U., Siddiqui, A. S., & Bakhsh, F. I. (2022). Design and control of an off board battery charger for electric vehicles. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 959-978.
- Ding, S., & Wang, F. (2017). A new negative output buck–boost converter with wide conversion ratio. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9322-9333.

- García-Vite, P. M., Rosas-Caro, J. C., Martínez-Salazar, A. L., Chavez, J. d. J., Valderrábano-González, A., & Sánchez-Huerta, V. M. (2019). Quadratic buck–boost converter with reduced input current ripple and wide conversion range. *IET Power Electronics*, 12(15), 3977-3986.
- İnci, M., Büyük, M., & Özbek, N. S. (2022). Sliding mode control for fuel cell supported battery charger in vehicle-to-vehicle interaction. *Fuel Cells*, 22(5), 212-226.
- Islam, S., Iqbal, A., Marzband, M., Khan, I., & Al-Wahedi, A. M. (2022). State-of-the-art vehicle-to-everything mode of operation of electric vehicles and its future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112574.
- Kumar, M., Panda, K. P., Naayagi, R. T., Thakur, R., & Panda, G. (2024). A Critical Analysis of Quadratic Boost Based High-Gain Converters for Electric Vehicle Applications: A Review. *Sensors*, 24(7), 2186.
- Pareek, S., Sujil, A., Ratra, S., & Kumar, R. (2020). Electric vehicle charging station challenges and opportunities: A future perspective. Paper presented at the 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3).
- Safayatullah, M., Elrais, M. T., Ghosh, S., Rezaii, R., & Batarseh, I. (2022). A comprehensive review of power converter topologies and control methods for electric vehicle fast charging applications. *IEEE Access*, 10, 40753-40793.
- Savrun, M. M., İnci, M., & Büyük, M. (2022). Design and analysis of a high energy efficient multi-port dc-dc converter interface for fuel cell/battery electric vehicle-to-home (V2H) system. *Journal of Energy Storage*, 45, 103755.
- Shao, S., Chen, L., Shan, Z., Gao, F., Chen, H., Sha, D., & Dragičević, T. (2021). Modeling and advanced control of dual-active-bridge DC–DC converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(2), 1524-1547.
- Sivakumar, S., Sathik, M. J., Manoj, P., & Sundararajan, G. (2016). An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1475-1485.
- Sousa, T. J., Monteiro, V., Fernandes, J. A., Couto, C., Meléndez, A. A. N., & Afonso, J. L. (2018). New perspectives for vehicle-to-vehicle (V2V) power transfer. Paper presented at the IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

IMPROVEMENT of VOLTAGE PROFILES in ELECTRIC POWER SYSTEMS with BESS INTEGRATION USING GWO ALGORITHM**Sevgi SAMYELİ**

Research Assistant, Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0002-2904-5515

Ahmet DOĞAN

Assist. Prof. Dr., Nuh Naci Yazgan University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri-Türkiye, ORCID: 0000-0002-9552-1997

Mustafa ALÇI

Prof. Dr., Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri-Türkiye, ORCID: 0000-0001-5478-6908

ABSTRACT

Battery energy storage systems (BESSs) are becoming increasingly prevalent in various aspects of our daily lives. Industrial applications, electronic devices, automotive sector, power drive systems of land, air and space vehicles and power grid applications are some of these areas. Effective integration of BESSs within power systems yields numerous benefits, both economically and from a technical constraints. In this study, various analysis have been performed to examine the effects of BESS integrated into the power system on the voltage, which is one of the technical constraints of the system. The capacity and maximum charge/discharge power of the integrated BESS is minimized with the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm to avoid unnecessary costs. These analysis were performed using MATLAB software on 34-bus standard test system. BESS was connected to the bus with the lowest voltage, as determined by the forward/backward load flow analysis method applied to the system, which considered the voltage levels across the power network. In addition, in establishing the times for charging and discharging the BESS, it was configured to store energy during periods of lower load demand and to supply power when voltage levels fall below specified minimum values. According to the obtained results, after the BESS was integrated into the 34 bus test system, improvements were observed in the voltage values of the test system. In particular, it was observed that the voltage value of bus 27, which has the lowest bus voltage, increased from 0.9423 p.u. 0.9501 p.u. at time 19.00 with the integration of the BESS. Consequently, the voltage limitations, which are crucial for the safety of the power system, are ensured by the minimum battery power and capacity incorporated into the system.

Keywords: Battery energy storage systems, Grey Wolf Optimization algorithm, Voltage stability, Distribution systems

INTRODUCTION

Today, the demand for electrical energy is increasing exponentially with the development of technology, industrialization and population growth. So much so that the expected electricity demand in the world in 2040 is estimated to increase by 30% compared to 2015 (Indragandhi et. al., 2017). In parallel with this increase in demand, serious increases will also occur on the supply side. The supply side of the energy sector consists of three classes according to resource type. These are fossil fuels, nuclear energy and renewable resources. Most of the electricity produced in the world is still supplied from fossil fuels. However, the European Commission aims to provide 32% of electricity generation from renewable energy sources by 2030 (News European Parliament, 2018).

Renewable energy is very important in terms of both diversifying resources and meeting energy demand with environmentally friendly green options. Therefore, the number of renewable energy sources in electricity generation systems should be increased. However, unpredictable fluctuating and intermittent power outputs of these sources due to meteorological conditions during the day may adversely affect system operation.

Accordingly, energy storage systems (ESS) become extremely important in terms of expanding the need for renewable energy, which has an unstable and intermittent structure.

Energy storage is the process of storing a type of energy in the same or a different form for later use. In general, EDSs can be classified in four different ways as thermal, mechanical, chemical and electrical according to their energy storage types (Karandeh et. al., 2019). In recent years, with the widespread use of electric vehicles (EVs) and the development of battery technologies, battery energy storage systems (BESS) have become more widely used. It is aimed to install approximately 600 GW of battery storage worldwide by 2030 (IEA, 2021). The electrical energy stored in BESS can be purchased when the supply is high and the price is low, and stored to be returned to the grid when the price and demand are high. This situation is used for electricity arbitrage in the grids.

BESSs are used in grid-connection applications to meet energy demand during peak hours (Mehrjerdi & Hemmati, 2019), as a power source for electric vehicles, to ensure energy continuity for consumers (Chouhan et. al., 2016), to improve power quality, time shifting (Abdelrazek & Kamalasadnan, 2016), frequency regulation, load balancing and voltage deviation reduction (Zhao et. al., 2023). The use of BESS in power systems offers grid operators the opportunity to effectively manage variations in renewable energy generation and load demand by providing a responsive and adaptive resource (Fırış et. al., 2024). In addition to all these, BESSs provide support to users in order to increase the security of the power supply in case of problems that may occur in the networks due to any natural disaster.

In order to benefit from the advantages discussed above, the location and sizing of BESSs should be planned in the best way. Otherwise, BESS may adversely affect system reliability, power quality, voltage and frequency regulation. Various studies have been conducted in the literature for this purpose. Yang et. al. determined the dimensions of BESS to reduce peak load demand and regulate voltage (Yang et. al., 2014). Farrakhifar et. al. used a genetic algorithm based method to locate the BEDS to reduce energy losses in the system (Farrokhifar et. al., 2013). Lo and Anderson used dynamic programming to maximize the fuel cost savings of the system and optimize the BESS size (Lo & Anderson, 1999).

In this study, BESS is used to improve the voltage profile of IEEE 34 bus radial distribution system. The optimum sizing of the BESS used in this study is performed with the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm. The optimum sizing refers to achieving the minimum power and capacity necessary to meet system requirements. Consequently, the system's performance surpasses the minimum voltage levels with minimum costs.

METHODS

Forward/Backward Sweep Load Flow Analysis

The goal of this study is to restore voltage drops that may arise in the system due to fluctuating loads to acceptable levels through the allocation of BESS. This goal is achieved with minimum BESS capacity. The lower limit of the voltage value for each bus in the power system is determined as 0.95 p.u. (per unit) (Karahan et. al., 2021). For this purpose, the bus voltage values of the system must be calculated. In the literature, various load flow analysis methods are proposed to calculate this value accurately. Compensation methods, Kirchoff voltage law, direct methods, Newton-Raphson, Gauss-Seidel and forward/backward sweep (FBS) methods are among the effective and reliable methods used for load flow analysis. In this study, the forward/backward sweep method, which is one of the most preferred methods for load flow analysis in the power distribution system, was used (Gangil et. al., 2020). Power summing method (PSM) and current summing method (CSM) are two well-known FBS methods. The FBS method consists of the following steps.

Step 1: Forward sweep

This stage starts from the first bus in the distribution line and ends at the last bus. The voltage of each bus is calculated at this stage. The voltage of the next bus is calculated by subtracting the voltage drop on the line from the previous bus voltage. This process is performed for all bus. If the difference between the current voltage value and the voltage value obtained in the previous iteration is below a certain value, the convergence criterion is met and the iteration ends.

Step 2: Backward sweep

This stage starts from the last bus in the distribution line and ends at the first bus. In PSM, active power P and reactive power Q are calculated for each bus in the system, while in CSM, current value is calculated for each line.

Grey Wolf Optimization Algorithm (GWO)

GWO algorithm is a population-based algorithm proposed by Mirjalili in 2014, inspired by the hunting behaviour of grey wolf packs in nature (Mirjalili, 2014). GWO has become preferred especially in complex and multidimensional optimization problems due to its effective results. The grey wolf pack consists of four different wolf species named alpha, beta, delta and omega. There is a certain hierarchy among these wolves. The alpha wolf has the most weight in managing the pack and making decisions. Beta wolves, on the other hand, act as the assistant of the alpha wolves who dominate the pack. They are also the most suitable candidates for the alpha role. Omega wolves are at the bottom of the hierarchy and they are responsible for obeying the other dominant wolves in the pack. Wolves that do not belong to the alpha, beta and omega classes are called delta wolves.

In the mathematical representation of the wolf hierarchy, the alpha position is viewed as the best solution. The next two most effective solutions are beta and delta, in that order. Omega signifies other potential (candidate) solutions. There are four main stages in the GWO algorithm. These are searching, encircling, attacking and hunting (Mirjalili, 2014). The search begins at random, followed by an evaluation of each wolf's fitness value based on the objective function. The top three positions with the highest fitness values are identified as the alpha, beta, and delta wolves, respectively. The positions of these wolves are updated at each iteration by Equations (1), (2) and (3) given below.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (1)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (2)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (3)$$

Where $X(t+1)$ indicates the updated position of the prey, X_α , X_β , and X_δ denote the locations of the alpha, beta, and delta wolves respectively, while A and C signify the vector coefficients. Population size and number of iterations are used as control parameters in the GWO algorithm. In this study, the population size and the number of iterations were set as 40 and 100, respectively.

Demand Load and Battery Energy Storage System (BESS) Model

The generation of electrical energy is organized by taking into account the balance between supply and demand. This is because, in these systems, electricity is used immediately after it is produced. However, today, due to changing demand, difficulty in instantaneous prediction, and increasing electricity usage areas, the use of BESSs has become mandatory. In addition to ensuring energy continuity, BESSs are responsible for storing (charging) when demand is low and transferring the stored energy to the load (discharge) instead of purchasing energy from the grid when demand is high. Thus, the energy demand during peak hours will be met. Equation (4) shows the energy balance in the battery (Polat et. al., 2022).

$$E_B(t) = E_B(t - \Delta t) - P_B(t) * \Delta t \quad (4)$$

Where $E_B(t)$ is the energy in the battery at time t , Δt is the specified time interval, E_n is the nominal capacity of the battery and $P_B(t)$ is the power drawn from or supplied to the battery. $P_B(t)$ is positive when power is

being drawn from the battery and negative when the battery is receiving power. The 24 hour loading rate used in this study is shown in Table 1. The values in the load profile are hypothetical. As can be seen, the demand reaches its maximum at time 17, 18, 19 and 20.

Table 1. 24 hour load profile

Time (hours)	Loading rate (%)	Time (hours)	Loading rate (%)
6	0.55	18	0.95
7	0.58	19	1
8	0.60	20	0.92
9	0.70	21	0.87
10	0.75	22	0.85
11	0.72	23	0.80
12	0.65	00	0.75
13	0.62	1	0.68
14	0.60	2	0.65
15	0.62	3	0.56
16	0.80	4	0.57
17	0.93	5	0.60

FINDINGS

In this study, 34 bus standard test system was used to examine the effect of BESSs on bus voltages. The data of the test system is presented in study (Prakash & Lakshminarayana, 2017). Simulations related to the study were performed in Matlab software. In this study, firstly, the load profile given in Table 1 is applied to the selected test system for 24 hours and the voltage values of all bus are calculated separately for each hour with the proposed load flow method. Then, the bus voltages below the 0.95 p.u. voltage value allowed for the safety of the power system and the time interval in which these voltages occur were determined. Figure 1 shows the hourly voltage variation of each bus. As can be seen from Figure 1, the voltage values of bus 23, 24, 25, 26 and 27 fall below 0.95 p.u. between time 17-20 when the load demand is maximum. It can be seen that bus 27 has the lowest voltage value with 0.9423 p.u. value in this interval.

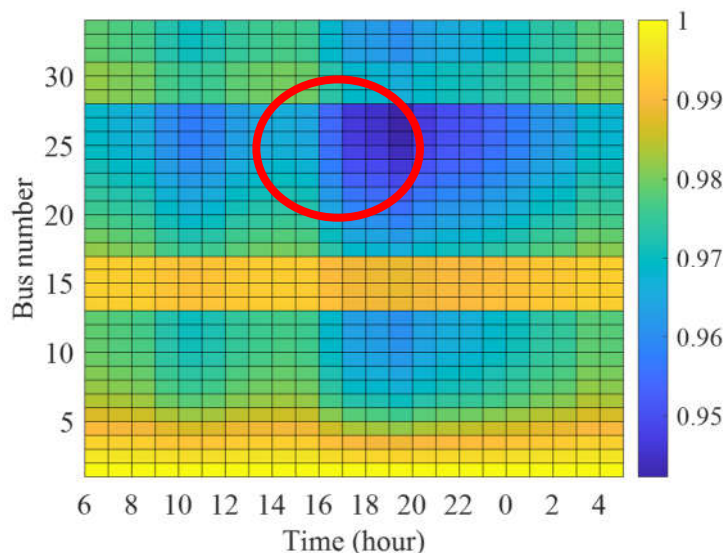


Figure 1. Voltage value of each bus before BESS integration

In this study, the time periods and bus voltages given above were taken into consideration while integrating BESS into the 34 bus power system. Based on this information, it is understood that BESS should be activated between time 17-20 when bus voltages are below 0.95 p.u. and should support the system by discharging

during these hours. For this reason, a BESS capable of providing uninterrupted energy to the system during the specified hours is needed. In the study, the charge/discharge power values between time 17-20 of the BESS integrated into the system are determined as the decision variables of the problem. Figure 2 shows the charge and discharge power values of the BESS determined by the GWO algorithm. As can be seen, the discharge powers of BESS at 17, 18, 19 and 20 hours are 114.8 kW, 153.9 kW, 250.7 kW and 94.1 kW, respectively. BESS delivers each of these power values for a duration of one hour and total supplied energy between time 17-20 provides the overall capacity needed to ensure that the bus voltages remain above the specified limit values. This capacity value is determined as 613.5 kWh by the GWO algorithm. On the other hand, BESS completely fills its total capacity of 613.5 kWh by charging with 204.5 kW of constant power between time 1-3 when the load demand is low. Considering the values given above, the discharge power of the BESS added to the system was 250.7 kW at time 19 as maximum supply power. This power value was determined as the maximum charge/discharge power value of BESS.

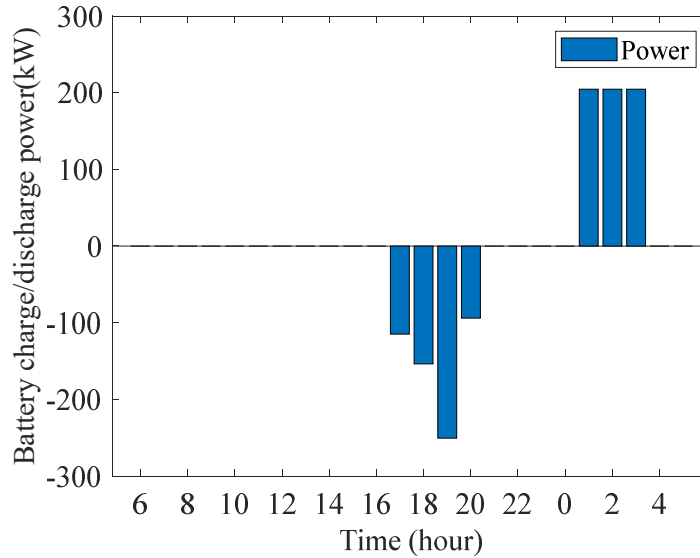


Figure 2. Charge/discharge power values of BESS

The voltage changes of buses 23, 24, 25, 26 and 27, which were below 0.95 p.u. before BESS integration into the power system are shown in Figure 3. As can be seen, all bus voltages which were below 0.95 p.u. before BESS integration, exceeded this value after integration. Especially when the voltage values of bus 27 between time 17-20 are considered, the voltage value which was 0.9465 p.u. at hour 17 before BESS integration increased to 0.9501 p.u., the voltage value which was 0.9453 p.u. at hour 18 increased to 0.9501 p.u., the voltage value which was 0.9423 p.u. at hour 19 increased to 0.9501 p.u. and the voltage value which was 0.9471 p.u. at hour 20 increased to 0.9500 p.u.. It can be clearly seen that the voltage profile was improved by allocating BESS to the 34 bus power system.

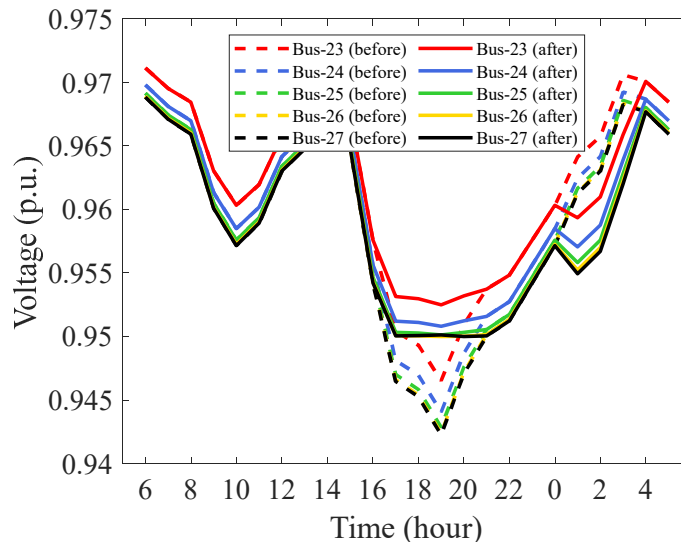


Figure 3. Voltage changes of bus with voltages below 0.95 p.u.

CONCLUSION

Research shows that battery energy storage is one of the ways to provide reliable and efficient energy to consumers by stabilising power fluctuations in electricity distribution networks. Battery energy storage systems (BESSs) provide frequency and voltage stability by reducing the difference between energy demand and generation capacity. In this study, various analysis are performed to show the effect of BESS on voltage stability. The analysis are performed on a 34 bus test system. During BESS integration, the bus and time periods where the voltage value is the lowest are taken into consideration. The discharge capability of the battery energy storage system explored in the research is decided by the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm when the system fails to meet the voltage requirements. The minimum required battery capacity is defined as the amount of energy that the BESS must supply continuously. As a result, the deployment of high-capacity BESS, which would raise the overall system expenses, is avoided. The GWO determines the minimum power and capacity specifications for the BESS implemented in the system, ensuring that the voltages at all buses remain above the minimum threshold at all times.

REFERENCES

- Indragandhi, V. Subramaniaswamy & Logesh, R.(2017). Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69 (2017) , p.129–143.
- Energy: new target of 32% from renewables by 2030 agreed by MEPs and ministers | News | European Parliament
- Karandeh, R. Prendergast, W. & Cecchi, V. (2019).Optimal scheduling of battery energy storage systems for solar power smoothing. *2019 SoutheastCon*, 1-6.
- IEA (2021). Energy Storage, Accessed on 20 October 2024, available: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>.
- Mehrjerdi, H. & Hemmati, R. (2019). Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks. *Journal of Cleaner Production* 234(2019), p.810-821.
- Chouhan, S. Tiwari, D. Inan, H. Khushalani-Solanki, S. & Feliachi, A. (2016). DER optimization to determine optimum BESS charge/discharge schedule using linear programming. *In 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1-5.

- Zhao, C. Andersen, P. Træholt, C. & Hashemi, S. (2023). Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182(2023), p. 113400.
- Abdelrazek, S. A. & Kamalasadnan, S. (2016). Integrated PV capacity firming and energy time shift battery energy storage management using energy-oriented optimization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), p.2607-2617.
- Fırış, F.A. Karadöl, İ. & Keçecioglu, Ö.F. (2024). Depolama entegreli dağıtım sistemlerinin ekonomik optimizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), ss.133-143.
- Yang, Y. Li, H. Aichhorn, A. Zheng, J. & Greenleaf, M. (2014). Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), p.982–991.
- Farrokhifar, M., Grillo, S., and Tironi, E. (2013). Loss minimization in medium voltage distribution grids by optimal management of energy storage devices, *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech*, 2013: 1–5.
- Lo, C. H. & Anderson, M. D. (1999). Economic dispatch and optimal sizing of battery energy storage systems in utility load-leveling operations. *IEEE Transactions on energy conversion*, 14(3), p. 824-829.
- Karahan, O. Özan, A. & Bağriyanik, M. (2021). The Effects of mobile battery energy storage systems on the distribution network. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1(2), p.69-75.
- Gangil, G. Goyal, S.K. & Srivastava, M. (2020). Optimal placement of DG for power losses minimization in radial distribution system using backward forward sweep algorithm. *IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering*, 1-6.
- Mirjalili, S. Mirjalili, S. M. & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, p.46-61.
- Polat, S. Bıyık, E. & Öztura, H. Ş. (2022). Batarya ve PV sistemi içeren bir mikro şebekenin gün öncesi enerji yönetim sistemi ile optimum işletilmesi. In *CIGRE Türkiye-III. Power Systems Conference*.
- Prakash, D.B. & Lakshminarayana, C. (2017). Optimal siting of capacitors in radial distribution network using whale optimization algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), p. 499-509.

SHORT-TERM ELECTRICITY LOAD FORECASTING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Fatih SERTTAŞ

Asst. Prof. Dr., Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering,
Afyonkarahisar-Türkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0003-3109-716X

Abstract

Short-term load forecasting is critical for efficient energy management and operational planning. This study explores the development of an artificial neural network (ANN) model to predict electricity consumption using data from Turkey's EXIST system. The model utilizes a time series approach, where the electricity load of the past three hours is used as input to forecast the next hour's consumption. By leveraging the inherent patterns in electricity usage data, the ANN-based model provides a robust framework for handling nonlinear and dynamic characteristics of power demand. The dataset spans 2022 and 2023 and is preprocessed to ensure consistency and accuracy. Feature engineering is performed to account for potential influences such as time of day and seasonal variations. The ANN architecture is designed and trained using a backpropagation algorithm, with hyperparameters optimized to minimize forecasting error. Performance parameters such as Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) are employed to evaluate the model's accuracy. Initial results indicate that the proposed model achieves high predictive performance, surpassing traditional statistical methods in capturing complex consumption patterns. This approach can guide energy suppliers and grid operators in improving demand-supply alignment, reducing costs, and supporting sustainable energy strategies. Future work will explore the integration of additional exogenous variables and apply deep learning techniques for enhanced forecasting precision.

Keywords: Short-term load forecasting, Artificial neural networks, Time series analysis, Energy management

Introduction

Electricity demand forecasting is critical in energy management and the reliable functioning of power grids in the present world. This paper aims to analyze the current energy role markets and demand, forecasting the increasing reliance on renewable energy sources. It helps utility companies meet the supply and demand of the system, plan for production and distribution, and ensure its reliability. In addition, it is crucial to minimize operation costs and enhance the viability of energy systems. The use of artificial intelligence has led to improved demand forecasting techniques with higher levels of accuracy and speed. Neural networks have been identified as an effective way of analyzing electricity consumption data's complex and variable nature since they do not require simple linear relationships as in traditional statistical models. These methods are superior to conventional statistical methods, especially when dealing with big data sets.

For example, Wang et al. (2006) showed that neural networks can provide significant improvements in forecast accuracy, especially under varying load conditions, which can lead to improved operational reliability (Wang et al., 2006). Similarly, Dai and Wang (2007) demonstrated the effectiveness of neural networks combined with pattern recognition algorithms for short-term load forecasting (Dai & Wang, 2007).

Another interesting application is presented by Veeramsetty and Deshmukh (2020), who used neural networks for load forecasting at a 33/11 kV substation and showed significant gains in forecasting accuracy (Veeramsetty & Deshmukh, 2020). This approach aligns with the findings of Laouafi et al. (2015), who integrated renewable energy forecasting with load forecasting using artificial neural networks (Laouafi et al., 2015).

The field has also witnessed the adoption of hybrid models, such as those combining Elman recurrent neural networks with optimization techniques. Sun and Xia reported that these approaches achieved superior accuracy compared to traditional methods, highlighting their practical applicability in energy planning (Sun & Xia, 2022). Nti et al. conducted a comprehensive analysis highlighting the high accuracy of artificial neural networks in modeling nonlinear demand patterns and the effectiveness of various forecasting algorithms and

error metrics (Nti et al., 2020). Similarly, Pinheiro et al. investigated advanced regression models and ensemble techniques that demonstrated significant error reductions when forecasting complex and changing system levels (Pinheiro et al., 2023).

Hybrid models are gaining attention for their ability to combine the strengths of multiple methods. Zhang et al. (2018) proposed a hybrid model integrating Intrinsic Empirical Mode Decomposition (IEMD), Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), and Wavelet Neural Networks (WNN) optimized by a Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA) (Zhang et al., 2018). Similarly, Viegas et al. (2016) used a hybrid Genetic Algorithm-Artificial Neural Network (GA-ANN) for short-term load forecasting, achieving high accuracy on datasets with diverse load profiles (Viegas et al., 2016). In addition, Al-Meshaie and Soltan (2011) presented a decomposition and segmentation methodology for time-series load data. Using data from the Kuwaiti electric network, their study illustrated the importance of tailored models for complex demand patterns (Al-Meshaie & Soltan, 2011). Kong (2014) investigated methods like Exponential Smoothing and ARIMA for second-level demand prediction, showing these approaches highly effective in peak load scenarios (Kong, 2014).

Koprinska et al. (2012) introduced an innovative weekday-based model, which combined linear regression with backpropagation neural networks (Koprinska et al., 2012). Moreover, Jiang et al. (2019) proposed an integrated model leveraging adaptive Fourier decomposition and moth-flame optimization. This method effectively captured nonlinearities and seasonal cycles, making it suitable for complex datasets (Jiang et al., 2019).

In summary, integrating neural networks into electricity load forecasting has revolutionized the domain, enabling precise and reliable predictions. This paper contributes to the growing literature by presenting a novel application of a feedforward neural network to predict electricity consumption using historical data. The study emphasizes the potential of neural networks to enhance operational efficiency and reduce forecasting errors.

Materials and Methods

Accurate short-term electricity consumption forecasting requires a systematic and data-driven methodology. In this study, an ANN model is designed and implemented to predict electricity load based on past time-series data. The methodology leverages the inherent patterns in historical electricity usage to provide precise forecasting. The steps and processes adopted in this study are detailed below.

The dataset of this paper is sourced from Energy Market Operations Corporation (EXIST-EPIAŞ) and spans the years 2022 and 2023. The data includes hourly electricity load values, which were preprocessed to ensure consistency, remove anomalies, and fill in missing values. Firstly, normalization is applied to scale the data between 0 and 1, which is crucial for enhancing the performance and convergence of neural networks during training.

The ANN model used a time-series forecasting framework, where the electricity load of the past three hours served as input to predict the next hour's load, as shown in Fig. 1. This approach allows the model to account for temporal dependencies in electricity demand. Additional features, such as the time and day of the week, were incorporated to capture cyclical and seasonal variations in consumption patterns.

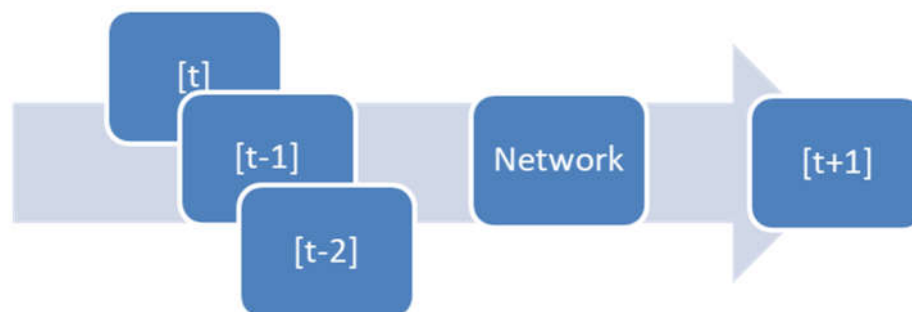


Figure 1. The schematic diagram for inputs and output of the ANN

The ANN architecture is designed with multiple layers, including input, hidden, and output layers. Hyperparameter optimization is performed to fine-tune the network, including the number of neurons, learning rate, and activation functions. A backpropagation algorithm trains the model by minimizing the loss function, which measures the difference between predicted and actual values. The dataset is split into training, validation, and test sets to evaluate the model's performance. Performance metrics such as Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) were calculated to quantify prediction accuracy.

This comprehensive methodology ensures a robust and effective forecasting model that captures electricity consumption's dynamic and nonlinear nature while maintaining high accuracy. Future studies may integrate additional features and advanced algorithms to enhance prediction precision further.

The process begins with loading the electricity consumption data from a CSV file containing columns for Date, Time, and Load. Only the Load column is extracted for analysis, representing electricity demand over time. The load data is then normalized to a range of [0, 1] using the normalize function to ensure that the data is scaled appropriately for training a neural network, improving model convergence and performance.

The data is divided into training and testing subsets to evaluate the model's performance. An 80% split is used, where the first 80% of the samples are allocated for training and the remaining 20% for testing. This division is critical to ensuring the model is trained on one subset of data while its predictive capabilities are tested on unseen data.

A feedforward neural network is designed using MATLAB. The network contains a single hidden layer with ten neurons and uses the Levenberg-Marquardt algorithm for training. This algorithm is an optimizing algorithm for the training process. The training process is divided into subsets: 70% for training, 15% for validation, and 15% for testing. The model is trained on the prepared input and target data, optimizing its weights to minimize prediction errors.

After training, the network's performance is tested using the testing data. Predictions are generated using the trained model, and the results are denormalized to restore their original scale. The Mean Squared Error (MSE) metric is computed to quantify the error between the predicted and actual load values, measuring model accuracy.

Results and Discussion

In this study, two widely used performance evaluation metrics, Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE), were employed to assess the accuracy of the forecasting model.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

Where the y_i are actual values, \hat{y}_i are predicted values, and the n is the number of data points.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

These metrics provide complementary insights into the model's performance:

RMSE penalizes more significant errors than smaller ones due to the squared term, making it sensitive to outliers. Conversely, MAE represents the average of absolute errors, offering a more straightforward interpretation of the typical deviation between predicted and actual values.

RMSE is found to be 3.19%, indicating the model's substantial predictive accuracy with only a small margin of error across all data points. MAE is calculated as 0.8431, highlighting the minimal absolute deviations between predictions and true values.

These low error metrics demonstrate the robustness and reliability of the proposed forecasting approach. The results validate the ability of the model to effectively capture the underlying patterns in the data and provide precise predictions. The combination of low RMSE and MAE confirms the suitability of the model for practical applications where prediction accuracy is critical.

Fig. 2 and the zoomed version Fig. 3 visualize the actual and predicted electricity load values on a plot for comparison. A solid blue line represents the actual values, while the predictions are shown as a dashed red line. The visualization helps to assess the alignment between the predicted and observed data. Additional annotations, including a grid, labels, and a legend, enhance interpretability.

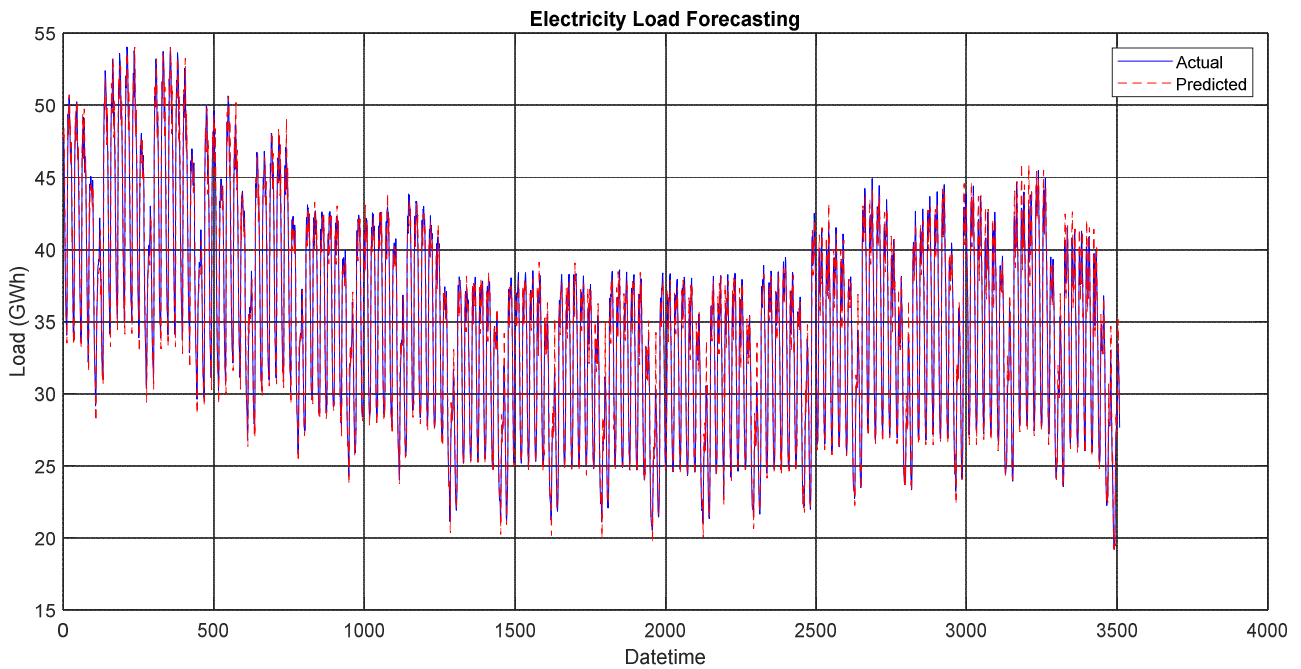


Figure 2. Comparison of Actual and Predicted Data

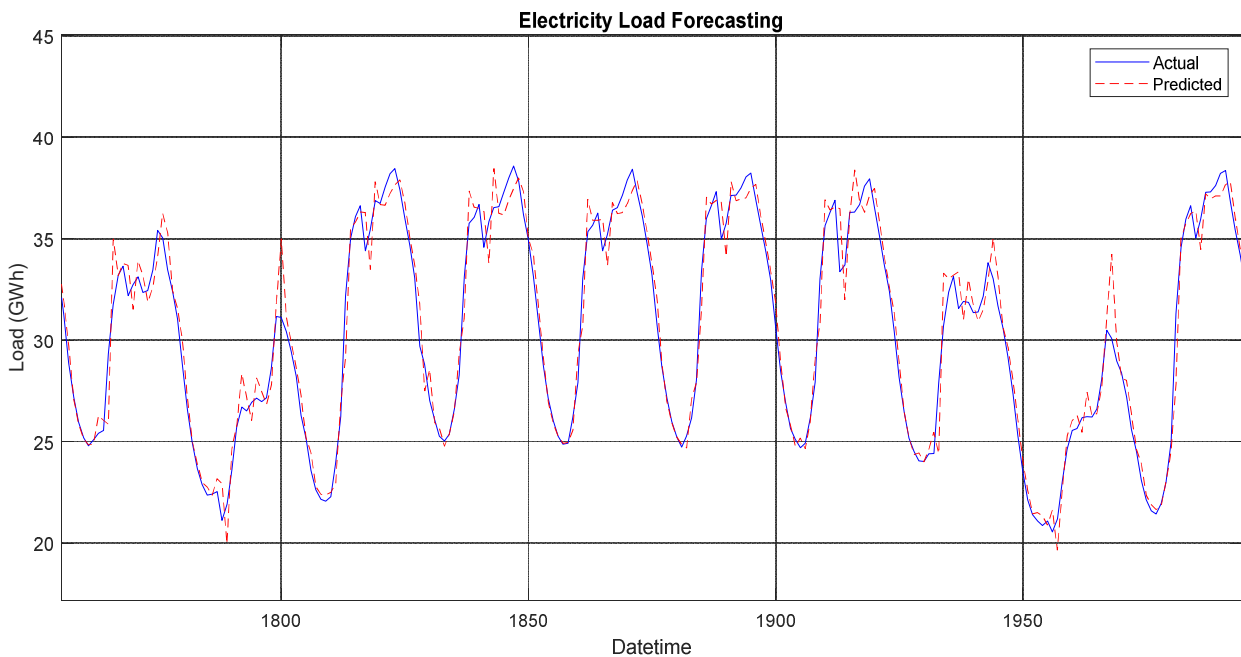


Figure 3. Zoomed version of the previous graph

The graph provided in Fig. 4-a displays the proposed model's training, validation, and test performance regarding mean squared error over epochs. The graph shows that the MSE for all datasets decreases significantly as the training progresses, especially during the initial epochs. This indicates that the model is learning to predict the output more accurately over time. By the 169th epoch, the best validation performance

is achieved with an MSE of 0.00058. This suggests that the model has effectively learned to generalize without overfitting.

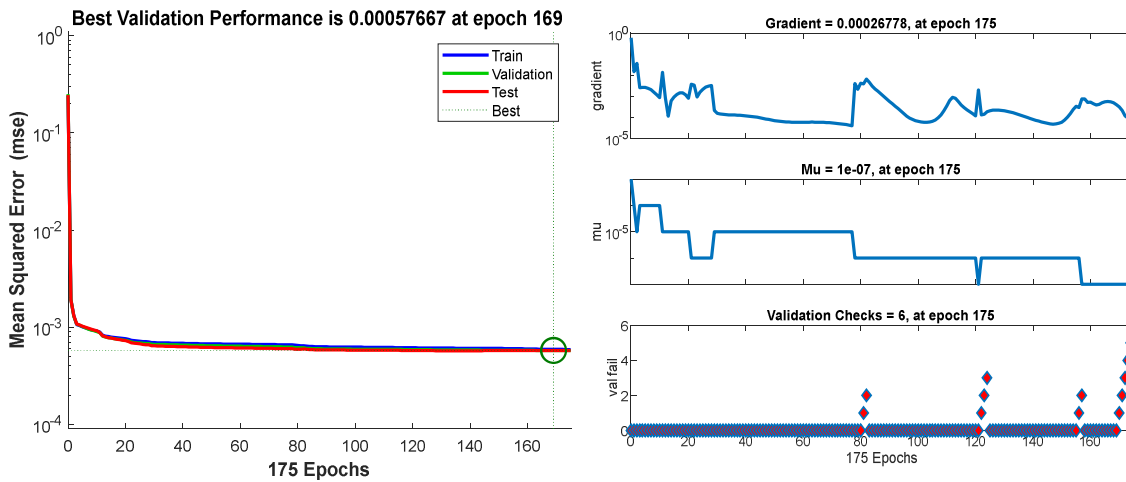


Figure 4. a) Validation performance graph b) ANN training metrics

The chart in Fig. 4-b displays various metrics and processes during the training of an ANN. It consists of three main components:

Gradient Chart (Top Panel): This chart shows the gradient's magnitude during the model's learning process. The gradient determines how the weights of the model are updated. Over time (as epochs progress), the gradient decreases, indicating that the optimization process is stabilizing and the model's learning is slowing down.

Mu (Step Size Parameter) Chart (Middle Panel): Mu is a hyperparameter used in the Levenberg-Marquardt algorithm, controlling the speed of optimization. In this chart, Mu starts at a relatively high value and decreases over time. This indicates that as the model approaches a local minimum, it begins to make finer adjustments.

Validation Checks Chart (Bottom Panel): This chart tracks the number of failed epochs based on validation performance. A failure occurs when the validation loss increases. As epochs progress, an increase in validation loss is observed, suggesting that the model is starting to overfit. Once the failure count reaches a threshold (6 in this case), the training may have been stopped.

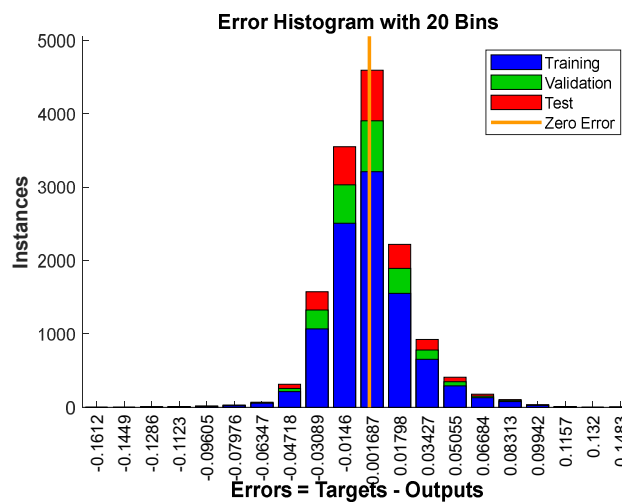


Figure 5. Error histogram

Fig. 5 represents the error histogram of an artificial neural network (ANN) model, providing insights into the accuracy of its predictions. The error histogram summarizes the distribution of differences between the predicted values and the actual (target) values. The graphs in Fig. 6 illustrate the relationship between the ANN's predicted outputs (Outputs) and actual targets (Targets). The four subplots analyze the model's performance across different data groups.

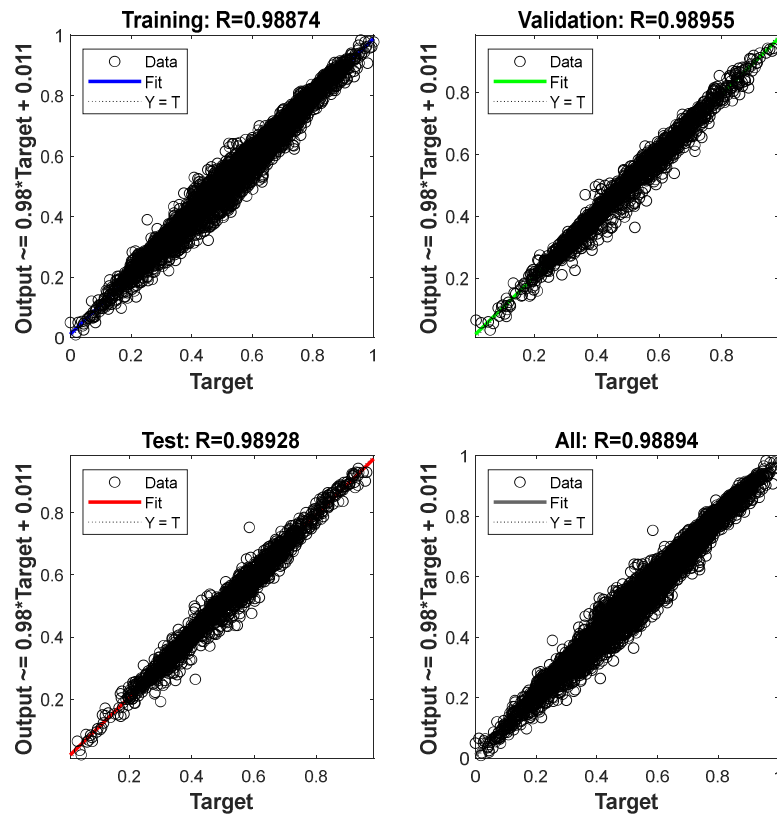


Figure 6. Output-Target Relationship

According to the graphs in Fig. 6, the model demonstrates high accuracy across all data groups (training, validation, and test). R values above 0.98 indicate a strong relationship between the predictions and targets. In addition to this, the close alignment of points with the $Y = T$ line shows the model is not exhibiting systematic bias and has strong generalization ability. The model's predictions are very close to the actual targets, indicating that the ANN is well-trained and highly effective for this kind of short-term load forecasting problem.

In order to see the relationship as statistical numbers, Table 1 is presented. As is seen in the table, each parameter is very close to the other in every row.

Table 1. Statistical comparison of test and prediction values

Parameter	Prediction	Actual Load Data	Formulation
Standard Deviation	7,06	6,99	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}$
Variance	0,2013	0,20	$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$
Arithmetic Mean Value	35,10 GWh	35,00 GWh	$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$
Geometric Mean Value	34,39 GWh	34,29 GWh	$\left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n}$
Skewness	0,2230	0,2186	$\tilde{\mu}_3 = \frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^3}{(N - 1) * \sigma^3}$
Kurtosis	2,5159	2,5097	$\text{Kurt} = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$

Conclusion and Recommendations

This study presents a traditional artificial neural network-based model for short-term electricity consumption forecasting, leveraging time series data from Turkey's EXIST (EPİAŞ) system. EXIST is presenting this data for public use. The innovative part of this study, using the electricity load from the past three hours as input, is that the model effectively captures electricity demand's nonlinear and dynamic characteristics. No other data, such as climate, etc., is utilized as input. The dataset, spanning 2022 and 2023, is preprocessed to ensure consistency and incorporated feature engineering to account for temporal and seasonal variations.

The performance of the proposed ANN model is evaluated using standard metrics, yielding a Percent RMSE of 3,19% and a Mean Absolute Error (MAE) of 0.8431. These results underscore the model's accuracy and robustness in forecasting electricity consumption, outperforming traditional statistical methods. The relatively low error rates highlight the model's potential for real-world applications, such as improving demand-supply alignment, optimizing operational planning, and reducing costs for energy suppliers and grid operators.

The findings of this study reinforce the efficacy of ANN-based forecasting approaches for managing complex consumption patterns in modern power systems. Future work will focus on integrating additional exogenous variables, such as weather and economic data, to further enhance prediction accuracy. Moreover, advanced deep learning architectures, including LSTMs and CNNs, will be explored to address even more complex and long-term forecasting challenges. This research provides a foundation for more efficient and sustainable energy management strategies.

References

- Al-Meshaie, E., & Soltan, H. (2011). A methodology for Electric Power Load Forecasting. *Alexandria Engineering Journal*. <https://dx.doi.org/10.1016/J.AEJ.2011.01.015>
- Cho, J., Kim, H., Ryu, H., Yoon, Y., & Choi, S. (2021). A Study on the Mid-Long Term Load Forecasting Method for Power Distribution Planning. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. <https://dx.doi.org/10.5370/kiee.2021.70.9.1239>
- Dai, W., & Wang, P.-K. (2007). Application of Pattern Recognition and Artificial Neural Network to Load Forecasting in Electric Power System. *2007 International Conference on Natural Computation*. <https://dx.doi.org/10.1109/ICNC.2007.260>
- Jiang, P., Li, R., Lu, H., & Zhang, X. (2019). Modeling of electricity demand forecast for power system. *Neural Computing and Applications*. <https://dx.doi.org/10.1007/s00521-019-04153-5>
- Kong, I.-Y. (2014). A Study on the Load Forecasting Methods of Peak Electricity Demand Controller. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. <https://dx.doi.org/10.14372/IEMEK.2014.9.3.137>
- Koprinska, I., Rana, M., & Agelidis, V. (2012). Electricity Load Forecasting: A Weekday-Based Approach. *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33266-1_5
- Laouafi, A., Mordjaoui, M., & Dib, D. (2015). One-hour ahead electric load and wind-solar power generation forecasting using artificial neural network. *International Renewable Energy Congress (IREC)*. <https://dx.doi.org/10.1109/IREC.2015.7110894>
- Nti, I. K., Teimeh, M., Nyarko-Boateng, O., & Adekoya, A. F. (2020). Electricity load forecasting: A systematic review. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. <https://dx.doi.org/10.1186/s43067-020-00021-8>
- Pinheiro, M. A. P., Madeira, S., & Francisco, A. P. (2023). Short-term electricity load forecasting—A systematic approach from system level to secondary substations. *Applied Energy*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120493>
- Sano, T., Tezuka, I., & Fukuda, Y. (2005). The load forecasting technology in the electric power distribution system. *Electrical Engineering in Japan*. <https://dx.doi.org/10.1002/EEJ.20146>
- Sun, Y., & Xia, H. (2022). Research on short-term power load forecasting based on Elman neural network with Genetic Algorithm. *2022 Chinese Automation Congress (CAC)*. <https://dx.doi.org/10.1109/CAC57257.2022.10055581>
- Veeramsetty, V., & Deshmukh, R. (2020). Electric power load forecasting on a 33/11 kV substation using artificial neural networks. *SN Applied Sciences*. <https://dx.doi.org/10.1007/s42452-020-2601-y>
- Viegas, J., Vieira, S., Melício, R., Mendes, V., & Sousa, J. (2016). GA-ANN Short-Term Electricity Load Forecasting. *Lecture Notes in Computer Science*. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4_45
- Wang, H., Li, B., Han, X., Wang, D., & Jin, H. (2006). Study of Neural Networks for Electric Power Load Forecasting. *Lecture Notes in Computer Science*. https://dx.doi.org/10.1007/11760023_185
- Zhang, J., Wei, Y.-M., Li, D., Tan, Z., & Zhou, J. (2018). Short term electricity load forecasting using a hybrid model. *Energy*. <https://dx.doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.06.012>
- Xiao, X., Mo, H., Zhang, Y., Shan, G., (2022). Meta-ANN – A dynamic artificial neural network refined by meta-learning for Short-Term Load Forecasting, *Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123418>.

**ANOMALY DETECTION IN INDUSTRIAL MACHINES USING EXPLAINABLE AI AND ACOUSTIC SIGNALS****Betül Sena ÇAĞLAR**

Sakarya University, Faculty of Computer and Information Sciences, Department of Computer Engineering, Sakarya-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6877-1387>

Devrim AKGÜN

Sakarya University, Faculty of Computer and Information Sciences, Department of Software Engineering, Sakarya-Türkiye, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0770-599X>

Abstract

In recent years, anomaly detection in industrial machinery has become a critical topic aimed at preventing failures, improving maintenance processes, and enhancing production efficiency. As industrial machines operate continuously under varying conditions, early detection of anomalies can reduce unplanned delays and maintenance costs. Acoustic signals are important data sources for evaluating the health of industrial equipment. This study proposes a lightweight machine learning (ML) approach for anomaly detection in industrial machines using acoustic signals. For this purpose, audio features are extracted, and their statistical metrics are calculated to define a new dataset for anomaly detection. Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques are employed to determine the most effective features that contribute to anomaly detection of machines. The proposed method tested using the publicly available MIMII Dataset: Sound Dataset for Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection. The results demonstrate that the proposed approach achieves highly promising outcomes, with an accuracy of 99.7% and an AUC score of 99.9% in classifying anomalies in industrial machines.

Keywords: Acoustic Signals, Machine Learning, Anomaly Detection, Explainable AI, Audio Features

Introduction

The Industry 4.0 revolution has facilitated the integration of technologies such as big data, the Internet of Things (IoT), and cloud computing, enabling continuous data collection from industrial machines. These technological advancements have led to the development of intelligent algorithms capable of learning normal system behaviours and detecting anomalies. Machine learning (ML) and signal processing techniques play a pivotal role in detecting and preventing potential issues within industrial systems. The valuable information extracted from various signals such as acoustic, current, and vibration allows machine learning algorithms to operate more effectively and accurately. Consequently, abnormal conditions in production processes can be detected early, reducing the likelihood of potential faults, costly downtimes, and defective products being released to the market.

Anomaly detection has become a critical focus in industrial machines for pre-failure detection, improving maintenance processes, and enhancing production efficiency. As industrial machines operate continuously under varying conditions, early anomaly detection can significantly minimize unplanned downtimes and maintenance costs. Among the various data sources, acoustic signals offer unique advantages in fault and anomaly diagnosis, including non-contact and non-invasive measurements, compatibility with harsh environmental conditions, and independence from the equipment's surface properties. These characteristics make audio-based methods ideal for applications requiring early fault detection, remote diagnosis, and online monitoring (Henriquez et al., 2014).

Recent advancements in machine learning and deep learning have further enhanced the potential of audio-based fault detection. For example, a 2023 study reported a significant increase in research publications focusing on this topic, with over 58% of works in the last three years (Tang et al., 2023). Audio-based approaches have also been effectively applied beyond manufacturing, including industries like railway transportation, electrical energy, and coal mining (H. J. Liu et al., 2020; Si et al., n.d.; Zhang et al., 2016).

In this study, we propose a lightweight machine learning (ML) approach for anomaly detection in industrial machines, leveraging the unique properties of acoustic signals. By extracting audio features and calculating their statistical metrics, a comprehensive dataset for anomaly detection is developed, enabling more accurate and efficient identification of potential abnormalities in machine operating conditions. To enhance interpretability and identify the most impactful features for anomaly detection across different machine types, Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques are employed, offering actionable insights for real-time condition monitoring and predictive maintenance.

Related study

Fault and anomaly detection based on acoustic signals in industrial machinery has gained significant attention in recent years. The datasets utilized for evaluating studies and comparing the performance of methods play a critical role in testing the generalizability and applicability of these approaches. Among the most frequently used datasets in studies focusing on anomaly detection via audio signals are MIMII and ToyADMOS (Koizumi et al., 2019; Purohit et al., 2019).

These datasets provide a solid foundation for evaluating and comparing the performance of audio-based methods due to their inclusion of a wide variety of machine types and diverse operating conditions. Their ability to simulate anomalies for different machine types and under various environmental scenarios has established them as a standard in the literature. In this study, major works conducted using the MIMII and ToyADMOS datasets and the findings derived from these studies are thoroughly examined to analyze the effectiveness of the proposed method and its relevance in the field.

In the literature, anomaly and fault detection from acoustic signals has been performed using both supervised and unsupervised methods based on various machine learning and deep learning algorithms. Unsupervised methods typically rely on training with only normal condition data and detecting anomalies based on reconstruction error or statistical models such as density estimation (Chinnasamy et al., 2024; S. Liu et al., 2024; Z. Liu et al., 2022). In contrast, supervised methods aim to achieve a certain classification accuracy by training on labeled datasets that include both normal and abnormal conditions.

Since the results presented in this study are obtained using a supervised method, the literature review primarily focuses on supervised approaches for acoustic anomaly detection. For example, a hybrid approach combining texture features from Gammatone spectrograms and Empirical Mode Decomposition (EMD) with an extended SqueezeNet model incorporating self-attention achieved 96.46% and 89.32% accuracy on the ToyADMOS and MIMII datasets, respectively, demonstrating lower parameter usage and computational complexity compared to traditional SqueezeNet models (Zabin et al., 2024).

In a previous study by the author, anomaly detection on MIMII pump sound data was conducted using Mel spectrogram features and a supervised CNN approach, achieving 97.8% accuracy and 91.4% AUC (Çağlar et al., 2021b). Furthermore, a hybrid model combining Deep Convolutional Neural Networks (DCNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) layers processed 2D grayscale images derived from the Hilbert transform. This model demonstrated exceptional performance on the MIMII and ToyADMOS datasets, achieving F1 scores of 99.6% and 99.8%, respectively, while significantly reducing training time through transfer learning (Zabin et al., 2023).

Ota and Unoki developed a timbre-based method (TF-ASD) using five timbral metrics and two novel short-term features inspired by human auditory perception. With SVM classification, the method achieved 98.4% accuracy on MIMII dataset (Ota & Unoki, 2023). Another study utilized hybrid feature extraction methods, including Mel spectrogram, spectral skewness, and spectral centroid, combined with classifiers like XGBoost and SVC. XGBoost trained on these features achieved 98.4% accuracy and 0.98 F1 score (Singhal et al., 2024).

Gantert et al. extracted features such as Chroma, MFCC, and Spectral Bandwidth from the MIMII dataset. Using SVM and Multilayer Perceptron (MLP), they achieved an average AUC of 97.4% with MLP under 6 dB SNR conditions (Gantert et al., 2021). A lightweight deep learning model, HM-Net, was proposed for industrial machine audio analysis. With only 67k parameters, it effectively utilized log-Mel spectrograms and SoundNet transfer learning for feature extraction, demonstrating improved classification performance with SVM classifiers (Singh & Arvind, 2023).

AFExplorer, an interactive system, was developed for feature selection and visualization using time, frequency, and cepstrum-based features. Supervised classifiers such as AdaBoost achieved anomaly detection with an average F1 score of 0.84 (Wang et al., 2022). Another study balanced imbalanced datasets using SMOTE and applied Z-score normalization. Models trained on features like MFCC, spectral centroid, and zero-crossing rate achieved improved performance with fewer classifiers for multi-class scenarios, reducing classifier count by 83% compared to binary models (Gantert et al., 2024).

To provide a clearer comparison of the studies conducted on supervised acoustic anomaly detection, a summary table is included below. This table highlights the key methods, datasets, feature extraction techniques, classification algorithms, and performance metrics reported in the literature. By presenting the information in a structured format, it aims to offer a concise overview of the approaches and their effectiveness in various experimental settings.

To provide a structured overview of the key studies on supervised acoustic anomaly detection, Table 1 summarizes the methods, datasets, feature extraction techniques, classification algorithms, and performance metrics reported in the literature.

Table 1. Comparison of Supervised Acoustic Anomaly Detection Studies

Paper	Year	Dataset	Method	Metrics (%)
(Zabin et al., 2024)	2024	MIMII, ToyADMOS	A hybrid texture representation technique using Empirical Mode Decomposition (EMD) and Gammatone spectrogram filters combined with Self-Attention SqueezeNet.	MIMII: 89.32 ACC ToyADMOS: 96.46 ACC
(Çağlar et al., 2021)	2021	MIMII	Supervised learning approach using a CNN model trained with Mel spectrogram images.	Pump: 97.8 ACC 91.4 AUC
(Ota & Unoki, 2023)	2023	MIMII, ToyADMOS	A combination of five timbral metrics and two short-term features (waveform fluctuation analysis and pitch shift), classified with SVM.	Fan: 98.5 F1 Score Pump: 95.9 F1 Score Slider: 93.7 F1 Score Valve: 79.8 F1 Score ToyCar: 98.4 F1 Score
(Zabin et al., 2023)	2023	MIMII, ToyADMOS	2D grayscale images derived from the Hilbert transform classified with a hybrid model containing CNN and LSTM layers.	MIMII: 99.6 F1 Score ToyADMOS: 99.8 F1 Score
(Singhal et al., 2024)	2024	MIMII	XGBoost model trained on features like Mel spectrogram, spectral skewness, and spectral centroid showed the best performance.	98.4 ACC 0.98 F1 Score
(Gantert et al., 2021)	2021	MIMII	Spectral features (Chroma, MFCC, SC, SB, SR, ZCR) extracted and classified with SVM and MLP. MLP showed better results under 6 dB SNR conditions.	Fan: 99.7 AUC Pump: 98.3 AUC Slider: 98.5 AUC Valve: 92.9 AUC
(Singh & Arvind, 2023)	2023	MIMII	Feature extraction using M-Net (67k params) and SoundNet based transfer learning, with mel spectrogram-based time-frequency representations. Classified with SVM.	Fan: 100.0 AUC Pump: 90.0 AUC Slider: 94.0 AUC Valve: 84.0 AUC ToyConveyor, ToyCar: 85.0+ AUC ToyTrain: 70.0 AUC
(Wang et al., 2022)	2022	MIMII, ToyADMOS	AFExplorer facilitated feature selection from time, frequency, and cepstrum-based features. Anomaly detection conducted with classifiers like AdaBoost.	Fan: 86.6 F1 Score Valve: 83.3 F1 Score ToyCar: 82.2 F1 Score
(Gantert et al., 2024)	2024	MIMII	Features such as MFCC, Spectral Centroid, Spectral Bandwidth, Spectral Rolloff, and ZCR extracted. Imbalanced data balanced using SMOTE, with anomaly detection using QDA, LDA, ERT, RF, XGB, LGBM, etc.	Fan: 65.0 AUC Pump: 79.0 AUC Slider: 66.3 AUC Valve: 73.6 AUC

Materials and Methods

In this section, the dataset used in the experimental study, the data preparation steps, the training of the models, and the performance evaluation procedures are explained in detail.

Dataset

"The MIMII Dataset: Sound Dataset for Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection" is an industrial acoustic dataset where sounds corresponding to various anomalies, such as contamination, leakage, imbalance, and rail damage, were collected from four machines (fan, pump, valve, and slide rail) in a real factory environment with background noise. Each machine type comprises seven different product models, and for each model, both normal and abnormal sound data are provided. The dataset includes 10-second audio recordings captured using an eight-channel microphone array at a sampling rate of 16 kHz and 16-bit depth per sample (Purohit et al., 2019).

During operation, each machine type encounters specific issues, leading to the production of abnormal sounds. Table 2 outlines the operational modes of the machines and provides examples of the anomalies represented in the dataset.

Table 2. Operations and anomalous conditions for machine types (Purohit et al., 2019).

Machine Type	Operational Mode	Example Anomalies
Pump	Suction from / discharge to a water pool	Leakage, contamination, clogging, etc.
Valve	Open / close repeat with different timing	More than two kinds of contamination
Fan	Normal operation	Unbalanced, voltage change, clogging, etc
Slide rail	Slide repeat at different speeds	Rail damage, loose belt, no grease, etc

For this experimental study, only the fan and pump sound data from the MIMII dataset were used, with a focus on their respective anomalies.

Signal Processing and Feature Extraction

This paper outlines a series of signal processing techniques, including spectral feature extraction, to generate appropriate input features for machine learning models. Key features, such as Spectral Centroid, Spectral Bandwidth, and Spectral Contrast, are computed to capture the frequency domain characteristics of the audio signals. These features are then summarized using various statistical metrics, such as mean, variance, and skewness, to support efficient learning and the detection of abnormal patterns in the data.

For the analysis of audio signals and extraction of features for machine learning models, several Python libraries were employed. A brief overview of these libraries and their respective functionalities is provided below:

- **Librosa:** Used for spectral analysis, time-frequency transformations, and feature extraction from audio signals (McFee et al., 2023).
- **SciPy:** Applied for signal processing tasks like power spectral density (PSD) and Hilbert transform calculations (Virtanen et al., 2020).
- **Statsmodels:** Used for statistical tests, time series analysis, and autocorrelation (Seabold & Perktold, 2010).
- **Statistics:** Employed for basic statistical metrics such as mean, median, and variance.

- **NumPy and Math:** Used for numerical and mathematical computations.

In this study, a comprehensive feature extraction methodology is employed to analyse acoustic signals from industrial machines. By leveraging signal processing techniques and statistical metrics, a robust dataset is created for effective anomaly detection. This section provides details on the 16 audio signal features that were extracted, as well as the statistical metrics that were applied. The 16 different audio signal features extracted in this study are as follows:

1. **Spectral Centroid:** Represents the center of mass of the frequency spectrum, indicating the distribution of energy within the signal (Giannakopoulos & Pirkakis, 2014).
2. **Spectral Bandwidth:** Measures the width of the frequency spectrum covered by the audio signal.
3. **Spectral Rolloff:** Represents the frequency below which a specified percentage (commonly 85%) of the total spectral energy is concentrated. The "rolloff frequency" is the first frequency at which this energy threshold is reached, indicating the cutoff point for the higher frequency components of the spectrum. This feature reflects the portion of the signal's energy concentrated in lower frequencies (Ugarte & Arias-Arias, 2024).
4. **Spectral Contrast:** Measures the energy difference between spectral peaks and valleys across frequency bands, providing detailed insights into the dynamic range and spectral characteristics. This feature captures harmonic and non-harmonic elements, offering more detailed spectral information than MFCCs and excelling in tasks like music genre classification (Jiang et al., 2002).
5. **Spectral Flatness:** Measures the flatness of the frequency spectrum and helps distinguish between noise and tonal characteristics of an audio signal. A higher spectral flatness (close to 1.0) indicates that the spectrum resembles white noise, while a sharper spectrum suggests more tonal or pitched sounds. This feature is useful for identifying whether a sound is "noisy" or "sharp" (Dubnov, 2004).
6. **Spectral Spread:** Measures the extent of energy distribution across the audio signal's spectrum and indicates how widely the frequency components are spread around the center frequency. This feature is closely related to the signal's bandwidth (Sharma et al., 2020).
7. **Power Spectral Density (PSD):** Measures how power is distributed across the frequency components, helping to understand the signal's frequency content. The Welch method is used to estimate PSD, reducing noise in the signal and providing more reliable spectral analysis.
8. **Amplitude Envelope:** Shows the amplitude variation of the sound wave over time, providing insights into the signal's overall intensity changes. It tracks the changes in amplitude levels, helping to identify sections of the sound that are louder or quieter. This time-domain feature is valuable for analysing the waveform's structure.
9. **RMS Energy:** Measures the energy level of the signal, indicating the overall energy density of the audio. It represents the overall power level of the signal, acting as an indicator of its loudness or intensity. RMS (Root Mean Square) energy is less sensitive to outliers compared to the Amplitude Envelope. For each pitch class, statistical properties such as the average, minimum, maximum, standard deviation, and total energy are extracted.
10. **Chroma Features:** Represent the tonal content of a audio signal, focusing on the 12 pitch classes (C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#, B). These features are useful for detecting harmonic structures and tonal shifts, which can indicate potential anomalies. The average, minimum, and maximum energy levels are extracted for each pitch class (Kumar, 2024).
11. **CQT (Constant-Q Transform):** Provides a time-frequency analysis particularly useful for signals with a wide frequency range, offering detailed information at both low and high frequencies (Schörkhuber, n.d.). Extracted features include total energy (cqtSum), energy variability (cqtStd), maximum amplitude (cqtMax), and minimum amplitude (cqtMin).
12. **Hilbert Transform:** Decomposes a signal into its analytic components, allowing the extraction of instantaneous amplitude, phase, and frequency. This transform is a powerful method for analysing signals in the time domain without needing conversion to the frequency domain (Medoued et al., 2013). In this study, statistical metrics such as the mean and maximum of instantaneous amplitude, the standard deviation and entropy of instantaneous phase, and the mean and standard deviation of

instantaneous frequency were extracted. These features assist in analysing signal characteristics and detecting anomalies.

13. **Zero-Crossing Rate:** Measures how often the signal changes its sign, indicating the frequency of zero crossings and reflecting the general shape of the waveform.
14. **Band Energy Ratio:** Represents the ratio of energy in specific frequency bands, useful for analysing energy distribution across different frequency ranges. It calculates the energy in a given frequency band relative to the total energy of the signal, often used to compare low-frequency energy to high-frequency energy over a specific time period (Agrawal, n.d.).
15. **Decibel Features:** Measures signal loudness, scaled logarithmically to match human hearing perception. Amplitude values of frequency components, extracted via STFT, are converted to decibels (dB), and the average, maximum, and minimum dB values are included in the dataset.
16. **Magnitude Features:** Represents the absolute amplitude of the signal's frequency components. These features capture the strength of the frequency components at each time frame, allowing for analysis of the signal's dynamic changes in frequency over time.

Since many of the 16 extracted signal features are computed over time windows, they result in sequences (typically containing 312 elements). Instead of using these sequences directly as inputs to machine learning models, they are summarized using statistical metrics to create a more compact dataset. The following section describes the statistical metrics used to summarize these features:

- **Mean and Harmonic Mean:** Capture the central tendency of the feature values.
- **Variance and Standard Deviation:** Reflect the dispersion and variability within the data.
- **Median, Maximum, and Minimum:** Provide insights into the data's range and central value.
- **Skewness:** Indicates asymmetry in the distribution.
- **Median Absolute Deviation (MAD):** Measures the dispersion around the median.
- **Total Energy:** Represents the cumulative energy content across frames.
- **Autocorrelation Coefficients:** Evaluate signal similarity over time lags, indicating temporal regularity.
- **Normality Tests:** Anderson-Darling, Kurtosis, and Jarque-Bera tests assess the normality of the data distributions.

The 16 audio signal features were summarized using statistical metrics, resulting in a final dataset of 110 attributes. This dataset is designed for use in machine learning models for the subsequent analysis.

Learning Models

In the modeling phase, four different supervised learning algorithms were evaluated to compare their performance in detecting anomalies in audio signals. The algorithms tested in this study are as follows:

1. **Random Forest (RF):** Proposed by Breiman, the Random Forest (RF) classifier is a widely used ensemble classification technique in machine learning. It consists of multiple decision tree classifiers and employs a parallel ensemble approach. This involves training several decision trees on different subsets of the data and combining their predictions using majority voting or averaging. This structure enhances the model's predictive accuracy and generalization capabilities while minimizing overfitting issues.
2. **Extreme Gradient Boosting (XGBoost):** XGBoost, developed by Chen and Guestrin, is an optimized and high-performance version of the gradient boosting algorithm, designed for both classification and regression tasks. It is particularly well-suited for large datasets and complex problems due to its speed and flexibility. The algorithm builds decision trees sequentially, where each tree focuses on correcting the errors of the previous ones, thereby improving overall model accuracy. XGBoost incorporates regularization techniques to prevent overfitting, making it more generalizable compared to traditional gradient boosting methods (Chen & Guestrin, 2016).

3. **Explainable Boosting Machine (EBM):** EBM, introduced by Nori et al., is a variant of gradient boosting with a primary focus on interpretability. Unlike traditional black-box boosting models, EBM operates as a glass-box model, providing transparency and clarity in understanding the factors influencing model predictions. It builds models iteratively with low learning rates, ensuring that feature interactions are automatically detected and accurately represented (Kasaraneni, 2021). In this study, EBM utilized to detect anomalies in audio signals and explain the underlying reasons for the anomalies.
4. **Deep Neural Network (DNN):** DNNs are a class of algorithms modelled as multilayer perceptrons with three or more hidden layers. The learning algorithm in DNNs forms the foundation of deep learning, enabling the network to automatically identify increasingly abstract features across layers. Starting with low-level features, each subsequent layer processes inputs from previous layers at a higher abstraction level, allowing for sophisticated representations of data (Shrestha & Mahmood, 2019).

Evaluation Metrics

To comprehensively evaluate the models' performance, several classification metrics were used:

- **Accuracy:** The proportion of correct predictions made by the model.
- **Precision:** Indicates how many of the predicted anomalies are actually anomalies.
- **Recall:** Reflects how many of the actual anomalies were correctly identified by the model.
- **F1-Score:** Balances Precision and Recall to provide a single performance metric.
- **AUC:** Measures the model's ability to distinguish between abnormal (1) and normal (0) classes.
- **MCC:** Assesses overall accuracy and reliability, accounting for both true positives and true negatives.

Analysis of Audio Features Using Explainable AI Models

Explainable Artificial Intelligence (XAI) aims to enhance the interpretability of artificial intelligence systems and machine learning models, making their decision-making processes, predictions, and outcomes more comprehensible. Complex machine learning models, particularly deep learning and ensemble methods, are often referred to as "black boxes." This makes it challenging for users and experts to understand the internal workings and decision mechanisms of these models. XAI illuminates the "black box," offering a set of processes and methods that allow users to comprehend and trust the results generated by machine learning models (Kasaraneni, 2021).

In this study, we aim to analyse the contribution of audio signal features to model performance and determine whether certain features negatively affect performance. The importance of these features will be assessed using the following XAI methods:

1. **RF (Random Forest):** Uses decision trees to clarify the decision-making process and ranks features based on their importance.
2. **IG (Integrated Gradients):** IG is a technique used to increase the explainability of deep learning models. It measures the sensitivity of a model's output to a specific feature by calculating the contribution of each feature to the prediction. By comparing the input data to a baseline value (usually zero), it computes an integral that quantifies the effect of the input features on the model's prediction. This method quantifies the contribution of each feature to the predictions made by the DNN model for anomaly detection, by measuring the sensitivity of the model's output to changes in the feature values (Sundararajan et al., 2017).
3. **SHAP (SHapley Additive exPlanations):** SHAP is a method used to explain local predictions by measuring the contribution of each feature to the model's results. Inspired by cooperative game theory,

SHAP uses Shapley values to fairly distribute rewards among participants, and in machine learning, it calculates how each feature contributes to the model's predictions.

4. **LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations):** Explains predictions by fitting a simple linear model around data points, independent of the original model architecture (Lundberg & Lee, 2017).
5. **EBM (Explanatory Boosting Machines):** EBM is a tree-based, cyclic gradient-boosted model with automatic interaction detection. It provides high performance similar to black-box models while maintaining interpretability. EBM helps users understand the model's predictions by revealing the effects of individual features. It also identifies and visualizes complex feature interactions, providing more accurate and meaningful predictions. EBM's ability to automatically detect interactions between features makes it a powerful tool in anomaly detection (Kasaraneni, 2021).
6. **LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator):** LASSO is used for both feature selection and regression analysis. It enhances interpretability by reducing unnecessary features and simplifying the model, ultimately improving its performance. LASSO works by shrinking the coefficients of less important features to zero, leaving only the most relevant features in the model (Muthukrishnan & Rohini, 2017).

This analysis aims to identify the features most critical for anomaly detection, with machine-specific evaluations for pumps and fans. This approach is necessary because each machine type generates distinct acoustic profiles: fans produce motor-like hissing sounds, whereas pumps emit sounds resembling water flow. These differences influence the features that most effectively detect anomalies. Identifying key features for each machine type also provides valuable insights for acoustic condition monitoring and predictive maintenance applications.

Findings and Discussion

In this study, the performance of four supervised learning models (RF, XGBoost, EBM, DNN) is thoroughly evaluated using 10-fold cross-validation. This technique ensures robust and generalized performance metrics by partitioning the dataset into 10 subsets. The model is trained on nine of the subsets and tested on the remaining subset. This process is repeated 10 times, with each subset serving as the test set once, to account for any variability in the data and reduce the impact of overfitting. According to Table 3, these models performed well in most cases.

Table 3. Performance metrics for pump and fan anomaly detection

Machine	ID	Methods	Accuracy (%)	F1-Score (%)	Precision (%)	Recall (%)	AUC (%)	MCC (%)
Pump	00	RF	99.65	98.45	100.0	97.22	100.0	98.35
		XGBoost	99.65	98.58	100.0	97.20	99.97	98.40
		EBM	98.43	92.25	100.0	87.52	99.88	92.31
		DNN	98.37	93.01	98.17	88.64	98.81	92.34
	02	RF	97.67	87.47	94.25	85.28	99.53	87.55
		XGBoost	99.01	94.88	98.08	91.89	99.91	94.40
		EBM	98.21	90.68	93.97	90.91	99.97	90.75
		DNN	99.40	97.04	96.78	97.64	99.85	96.81
	04	RF	99.88	99.44	100.0	98.96	100.0	99.40
		XGBoost	99.88	99.50	99.01	100.0	100.0	99.43
		EBM	98.51	90.83	100.0	88.0	100.0	91.77
		DNN	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
06	RF	98.33	89.14	97.14	85.64	97.63	89.54	
	XGBoost	99.21	95.43	98.95	92.16	99.50	95.07	
	EBM	99.30	95.50	100.0	92.27	97.70	95.49	
	DNN	99.30	95.55	98.89	93.21	99.32	95.46	
Fan	00	RF	98.45	97.22	98.39	96.32	99.98	96.28
		XGBoost	99.44	99.02	99.02	99.02	99.97	98.62
		EBM	99.01	98.22	99.29	97.30	100.0	97.61
		DNN	98.59	97.50	98.12	97.03	99.92	96.59

	02	RF	99.86	99.72	99.73	99.72	100.0	99.63
		XGBoost	99.85	99.72	99.45	100.0	100.0	99.62
		EBM	99.93	99.86	99.73	100.0	100.0	99.82
		DNN	99.71	99.45	99.31	99.63	99.98	99.27
	04	RF	99.93	99.85	100.0	99.71	100.0	99.81
		XGBoost	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		EBM	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		DNN	99.81	99.62	99.63	99.62	99.67	99.49
	06	RF	98.84	98.25	97.10	100.0	100.0	97.73
		XGBoost	99.85	99.72	99.72	99.72	100.0	99.62
		EBM	99.35	98.86	98.18	99.73	100.0	98.50
		DNN	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

XGBoost emerged as the top performer, achieving high accuracy, precision, and recall, particularly excelling in complex cases like "Pump 04" and "Fan 04". RF also demonstrated strong performance, especially in "Pump 00" and "Fan 02", but was slightly less consistent in more challenging cases like "Pump 02" and "Fan 06."

DNN excelled in specific cases such as "Pump 04" and "Fan 06", achieving perfect scores, but showed variability in other scenarios, such as "Pump 00", where its precision and recall were lower than XGBoost, EBM and RF. This suggests that DNN requires more fine-tuning for consistent results.

EBM demonstrated good performance, particularly in "Fan 02" and "Fan 04", where it showed impressive accuracy and recall. While EBM may have lagged behind in scenarios like "Pump 02", it remains a solid choice, especially when model transparency and interpretability are prioritized.

Table 4 presents the best performance metrics obtained for different pump machines, including accuracy, F1-score, precision, recall, AUC, and MCC, as well as their averages. Overall, the models performed exceptionally well, with the highest scores achieved for Pump 04, where perfect results (100%) were obtained across all metrics.

Table 4. Best performance metrics for pump machines

Machine	ID	Accuracy (%)	F1-Score (%)	Precision (%)	Recall (%)	AUC (%)	MCC (%)
Pump	00	99.65	98.58	100.00	97.22	100.00	98.40
	02	99.40	97.04	98.08	97.64	99.97	96.81
	04	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	06	99.3	95.55	100.00	93.21	99.50	95.49
Average:		99.59	97.79	99.52	97.02	99.87	97.68

Table 5 presents the best performance metrics obtained for the fan machines. For each fan machine (00, 02, 04, 06), the accuracy, F1 score, precision, recall, AUC, and MCC values are provided. The average values reflect the overall performance across all fan machines. According to the table, the fan machines demonstrated high performance, particularly in scenarios such as "Fan 04" and "Fan 06", where near-perfect results were achieved. Overall, the average metrics for the fan machines indicate strong model performance across all evaluation criteria.

Table 5. Best performance metrics for fan machines

Machine	ID	Accuracy (%)	F1-Score (%)	Precision (%)	Recall (%)	AUC (%)	MCC (%)
Fan	00	99.44	99.02	99.29	99.02	100.00	98.62
	02	99.93	99.86	99.73	100.00	100.00	99.82
	04	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	06	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Average:		99.84	99.72	99.76	99.76	100.00	99.61

The results obtained in this study outperform several state-of-the-art methods for anomaly detection on the MIMII dataset. For pumps, the proposed approach achieves an average F1 score of 97.79% and an AUC of 99.87%, clearly surpassing the 95.9% F1 score reported by Ota & Unoki (2023) and the 90.0% AUC reported by Singh & Arvind (2023). Furthermore, the achieved AUC exceeds the 98.3% reported by Gantert et al. (2021), demonstrating superior detection capability across pump anomalies.

For fans, the proposed method achieves an average F1 score of 99.72% and 100.0% AUC, outperforming Ota & Unoki (2023) (98.5% F1 score) and matching the highest AUC reported by (Singh & Arvind, 2023). The AUC also slightly exceeds the 99.7% reported by Gantert et al. (2021).

These results indicate that the proposed approach produces better results than traditional machine learning techniques like MLP and SVMs and even some deep learning-based approaches such as M-Net and SoundNet transfer learning.

Key Features for Anomaly Detection in Pump Sounds

Anomaly detection in pump sounds highlights the critical role of specific acoustic features, as evidenced by Table 6. Among these, `spectralBandwidthMax` and `spectralRolloffMax` consistently emerged as the most influential features, being identified as significant across all six XAI methods (RF, IG, SHAP, LIME, EBM, and LASSO). These features are particularly relevant due to the narrow-band and rhythmic nature of pump sounds, which emphasize the importance of metrics measuring frequency spectrum width and boundaries.

Table 6. Feature importance rankings for pump anomaly detection across XAI methods

Important Features	RF	IG	SHAP	LIME	EBM	LASSO	Total
<code>spectralBandwidthMax</code>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6
<code>spectralRolloffMax</code>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6
<code>spectralBandwidthMin</code>	✓	✓	✓		✓	✓	5
<code>chromaPitch0Max</code>	✓	✓	✓	✓	✓		5
<code>rmsTotal</code>	✓	✓	✓	✓	✓		5
<code>autocorrCoeffSB2</code>	✓	✓	✓	✓	✓		5
<code>magnitudesSum</code>	✓	✓	✓	✓		✓	5
<code>magnitudesStd</code>	✓	✓	✓		✓		4
<code>powerSpectralDensityMean</code>	✓		✓	✓	✓		4
<code>spectralBandwidthMean</code>	✓	✓		✓		✓	4
<code>amplitudeEnvelopeMedian</code>	✓	✓		✓	✓		4
<code>instantaneousAmplitudeStd</code>	✓	✓		✓	✓		4
<code>rmsStd</code>	✓	✓	✓	✓			4
<code>spectralRolloffMin</code>		✓	✓	✓		✓	4
<code>chromaPitch1Max</code>	✓	✓	✓	✓			4
<code>chromaPitch11</code>	✓	✓	✓		✓		4
<code>chromaPitch6</code>		✓	✓	✓	✓		4
<code>chromaPitch5</code>		✓	✓	✓	✓		4
<code>chromaPitch9Max</code>		✓	✓	✓			3
<code>chromaPitch10</code>		✓		✓	✓		3
<code>instantaneousAmplitudeMean</code>	✓	✓			✓		3
<code>cqtSum</code>	✓			✓		✓	3
<code>spectralRolloffMAD</code>	✓			✓		✓	3
<code>amplitudeEnvelopeSum</code>	✓	✓			✓		3
<code>bandEnergyRatioStd</code>	✓		✓		✓		3
<code>chromaSum</code>		✓	✓			✓	3
<code>spectralSpread</code>		✓		✓		✓	3

spectralRollofStd	✓		✓	2
spectralCentroidsStd	✓		✓	2
powerSpectralDensityStd	✓		✓	2
instantaneousFrequencyStd			✓	2
amplitudeEnvelopeMin	✓	✓		2
spectralCentroidsMAD			✓	2
spectralCentroidsMax			✓	2
spectralRollofSkew			✓	2
signalSkew			✓	2
bandEnergyRatioMean	✓		✓	2

These features collectively provide a robust framework for distinguishing normal and anomalous acoustic patterns, supporting the high performance of the proposed approach in detecting pump anomalies.

Key Features for Anomaly Detection in Fan Sounds

Fan faults often arise due to aerodynamic irregularities, resulting in a more complex frequency structure compared to other machinery. Consequently, features that measure the energy distribution across different frequency bands become particularly critical for anomaly detection.

Among these, spectralContrastMean, which captures energy differences between frequency groups, stands out as a significant feature. Additionally, energy distribution changes are effectively represented by features such as cqtSum, derived from the constant-Q transform. These features highlight the sensitivity of the proposed method to variations in fan acoustics, even under difficult conditions.

Table 7. Feature importance rankings for fan anomaly detection across XAI methods

Important Features	RF	IG	SHAP	LIME	EBM	LASSO	Total
spectralContrastMean	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6
cqtSum	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6
rmsTotal	✓	✓	✓	✓	✓		5
amplitudeEnvelopeMedian	✓	✓	✓	✓	✓		5
instantaneousAmplitudeStd	✓	✓	✓	✓	✓		5
chromaPitch6	✓	✓	✓	✓	✓		5
chromaPitch2	✓	✓	✓	✓	✓		5
powerSpectralDensityMin	✓	✓	✓	✓			4
powerSpectralDensityMean	✓	✓		✓	✓		4
powerSpectralDensityStd	✓	✓		✓	✓		4
instantaneousAmplitudeMean	✓	✓		✓	✓		4
bandEnergyRatioMean		✓	✓	✓		✓	4
magnitudesSum	✓				✓	✓	3
magnitudesStd	✓	✓			✓		3
chromaPitch11			✓	✓	✓		3
chromaPitch9Max		✓		✓	✓		3
chromaPitch8	✓	✓	✓				3
chromaPitch1	✓			✓	✓		3
cqtStd		✓	✓	✓			3
amplitudeEnvelopeMin		✓	✓		✓		3
amplitudeEnvelopeSum	✓	✓			✓		3
powerSpectralDensityMax	✓	✓		✓			3
chromaStd	✓	✓	✓				3
chromaSum	✓			✓		✓	3

cqtMax	✓	✓	✓	3
autocorrCoeffAE2	✓	✓		2
spectralCentroidsStd	✓		✓	2
spectralCentroidsMAD			✓	2
spectralCentroidsMin		✓	✓	2
bandEnergyRatioStd		✓	✓	2
spectralFlatness	✓		✓	2
chromaPitch10Max	✓		✓	2
signalKurtosis		✓	✓	2
chromaPitch7	✓	✓		2

Conclusion

The ability to monitor machine health in real-time through acoustic signals is vital for providing early warnings before potential failures. This study proposed a lightweight machine learning-based approach for anomaly detection in industrial machinery using acoustic signals and presents a benchmark for anomaly detection in pumps and fans. XAI-based approach for feature selection provides effective features for real-time acoustic condition monitoring. The method achieved better accuracy and reliability, with accuracy rates of 99.84% for fans and 99.59% for pumps compared to the baseline models. Determining important features for anomaly detection across different machines provides valuable insights for real-time acoustic monitoring and predictive maintenance systems. The proposed approach enhances model transparency and supports actionable maintenance decisions by focusing on explainable and efficient audio features, making it suitable for practical industrial applications.

Future research could integrate this approach with unsupervised learning to effectively handle unlabeled data and limited anomalous samples. This integration may lead to the development of improved early warning systems and therefore enhance operational reliability and reduce unplanned downtime in industrial environments.

References

- Agrawal, N. (n.d.). *Decoding the Symphony of Sound: Audio Signal Processing for Musical Engineering*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/decoding-the-symphony-of-sound-audio-signal-processing-for-musical-engineering-c66f09a4d0f5>
- Çağlar, B. S., Ketmen, H., & Bulut, B. (2021). *Anomaly Detection using Audio Signals*.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13-17-August-2016*, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785/SUPPL_FILE/KDD2016_CHEN_BOOSTING_SYSTEM_01-ACM.MP4
- Chinnasamy, M. D., Sumbwanyambe, M., & Hlalele, T. S. (2024). Acoustic Anomaly Detection of Machinery using Autoencoder based Deep Learning. *Proceedings of the 32nd Southern African Universities Power Engineering Conference, SAUPEC 2024*. <https://doi.org/10.1109/SAUPEC60914.2024.10445053>
- Dubnov, S. (2004). Generalization of spectral flatness measure for non-Gaussian linear processes. *IEEE Signal Processing Letters, 11*(8), 698–701. <https://doi.org/10.1109/LSP.2004.831663>
- Gantert, L., Sammarco, M., Detyniecki, M., & Campista, M. E. M. (2021). A Supervised Approach for Corrective Maintenance Using Spectral Features from Industrial Sounds. *7th IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2021*, 723–728. <https://doi.org/10.1109/WF-IOT51360.2021.9594966>
- Gantert, L., Zeffiro, T., Sammarco, M., & Campista, M. E. M. (2024). Multiclass classification of faulty industrial machinery using sound samples. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 136*, 108943. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2024.108943>
- Giannakopoulos, T., & Pikrakis, A. (2014). Audio Features. *Introduction to Audio Analysis*, 59–103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099388-1.00004-2>

- Henriquez, P., Alonso, J. B., Ferrer, M. A., & Travieso, C. M. (2014). Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 44(5), 642–652. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2013.2257752>
- Jiang, D. N., Lu, L., Zhang, H. J., Tao, J. H., & Cai, L. H. (2002). Music type classification by spectral contrast feature. *Proceedings - 2002 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME 2002, 1*, 113–116. <https://doi.org/10.1109/ICME.2002.1035731>
- Kasaraneni, C. K. (2021, May 14). *Understanding XAI and EBM*. Medium.Com. <https://medium.com/predmatic/understanding-xai-and-ebm-112bcc7babc3>
- Koizumi, Y., Saito, S., Uematsu, H., Harada, N., & Imoto, K. (2019). *ToyADMOS: A Dataset of Miniature-Machine Operating Sounds for Anomalous Sound Detection*.
- Kumar, R. (2024). *Audio Features — The GenAI Guidebook*. https://ravinkumar.com/GenAiGuidebook/audio/audio_feature_extraction.html
- Liu, H. J., Huang, S., Xie, H., Qiu, S., Zheng, Z. W., Wang, M., Wu, L. L., Liu, K. W., Wu, G. X., & Li, M. (2020). Mechanical Fault Diagnosis Based on Acoustic Features in Transformers. *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2020-October*, 563–566. <https://doi.org/10.1109/CEIDP49254.2020.9437518>
- Liu, S., Li, J., Ke, W., & Yin, H. (2024). *Multi-Attention Enhanced Discriminator for GAN-Based Anomalous Sound Detection*. 6715–6719. <https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10447924>
- Liu, Z., Tang, H., Michiels, S., Joosen, W., & Hughes, D. (2022). Unsupervised Acoustic Anomaly Detection Systems Based on Gaussian Mixture Density Neural Network. *European Signal Processing Conference, 2022-August*, 259–263. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909741>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems, 2017-December*, 4766–4775.
- McFee, B., McVicar, M., Faronbi, D., Roman, I., Gover, M., Balke, S., Seyfarth, S., Malek, A., Raffel, C., Lostanlen, V., van Niekirk, B., Lee, D., Cwitkowitz, F., Zalkow, F., Nieto, O., Ellis, D., Mason, J., Lee, K., Steers, B., ... Pimenta, W. (2023). *librosa/librosa: 0.10.1*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8252662>
- Medoued, A., Lebaroud, A., & Sayad, D. (2013). Application of Hilbert transform to fault detection in electric machines. *Advances in Difference Equations, 2013(1)*, 1–7. <https://doi.org/10.1186/1687-1847-2013-2/FIGURES/4>
- Muthukrishnan, R., & Rohini, R. (2017). LASSO: A feature selection technique in predictive modeling for machine learning. *2016 IEEE International Conference on Advances in Computer Applications, ICACA 2016*, 18–20. <https://doi.org/10.1109/ICACA.2016.7887916>
- Ota, Y., & Unoki, M. (2023). Anomalous Sound Detection for Industrial Machines Using Acoustical Features Related to Timbral Metrics. *IEEE Access, 11*, 70884–70897. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294334>
- Purohit, H., Tanabe, R., Ichige, K., Endo, T., Nikaido, Y., Suefusa, K., & Kawaguchi, Y. (2019). *MIMII Dataset: Sound Dataset for Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection*.
- Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN Computer Science, 2(3)*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/S42979-021-00592-X/FIGURES/11>
- Schörkhuber, C. (n.d.). *Constant-Q Transform Toolbox for Music Processing*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.849741>
- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. *9th Python in Science Conference*.
- Sharma, G., Umapathy, K., & Krishnan, S. (2020). Trends in audio signal feature extraction methods. *Applied Acoustics, 158*, 107020. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2019.107020>
- Shrestha, A., & Mahmood, A. (2019). Review of deep learning algorithms and architectures. *IEEE Access, 7*, 53040–53065. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912200>

- Si, L., Wang, Z., Access, G. J.-I., & 2019, undefined. (n.d.). Fusion recognition of shearer coal-rock cutting state based on improved RBF neural network and DS evidence theory. *Ieeexplore.Ieee.Org* L Si, ZB Wang, G Jiang *IEEE Access*, 2019•*ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved November 9, 2024, from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8815761/>
- Singh, A., & Arvind, R. (2023). *A Lightweight Machine Learning Framework For Acoustic Health Monitoring of Industrial Machines*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4507707>
- Singhal, S., Goel, B., Agrawal, K., Sethi, R., Sah, S., Jain, R., & Vishwakarma, D. K. (2024). Audio Based Machine Fault Diagnosis using Hybrid Feature Extraction and Ensemble Learning. *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10724147>
- Sundararajan, M., Taly, A., ... Q. Y. on machine, & 2017, undefined. (2017). Axiomatic attribution for deep networks. *Proceedings.Mlr.Press* M Sundararajan, A Taly, Q Yan *International Conference on Machine Learning, 2017*•*proceedings.Mlr.Press*. <http://proceedings.mlr.press/v70/sundararajan17a.html>
- Tang, L., Tian, H., Huang, H., Shi, S., & Ji, Q. (2023). A survey of mechanical fault diagnosis based on audio signal analysis. *Measurement*, 220, 113294. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113294>
- Ugarte, J. P., & Arias-Arias, J. (2024). Unveiling relevant acoustic features for bird species automatic classification. *Expert Systems with Applications*, 257, 125046. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2024.125046>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., ... SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wang, L., Sun, G., Wang, Y., Ma, J., Zhao, X., & Liang, R. (2022). AFExplorer: Visual analysis and interactive selection of audio features. *Visual Informatics*, 6(1), 47–55. <https://doi.org/10.1016/J.VISINF.2022.02.003>
- Zabin, M., Binte Kabir, A. N., Kabir, M. K., Choi, H. J., & Uddin, J. (2024). Machine Fault Diagnosis Using EMD-Gammatone Texture Representation and A Lightweight Self-Attention SqueezeNet. *Proceedings - 2024 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing, BigComp 2024*, 32–39. <https://doi.org/10.1109/BIGCOMP60711.2024.00015>
- Zabin, M., Choi, H. J., & Uddin, J. (2023). Hybrid deep transfer learning architecture for industrial fault diagnosis using Hilbert transform and DCNN–LSTM. *Journal of Supercomputing*, 79(5), 5181–5200. <https://doi.org/10.1007/S11227-022-04830-8/TABLES/6>
- Zhang, H., Zhang, S., He, Q., & Kong, F. (2016). The Doppler Effect based acoustic source separation for a wayside train bearing monitoring system. *Journal of Sound and Vibration*, 361, 307–329. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2015.09.038>

**AKUSTİK TAHRİKLİ LABORATUVAR ÖLÇEKLİ TERMOAKUSTİK SOĞUTUCU TASARIMI VE SİMÜLASYONU****Netice DUMAN**

Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas TBMYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Sivas, Türkiye,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9926-8511>

Halil İbrahim ACAR

Prof. Dr. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-6138>

Özet

Mevcut soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanların çevreye olan olumsuz etkileri alternatif soğutma teknolojilere yönelik kapsamlı araştırmaların yapılmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, termoakustik soğutma, dikkat çeken bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde çevre dostu akışkanlar kullandıkları ve az sayıda hareketli bileşene sahip olmaları nedeniyle alternatif soğutma teknolojileri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Termoakustik soğutma, ses dalgaları içindeki basınç salınımlarıyla birlikte meydana gelen sıcaklık salınımlarının, akışkan ve akışkana temas eden katı yüzeyler arasındaki ısı etkileşimlerle gerçekleştiği bir süreçtir. Termoakustik soğutucular (TAS), rezonans tüpü içinde yer alan bir yığın aracılığıyla, düşük sıcaklıktaki bir ısı kaynağından yüksek sıcaklıktaki bir ısı kaynağına ısıyı taşımak için akustik güç kullanır. TAS sistemi, iş gören akışkanla dolu rezonans tüpü, termodinamik olayların gerçekleştiği ve sistemin kalbi olan yığın, yığının her iki ucunda bulunan ısı değiştiricileri ve akustik güç kaynağından oluşur. Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli küçük bir termoakustik soğutucunun tasarım ve simülasyonu sunulmuştur. Tasarım stratejisinde, yığının optimum uzunluğunu ve yerini belirlemek için basitleştirilmiş termoakustik lineer model kullanılmıştır. Tasarımda basınç 1 atm, sürücü oranı %3 alınmış ve ısı değiştiriciler arasındaki sıcaklık farkı 20K olarak hedeflenmiştir. TAS optimizasyonu MATLAB programı ile yapılmış ve elde edilen duran dalgalı termoakustik soğutma modeli, Design Environment for Low Amplitude Thermo Acoustic Energy Conversion (Delta EC) programı ile simüle edilmiştir. MATLAB ile yapılan optimizasyon sonucunda, COP değeri 1,552 ve soğutma gücü 0,423 W olarak bulunmasına karşın Delta EC simülasyonu ile aynı değerler 0,61 ve 0,364 W olarak elde edilmiştir. Teorik sonuçlar Delta EC sonuçlarına göre daha iyi çıkmıştır. Çünkü teorik tasarımda hoparlör parametreleri ve soğuk ısı değiştiriciden sonraki rezonans tüpünün konik kısmında sönümlenme etkisi ihmal edilmiştir. Çalışmada kullanılan simülasyon ve optimizasyon metodolojisi, gelecekte daha verimli, düşük maliyetli ve çevre dostu termoakustik soğutucuların geliştirilmesine rehberlik edecektir.

Anahtar Kelimeler: Termoakustik, termoakustik soğutucu, Delta EC, soğutma performans katsayısı

DESIGN AND SIMULATION OF ACOUSTICALLY DRIVEN LABORATORY SCALE THERMOACUSTIC REFRIGERATOR**Abstract**

The negative effects of refrigerants used in current cooling systems on the environment have led to extensive research on alternative cooling technologies. In this context, thermoacoustic refrigerator stands out as a remarkable solution. Today, it has an important place among alternative cooling technologies due to the use of environmentally friendly fluids and the small number of moving components. Thermoacoustic cooling is a process in which temperature oscillations occurring together with pressure oscillations in sound waves occur through thermal interactions between the fluid and the solid surfaces in contact with the fluid. Thermoacoustic refrigerator (TAR) use acoustic power to transfer heat from a low-temperature heat source to a high-temperature heat source via a stack located in a resonant tube. The TAR system consists of a resonator filled with the working fluid, the stack where thermodynamic events occur and which is the heart of the system, heat

exchangers located at both ends of the stack, and an acoustic power supply. In this study, the design and simulation of a small laboratory-scale thermoacoustic refrigerator is presented. In the design strategy, a simplified thermoacoustic linear model is used to determine the optimum length and location of the stack. In the design, the pressure is 1 atm, the driver ratio is taken as 3% and the temperature difference between the heat exchangers is targeted as 20K. TAR optimization is done with MATLAB program and the obtained standing wave thermoacoustic refrigerator model is simulated with Design Environment for Low Amplitude Thermo Acoustic Energy Conversion (Delta EC) program. As a result of the optimization done with MATLAB, COP value is found as 1.552 and cooling power is found as 0.423 W with Delta EC simulation, the same values are obtained as 0.61 and 0.364W. Theoretical results are better than Delta EC results. Because in theoretical design, speaker parameters and damping effect in the conical part of the resonator after the cold heat exchanger are neglected. The simulation and optimization methodology used in the study will guide the development of more efficient, low-cost and environmentally friendly thermoacoustic coolers in the future.

Keywords: Thermoacoustics, Thermoacoustic refrigerator, DeltaEC, cooling coefficient of performance.

Giriş

Küresel çevre sorunlarının giderek artması, sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanmasını her geçen gün daha önemli bir hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin yanı sıra, çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi, bu hedeflere ulaşılmasında önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Termoakustik teknoloji, ısı ve ses arasındaki etkileşimleri inceleyen bir disiplin olarak, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Termoakustik cihazlar, sıcaklık gradyanları ve akustik dalgalar kullanarak enerji dönüşüm süreçlerini optimize edebilmekte, böylece geleneksel enerji üretim sistemlerine kıyasla daha az çevresel etki yaratmaktadır. Termoakustik sistemlerin hareketli parçalara ihtiyaç duymaması ve basit tasarımları, bakım ve işletme maliyetlerini düşürürken, çevresel etkileri de minimize etmektedir. Bu nedenle, termoakustik teknolojiler, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevre dostu uygulamalar için güçlü bir alternatif çözüm sunmaktadır.

Termoakustik üzerine çalışmalar, Byron Higgins'in 1777'de ısı kaynaklı akustik salınımların ilk gözleminden bu yana iki yüz yıldan fazla bir süredir devam etmektedir. Termoakustik terimi, ilk kez 1850 yılında Sondhauss tarafından kullanılarak, bilimsel literatüre girmiştir. Ardından, Rayleigh (1878 ve 1945) bu fenomeni "termoakustik etki" olarak tanımlamıştır. Rott (1980) tarafından tanımlanan lineer termoakustik teori, daha sonra Swift(1992) tarafından geliştirilmiş ve düşük basınç genlikleri altında termoakustik cihazların akustik özellikleri ile süreçlerini incelemek için yaygın olarak kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu çalışmalar, termoakustik teknolojisinin bilimsel temellerinin şekillenmesinde önemli bir rol oynamış ve alandaki ileri düzey araştırmalar için temel bir referans noktası oluşturmuştur. Hofler (1986) tarafından 6 W soğutma gücüne sahip ilk başarılı termoakustik soğutma sistemi (TAS) piyasaya sürülmüştür. Wetzel ve Herman (1997), entalpi akışı ve iş akışının normalize edilmiş denklemlerini kullanarak basitleştirilmiş lineer termoakustik modele dayanan bir termoakustik soğutucu tasarım algoritması geliştirmiştir. Bu algoritma, ısı değiştiriciler arasındaki belirli bir sıcaklık farkında yığının maksimum performansını elde etmek için optimum yığın konumu ve uzunluğunu seçmeye olanak tanımaktadır. Benzer bir yaklaşım da Tijani ve diğerleri (2002) tarafından önerilmiştir.

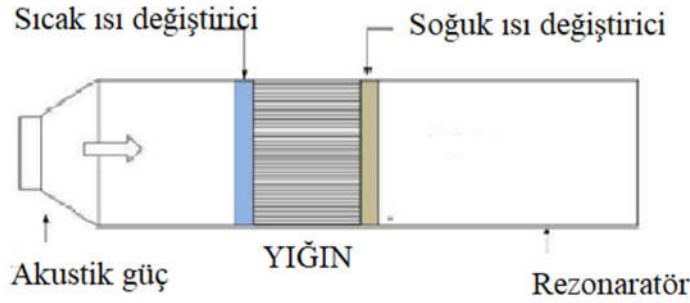
Ward ve Swift (1993), ortak geometrilere sahip termoakustik soğutucular ve motorlar tasarlamak ve simüle etmek amacıyla Düşük Genlikli Termoakustik Enerji Dönüşümü için Tasarım (DeltaEC) adlı bir yazılım geliştirmişlerdir. DeltaEC, termoakustik soğutucu tasarımını ve geometrisini oluşturan bir programdır. Böylece termoakustik sistem performansları tahmin edilebilir. Sarode vd. (2014) tarafından yapılan He, Ar, N₂ ve He-Ar karışımı gibi gazların kullanıldığı çok sayıda simülasyon, ana hareket ettiricinin basınç genliği, başlangıç sıcaklığı ve rezonans frekansı açısından performansını araştırmak için DeltaEC' de gerçekleştirilmiştir. Yazılım programını kullanarak Rahim vd. (2015) termoakustik ısı motoru simülasyonunun DeltaEC yazılımı ile performansı belirlemişlerdir. DeltaEC kullanarak termoakustik sistemin parametrik etüdünü Johari vd. (2018) yapmışlardır. Irfan vd. (2019) yaptıkları çalışma ile duran dalga için termoakustik ısı motoru tasarımında optimum değeri elde etmek için Delta EC yazılımının mümkün olduğunu kanıtlamışlardır. Jana vd. (2021) önemli yönetim parametrelerindeki değişikliklerin küçük kapasiteli bir termoakustik soğutucunun performansına etkisini incelemek için DeltaEC kullanarak sayısal bir çalışma yapmışlardır. Kajurek vd. (2019), 10 W soğutma gücüne ve ısı değiştiricileri arasındaki sıcaklık farkı 30 °C olan küçük bir soğutucu tasarlamış ve tasarımlarını simüle etmek için DeltaEC yazılımını kullanmışlardır.

Prashantha vd. (2020), iş gören akışkan olarak helyum ve havayı kullanarak termoakustik soğutucu tasarımını geliştirmeye yönelik bir strateji belirlemiştir. Çalışmanın sonucunda helyumun havadan daha iyi bir soğutma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir ve teorik sonuçları, Delta EC simülasyonu ile karşılaştırarak doğrulamıştır. Duman vd. (2023a), 3 W lık laboratuvar ölçekli çeyrek dalga boyulu tek kademeli ve kapalı uçta küre şeklinde hacim bulunan bir TAS tasarımı yaparak bu modeli Delta EC programı ile simüle etmişlerdir. Sarpero ve diğerleri (2023), bir DeltaEC modelini, üç farklı yığın geometrisini (dairese, petek ve kare) test eden bir TAS'ın deneysel verileriyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, modelin çoğu durumda yığın boyunca sıcaklık farkını maksimum ± 2 K hatayla tahmin edebildiğini göstermiştir.

Bu çalışmada, tasarımda basınç 1 atm, sürücü oranı %3 alınmış ve ısı değiştiriciler arasındaki sıcaklık farkı 20K olarak hedeflenmiştir. TAS optimizasyonu MATLAB programı ile yapılmış ve elde edilen duran dalgalı termoakustik soğutma modeli, Delta EC programı ile simüle edilmiştir.

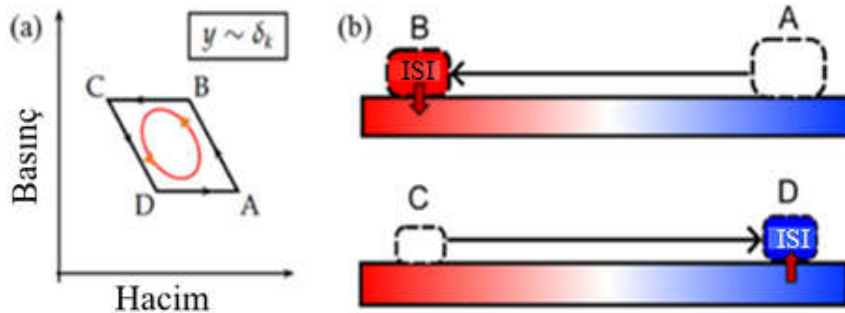
Termoakustik Soğutucu Sistemi

Termoakustik soğutucular Şek. 1'de görüldüğü gibi iş gören akışkanla doldurulmuş bir rezonantöre bağlı bir hoparlörden, genellikle ince paralel plakalardan yapılmış bir yığın ve yığının her iki tarafına yerleştirilmiş iki ısı değiştiriciden oluşur. Yığın, ısı pompalama işleminin gerçekleştiği soğutucunun kalbini oluşturur ve bu nedenle soğutucunun performansını belirlemek için kritik bir unsurdur (Nouf vd.,2014). İş gören akışkan olarak hava, helyum argon, karbondioksit ve bunların karışımı gazlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada hava kullanılmıştır.



Şekil 1. Duran dalga termoakustik soğutucunun yapısını gösteren temel diyagram (Nouf vd.2014)

Hoparlör gibi bir ses kaynağı kullanılarak, gazı rezonansa sokmak için bir akustik dalga üretilir. İş gören akışkan rezonantör içinde ileri geri salınırken, duran ses dalgası yığının uzunluğu boyunca bir sıcaklık farkı yaratır. Bu sıcaklık değişimi, ses basıncı ve salınım yapan iş gören akışkan ile plaka yüzeyi arasındaki termal etkileşim ile gazın sıkıştırılması ve genişlemesinin bir sonucudur. Şekil 2 'de (a) duran dalga TAS için termodinamik çevrim ve (b)'de ise yığının içindeki bir gaz parselinin sıkışması ve genişlemesi gösterilmiştir. Duran dalga modeli termoakustik sistemde termodinamik çevrimi Brayton çevrimi ile benzerlik göstermektedir. A-B adyabatik sıkıştırma, B-C izobarik ısıtma C-D adyabatik genişleme ve D-A izobarik soğutma şeklinde çevrim gerçekleşmektedir.



Şekil 2. (a) Duran dalga TAS için termodinamik çevrim ve (b) Yığının içindeki bir gaz parselinin sıkışması ve genişlemesi (Ali vd. 2024)

Termoakustik Soğutucu Tasarımı

Bu çalışmada, şekil 3'te görülen çeyrek dalga boyuna sahip termoakustik soğutucu optimizasyonu MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır. Boyutsuz yığın merkezi konumu (X_n), boyutsuz yığın uzunluğu (L_{sn}) ve yığın kesit alanı (A) gibi parametrelerin değerlerinin belirlenmesi için yığın optimizasyonu, Tablo 1 'de verilen tasarım parametreleri değerleri kullanılmıştır. $X_n=0.3$ ve $L_{sn}=0.2$ değerlerine karşılık gelen COP değeri 1,552 ve soğutma gücü 0,423 hesaplamalar sonucu bulunmuştur. Bu değerlere karşılık gelen TAS ölçüleri Duman vd., (2023b) tarafından yapılan çalışmada sunulan denklemlerin MATLAB programı ile çözülmesi ile bulunmuştur.

Tablo 1. Tasarım Parametreleri değerleri

Tasarım Parametreleri	İş akışkanı Parametreleri (Hava)	Yığın malzemesi Parametreleri (Mylar)
$P_m=1$ atm $T_m=298$ K $\Delta T=20$ K $f=200$ Hz $D=0,03$	$\rho_m=1,1770$ kg/m ³ $c_p=1004,7$ J/kgK $\sigma=0,70795$ $k=0,025927$ W/mK $a=344,89$ m/s	$k=0,16032$ W/mK $\rho_y=1348,2$ kg/m ³ $c=1095,1$ J/kgK $2l=0,6$ mm $2y_0=1,2$ mm

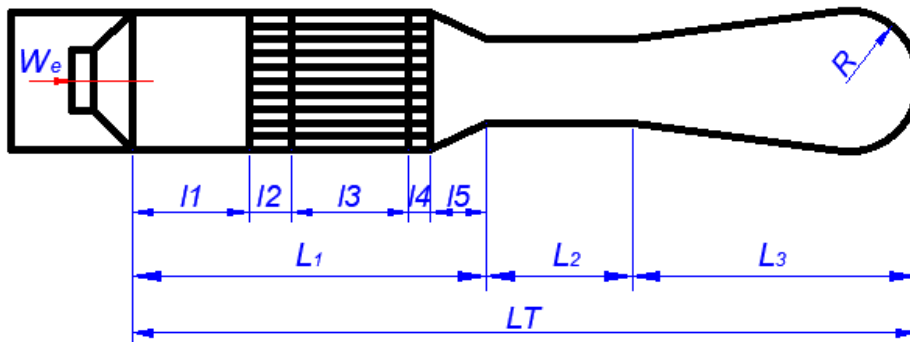
Tablo 2 'de tasarımı yapılan TAS'ın ölçüleri verilmiştir.

Tablo 2: Tasarımı yapılan TAS'ın ölçüleri

$l_1=52$ mm, $l_2=6$ mm, $l_3=52$ mm, $l_4=12$ mm, $l_5=20$ mm, $L_2=212$ mm, $L_3=74$ mm, $R=31$ mm $L_T=428$ mm

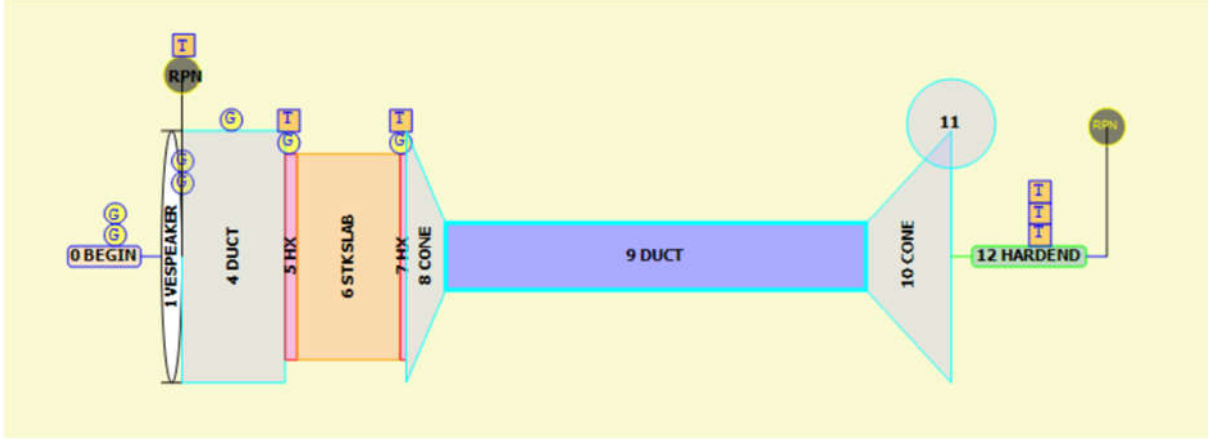
Delta EC Modelleme

Şekil 3'de tasarımı gösterilen cihazın simülasyonu için, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen DeltaEC bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu program, kullanıcının belirlediği hedeflere ulaşacak şekilde soğutucu tasarımını optimize etmeye olanak tanır. DeltaEC, termoakustik cihazlar için her segment içindeki termal ve viskoz kayıpları hesaba katarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ile birlikte, düşük genlikli akustik yaklaşımıyla tek boyutlu dalga denklemini çözer. Ancak, sınır katman türbülansı, akustik akış ve dalga dikliği gibi doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmaz. Denklemlerin sayısal integrasyonu, zamana bağlı olmadan aksel (x) yönünde gerçekleştirilir. Kullanıcı, boru, koni, yığın, ısı değiştiriciler gibi cihaz bileşenlerinin geometrisini tanımladıktan sonra, program bu bileşenlerde nümerik çözüm yapar (Swift 1988; Johnson 2000). Program, çözüm sürecinde tahmin-hedef yöntemini kullanarak optimal sonuçları elde etmeyi sağlar.



Şekil3. Simülasyonu yapılan TAS tasarımı

Simülasyonda kullanılan TAS sisteminin şematik görünümü şekil 4’ te görülmektedir. Simülasyon 0 başlangıç segmenti ile başlar. Bu adımda işletme parametre değerlerinin girildiği görülmektedir. 1 nolu segmentte hoparlöre ait değerler girilmektedir. Tablo 3’de TAS simülasyonu segmentleri sunulmuştur.



Şekil 4. Simülasyonda kullanılan TAS sisteminin şematik görünümü

Simülasyonda, başlangıç sıcaklığı, debi, hoparlör voltajı ile faz açısı, sıcak ısı değiştiricisinden çevreye atılan ısı ve soğutma gücü tahmin parametreleri; normalleştirilmiş özgül empedansın tersinin gerçek ve sanal kısımları ile toplam güç, basınç ve hacim faz açılarının farkı, sıcak ve soğuk ısı değiştiricileri katı yüzey hedef parametreleri olarak seçilmiştir.

Tablo 3: Simülasyonda kullanılan segmentler

Segment No	Adı
0	Başlangıç
1	Hoparlör
2	Büyük Çaplı Boru
3	Sıcak Isı Değiştirici
4	Paralele Plakalı Yığın
5	Soğuk Isı Değiştirici
6	Konik Daraltma
7	Küçük Çaplı Boru
8	Konik Genişleme
10	Yarım Küre Hazne
11	Son

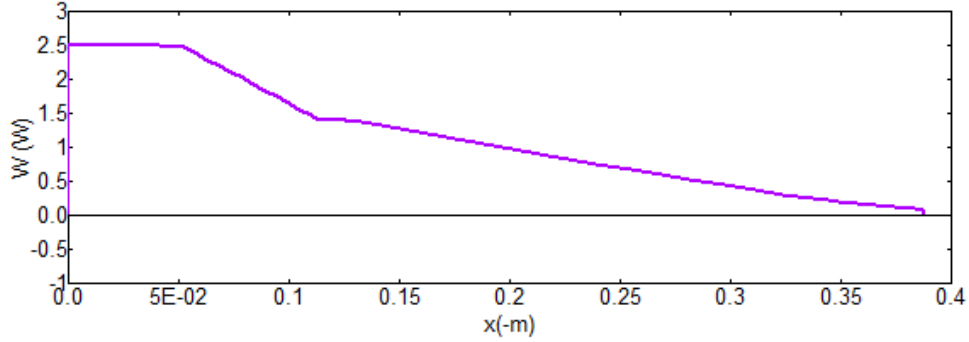
Simülasyon Sonuçları

Tasarım sonuçları ile simülasyondan elde edilen sonuçlar tablo 4’de verilmiştir. Aradaki küçük farkların normalizasyon işlemindeki yapılan kabullerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4. Tasarım ve DeltaEC Simülasyon sonuçları

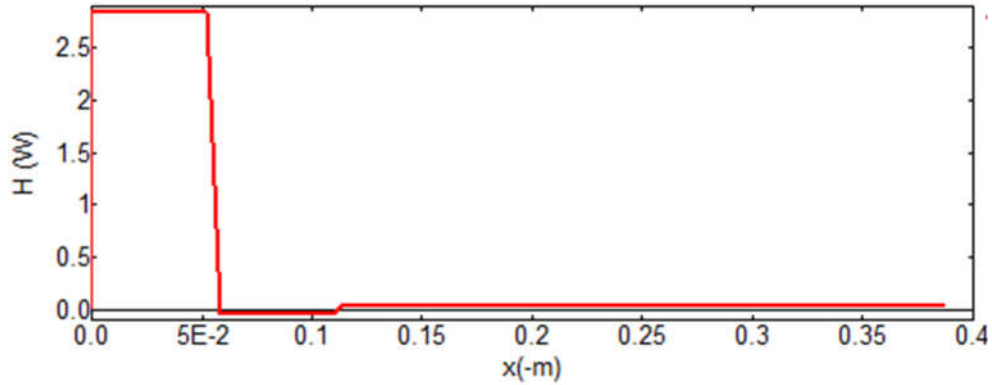
Tasarım sonuçları	Simülasyon sonuçları
$f=200$ Hz	$f=200$ Hz
$T_m=298$ K	$T_m =299,23$ K
$\Delta T_m=20$ K	$\Delta T_m=20$ K
$Q =0,423$ W	$Q =0,364$ W
COP=1,552	COP=0,61

Şekil 5’de akustik gücün x eksenine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi akustik güç (W) pozitif x-ekseni boyunca sürekli olarak azalmaktadır. Akustik güçteki en büyük değişim ise yığının iki ucu arasında ortaya çıkmakta ve cihazın açık ucunda sıfır değerini almaktadır. Yığında yutulan akustik güç soğutulan ortamdan ısı çekmek için kullanılmaktadır.



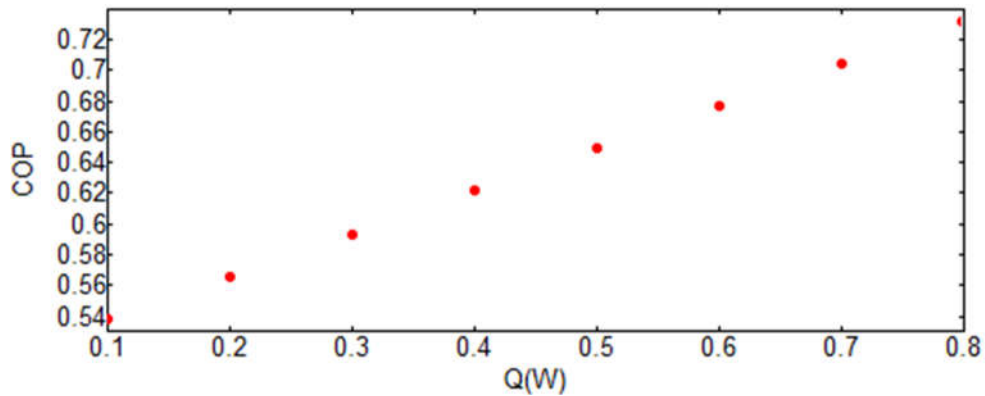
Şekil 5. Akustik gücün rezonaratörünün uzunluğu boyunca değişimi

Şekil 6’ da toplam gücün (H) rezonaratör boyunca değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi toplam güç sadece ısı değiştirici konumlarında değişim göstermekte diğer konumlarda ise herhangi bir değişim olmamakta, açık uçta sıfır değerini almaktadır.



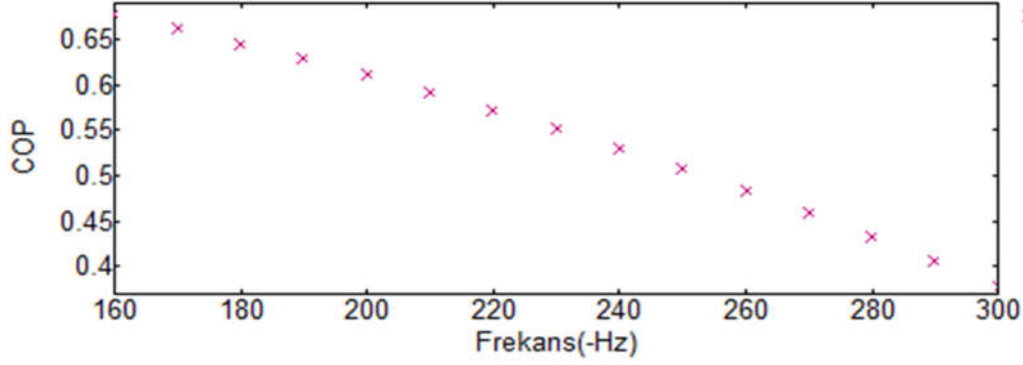
Şekil 6. Toplam gücün rezonaratörünün uzunluğu boyunca değişimi

Şekil 7’de soğutma gücü ve COP değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi soğutma yükü arttıkça COP ‘de artmaktadır.



Şekil 7. Soğutma yükü ile COP değişimi

Şekil 8’de frekans ile COP’nin değişimi verilmiştir. Frekans arttıkça COP’nin azaldığı şekilden görülmektedir.



Şekil 8. Frekans ile COP değişimi

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, laboratuvar ölçeğindeki bir termoakustik soğutucunun optimizasyonu ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. MATLAB kullanılarak yapılan optimizasyon ve Delta EC yazılımı ile yapılan simülasyonlar sonucunda, sistemin soğutma gücü ve COP değerleri elde edilmiştir. MATLAB optimizasyonunda COP değeri 1.552 ve soğutma gücü 0.423 W olarak hesaplanırken, Delta EC simülasyonunda ise COP değeri 0.61 ve soğutma gücü 0.364 W olarak bulunmuştur. Teorik sonuçların simülasyon sonuçlarına göre daha iyi çıkmasının nedeni, teorik tasarımda hoparlör parametrelerinin ve rezonaratörünün konik kısmındaki sönümlenme etkilerinin ihmal edilmiş olmasıdır.

Bu konudaki çalışmalar, COP ‘nin buhar sıkıştırılmalı soğutuculara göre düşük değerde olduğunu göstermiştir. COP ‘yi artırmak için farklı yığın malzemeleri ve iş gören akışkan ile optimizasyon yapılarak deneysel çalışmalar yapılmalıdır.

Simgeler Dizini

A	Yığının dik kesit alanı, m ²	ρ_m	Ortalama yoğunluk, kg/m ³
f	Rezonaratör frekansı, Hz	c_p	Sabit basınçta özgül ısı, J/kgK
P_m	Ortalama basınç, kPa	σ	Prandtl sayısı
T_m	Ortalama gaz sıcaklığı, K	k	Isı iletim katsayısı, W/m.K
D	Sürücü oranı	a	Ses hızı, akustik hız, m/s
ΔT_m	Yığının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı, K	y_0	Yığın plakalar arası boşluğunun yarısı, mm
L_t	Toplam rezonaratör uzunluğu, mm	l	Yığın plaka kalınlığının yarısı, mm
L₁	Sürücüden küçük çaplı boruya kadar uzunluk, mm	X_n	Normalize edilmiş yığın merkez konumu
L₂	Küçük çaplı borunun uzunluğu, mm	L_{sn}	Normalize edilmiş yığın uzunluğu
L₃	Iraksak kısmın uzunluğu, mm	δ_v	Viskoz nüfuz derinliği, mm
l₁	Hoparlörden sıcak ısı değiştiriciye kadar mesafe, mm	δ_k	Isıl nüfuz derinliği, mm
l₂	Sıcak ısı değiştirici uzunluğu, mm	COP	Soğutma tesir katsayısı
l₃	Yığının uzunluğu, mm	H	Toplam güç, W
l₄	Soğuk ısı değiştirici uzunluğu, mm	W	Akustik güç, W
l₅	Konik parçanın boyu, mm	R	Kürenin yarıçapı

Kaynaklar

Abd Rahim, I., Mohd Zain, M. Z., Asmuin, N. & Mohd Saad, M. S. (2015). Determination performance of thermoacoustic heat engine simulation by delta EC software. Key Engineering Materials, 660, 311-316.

Ali, U., Al-Mufti, O. & Janajreh, I. (2024). Harnessing sound waves for sustainable energy: advancements and challenges in thermoacoustic technology. Energy Nexus, 100320.

- Duman, N., Acar, H. İ. & Yıldırım, G. (2023a). Termoakustik Soğutma Sisteminin Tasarımı ve Simülasyonu. Uluslararası katılımlı 24. Isı bilimi ve tekniği kongresi (ULIBTK'23), Ankara, Türkiye
- Duman, N., Acar, H. İ., Kuzey, Ö., & Kuzey, Ş. (2023b). An Experimental Study of Thermoacoustic Couples. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(3), 649-659.
- Hofler, T. J. (1986). Thermoacoustic refrigerator design and performance. Ph. D. Thesis.
- Irfan, A. R., Zarhamdy, M. Z. M., Sazli, S. M., Amni, M. N., Shuaib, N. A., & Azlida, A. (2019, July). Computational study on thermoacoustic heat engine for proposing a new method renewable technique. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2129, No. 1). AIP Publishing.
- Jana, A., Sarkar, S., & Mukhopadhyay, A. (2021). Performance Study of a Small Capacity Thermoacoustic Refrigerator Using DELTA EC Software. In Advances in Thermal Engineering, Manufacturing, and Production Management: Select Proceedings of ICTEMA 2020 (pp. 157-169). Springer Singapore.
- Johari, D., Mattokit, E., & Saat, F. A. Z. M. (2018). Parametric study of thermoacoustic system using DeltaE. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 46(1), 161-168.
- Johnson, R. A., Garrett, S. L., & Keolian, R. M. (2000). Thermoacoustic cooling for surface combatants. Naval engineers journal, 112(4), 335-345.
- Kajurek, J., Rusowicz, A. & Grzebielec, A. (2019). Design and simulation of a small capacity thermoacoustic refrigerator. SN Applied Sciences, 1(6), 1–9. [https:// doi. org/ 10. 1007/ s42452- 019- 0569-228\(3\)](https://doi.org/10.1007/s42452-019-0569-228(3)), 2050020. [https:// doi. org/ 10. 1142/S2010 13252 05002 00](https://doi.org/10.1142/S2010132520500200)
- Nouh, M. A., Arafa, N. M., & Abdel-Rahman, E. (2014). Stack parameters effect on the performance of anharmonic resonator thermoacoustic heat engine.
- Prashantha, B. G., Swamy, D. R., Soragaon, B. & Nanjundeswaraswamy, T. S. (2020). Design optimization and analysis of thermoacoustic refrigerators. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 28(03), 2050020.
- Rott N. (1980) Thermoacoustics. Advances in applied mechanics, 20: 135-175.
- Sarode, A., Dighe, V., Ingle, V. & Kolekar, N. (2014). Theoretical investigation on standing wave thermoacoustic prime mover using Delta EC. International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), 562, 568.
- Sarpero, E., Gourdon, E., & Borelli, D. (2023). Experimental development and optimization of a standing wave thermoacoustic refrigerator using additive manufactured stacks. International Journal of Refrigeration, 146, 63-73.
- Swift G. W. (1988), Thermoacoustic engines. The Journal of the Acoustical Society of America, 84(4), 1145-1180.
- Swift GW. (1992). Analysis and performance of a large thermoacoustic engine. the Journal of the Acoustical Society of America, 92.3: 1551-1563.
- Tijani, M. E. H., Zeegers, J. C. H., & De Waele, A. T. A. M. 2002. Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator. Cryogenics, 42(1), 59-66.
- Ward, W.C. & Swift. G.W. (1993). Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Engines", Tutorial and User's Guide. Los Alamos National Laboratory, N.M.
- Wetzel, M., & Herman, C. (1997). Design optimization of thermoacoustic refrigerators. International journal of refrigeration, 20(1), 3-21.

**ERCIYES MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİNDEKİ A BLOK İÇİN KARBON EMİSYONLARININ AZALTILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA****Dila EKİCİ¹**¹ Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye¹ ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-4411-5640>**Gamze GENÇ²**² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye² ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-2161>**Özet**

Bu projede, Mühendislik Fakültesi A blok binasının karbon emisyonu hesaplaması yapılarak, emisyonun azaltılması için alternatif çözümler bulunması amaçlanmıştır. Bu sayede, sera gazı emisyonlarının sebep olduğu küresel ısınmanın etkilerinin de azaltılması hedeflenmiştir. Fakültenin karbon emisyonu hesaplamasında, IPCC'nin (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) CO₂ emisyonu hesaplama metodolojisi kullanılmıştır. Mühendislik Fakültesi A blok binasının elektrik ve doğalgaz tüketimleri aylık ve yıllık olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan tüketim değerlerinden, fakültenin yıllık toplam CO₂ emisyonu miktarı belirlenmiştir. Ayrıca insan yoğunluğunun da sebep olduğu yıllık ortalama karbon salınımı hesaplanmıştır. Elektrik tüketimi kaynaklı emisyonun azaltılması için, elektriğin tasarruflu kullanımı ve binanın elektrik ihtiyacının çatıya kurulacak güneş enerjisi sisteminden karşılanması durumu incelenmiştir. Doğalgaz tüketimi için ise, %10 oranında enerji tasarrufu sağlanmasıyla karbon emisyonunun azaltılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sera gazı, emisyon, küresel ısınma, enerji tasarrufu

A RESEARCH ON THE CARBON EMISSION REDUCTION FOR THE A-BUILDING IN ERCIYES ENGINEERING FACULTY**Abstract**

In this project, the aim is to find alternative solutions to reduce emissions by calculating the carbon emissions of the Faculty of Engineering. In this way, it is aimed to reduce the effects of global warming caused by greenhouse gas emissions. In the carbon emission calculation of the faculty, IPCC's (Intergovernmental Panel on Climate Change) CO₂ emission calculation methodology was used. Electricity and natural gas consumption of the Faculty of Engineering Block A building were calculated monthly and annually. From the calculated consumption values, the annual total CO₂ emission amount of the faculty was determined. In addition, the annual average carbon emissions caused by human density were calculated. In order to reduce emissions caused by electricity consumption, the economical use of electricity and the providing of the building's electricity needs from the solar energy system to be installed on the roof were examined. For natural gas consumption, it is aimed to reduce carbon emissions by saving 10% energy.

Keywords: Greenhouse gas, emission, global warming, energy saving

Giriş

Sera gazları, Dünya'nın yüzeyi, atmosferi ve bulutları tarafından yayılan kızılötesi radyasyon spektrumu dahilinde belirli dalga boylarındaki radyasyonu emen ve yayan, atmosferin hem doğal hem de antropojenik gaz hâlindeki bileşenleridir. Bu özellikleri nedeniyle, sera etkisine neden olurlar. Su buharı (H₂O), karbondioksit (CO₂), nitroz oksit (N₂O), metan (CH₄) ve ozon (O₃) başlıca sera gazlarıdır.

Sanayi Devrimi'nin başlangıcından bu yana (yaklaşık 1750) insan faaliyetleri sebebiyle, atmosferik karbondioksit konsantrasyonunda %47'lik bir artış görülmüştür. Atmosferik karbondioksit konsantrasyonunun bu kadar yüksek olduğu en yakın zamanın 3 milyon yıldan fazla bir zaman öncesi olduğu gözlemlenmiştir. Bu artış, doğal karbon döngüsünde yer alan çeşitli "karbon yutakları" tarafından emisyonların yarısından fazlasının emilmesine rağmen meydana gelmiştir. Mevcut sera gazı emisyon oranları devam ederse, Dünya yüzeyinin ortalama sıcaklığı 2036 yılına kadar 2°C (3.6°F) kadar artabilir. Bu artış miktarı Birleşmiş Milletler Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından "tehlikeli" seviyelerden kaçınabilmek için üst sınır olarak belirlenmiştir. Antropojenik karbondioksit emisyonlarının büyük çoğunluğu, özellikle kömür, petrol ve doğalgazın yakılmasından kaynaklanır ve ormansızlaşma ve arazi kullanımındaki diğer değişiklikler de buna katkıda bulunmaktadır.

İnsanlar tarafından atmosfere salınan gazların sera etkisi yaratması sonucunda dünya yüzeyinde sıcaklığın artmasına küresel ısınma denir. Bu olay son 50 yıldır iyice saptanabilir duruma gelmiş ve önem kazanmıştır. Sera gazı envanteri sonuçlarına göre kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4 ton CO₂ eşd. iken 2020 yılında 6.3 ton CO₂ eşd. ve 2021 yılında 6.7 ton CO₂ eşd.'dir (TUIK, 2024). İklim sisteminde vazgeçilmez bir yere sahip olan sera gazları, güneş ve yer radyasyonunu tutarak, atmosferin ısınmasında başlıca etkindir. Sera gazlarının bulunmaması durumunda yeryüzünün sıcaklığının bugüne göre 30°C daha soğuk olacağı hesaplanmıştır. Atmosferde doğal olarak bulunan ve dünyamızın aşırı soğumasını engelleyen sera gazlarının salınımı, özellikle karbon dioksit, metan ve nitrojen oksit sanayi devriminden bu yana insan faaliyetleri sonucu artış göstermiştir. Doğal geri emme süreçleri zorlanmış ve atmosferdeki sera gazı konsantrasyonları sürekli olarak yükselmiş; sonuç olarak da küresel ısınma dediğimiz dünyamızın yüzeyinde ortalama sıcaklığın giderek artması süreci başlanmıştır. Çeşitli ülkelerden 2500 bilim adamının katkıda bulunduğu Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) araştırmaları sonucu, 1995 yılından bu yana iklim değişikliği ve küresel ısınmanın inkâr edilemez gerçekler olduğu kabul edilmiştir.

Bu çalışmada, Mühendislik Fakültesi A blok binasının karbon emisyonu hesaplanması yapılarak, emisyonu azaltmak için alternatif çözümler bulunması amaçlanmaktadır.

Hesaplamalar

Aylık Elektrik ve Doğalgaz Tüketimi Hesabı

Fakültenin A blok binasındaki elektrik ve doğalgaz tüketimi hesabında; bloktaki 4 bölümün her birinin toplam derslikleri (38 tane), laboratuvarlar (21 tane) ve ofisler (84 tane) ele alınmıştır. Elektrik tüketimi hesabında, öncelikle fakültede kullanılan her bir cihazın güç değerinden aylık tüketim değeri belirlenmiş, doğalgaz tüketiminde ise radyatörlerin her bir diliminin ısı güç değerinden aylık tüketim değerine ulaşılmıştır. Binada kullanılan cihazların aylık elektrik tüketim değerleri Tablo 1'de ve radyatörlerin aylık doğalgaz tüketimi Tablo 2'de verilmiştir. Binada yer alan bölümler bazında elektrik tüketimleri Tablo 3'de ve doğalgaz tüketimleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 1. Cihazların Birim Başına Aylık Elektrik Tüketimi

ELEKTRİK TÜKETİMİ				
Cihaz	Güç (W)	Günde çalıştığı saat	Haftalık çalıştığı gün	Aylık tüketim (kWh)
Bilgisayar	200	8	5	32
Projeksiyon	250	8	5	40
Floresan	60	5	5	6
Kare led armatür	24	5	5	2,4

Tablo 2. Radyatörlerin Birim Başına Aylık Doğalgaz Tüketimi

DOĞALGAZ TÜKETİMİ				
Döküm radyatör	Isıl güç değeri (kW)	Günde çalıştığı saat	Haftalık çalıştığı gün	Aylık tüketim (kWh)
Kısa radyatör (11 dilim)	1,331	14	5	372,68
Uzun radyatör (19 dilim)	2,299	14	5	643,72

Tablo 3. Aylık Toplam Elektrik Tüketimi

AYLIK ELEKTRİK TÜKETİMİ				
Derslikler	Aydınlatma (kWh)	Bilgisayar (kWh)	Projeksiyon (kWh)	Aylık Toplam Tüketim (kWh)
Makine mühendisliği derslikleri	273,6	288	360	921,6
Elektrik mühendisliği derslikleri	528	288	360	1176
İnşaat mühendisliği derslikleri	624	2880	400	3904
Endüstri mühendisliği derslikleri	672	4160	400	5232
Laboratuvarlar	2016	672	0	2688
Ofisler	1008	2688	0	3696
Toplam Tüketim (kWh)				17617,6

Tablo 4. Aylık Toplam Doğalgaz Tüketimi

AYLIK DOĞALGAZ TÜKETİMİ			
Derslikler	Kısa radyatör (kWh)	Uzun radyatör (kWh)	Aylık Toplam Tüketim (kWh)
Makine mühendisliği derslikleri	6335,56	3218,6	9554,16
Elektrik mühendisliği derslikleri	6708,24	2574,88	9283,12
İnşaat mühendisliği derslikleri	7453,6	3862,32	11315,92
Endüstri mühendisliği derslikleri	7453,6	5149,76	12603,36
Laboratuvarlar	15652,56	27036,24	42688,8
Ofisler	31305,12	0	31305,12
Toplam Tüketim (kWh)			116750,5
Toplam Tüketim (m ³)			10972,8

Yıllık Tüketimlere Bağlı Olarak Oluşan Karbon Emisyonunun Hesaplanması

Fakültenin yıllık elektrik tüketimi hesaplanırken, dersliklerin yılda 9 ay, ofislerin ise 12 ay kullanıldığı varsayılarak aylık tüketim değerlerinden yıllık toplam tüketim değerine ulaşılmıştır. Elektrik tüketimi sonucu oluşan CO₂ emisyon miktarı ($E_{tCO_2/yıl}$) Eş.1, ile hesaplanırken doğalgaz tüketiminden oluşan CO₂ emisyon miktarı için Eş. 2 kullanılır (ISO, 2018; SGP, 2017).

$$\frac{E_{tCO_2}}{yıl} = \left(\left(\frac{ET_{kWh}}{yıl} \times EF_{\frac{kgCO_2}{m^3}} \times \text{İ\&DK}\% \right) + \left(ET_{kWh,yıl} \times EF_{\frac{kgCO_2}{kWh}} \right) \right) \times 10^{-3} \quad (\text{Eş. 1})$$

burada ET toplam yıllık elektrik tüketimi, EF emisyon faktörünü, İ&DK iletim ve dağıtım kayıplarını göstermektedir. Elektrik tüketimi için EF faktörü 0.48 kgCO₂/kWh ve İ&DK %1.93 ve %12.7, toplamda %14.63 olarak kabul edilmiştir (TEDAS, 2020; TEIAS, 2024).

$$\frac{E_{tCO_2}}{yıl} = \left((YT \times D \times 10^{-3}) \times DF \times (EF \times 10^{-3} \times OKY \times KIP) \right) \quad (\text{Eş. 2})$$

burada YT yakıt tüketimini, D doğalgazın yoğunluğu (0.670), DF dönüşüm faktörü (48), EF emisyon faktörünü (56100), OKY oksitlenen karbon yüzdesi (%) ve KIP küresel ısınma potansiyelini (1) ifade etmektedir.

Yıllık doğalgaz tüketimi hesaplamasında, radyatörlerin yılda 5 ay kullanıldığı varsayılarak, yıllık toplam tüketim değerine ulaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elektrik tüketiminden kaynaklı oluşan karbon emisyon değerleri Tablo 5’de ve doğalgaz tüketimi kaynaklı oluşan karbon emisyon değerleri ise Tablo 6’da verilmiştir. Tablo 5’e göre elektrik tüketiminin yıllık 92 ton karbon emisyonuna sebep olduğu görülmüştür. Hesaplamalar sonucunda doğalgaz kullanımının yıllık 98 ton karbon emisyonuna sebep olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Elektrik Tüketimi Kaynaklı Oluşan Karbon Emisyonu

ELEKTRİK TÜKETİMİ KAYNAKLI KARBON EMİSYONU				
Derslikler	Aydınlatma (kWh)	Bilgisayar (kWh)	Projeksiyon (kWh)	Yıllık Toplam Tüketim (kWh)
Makine mühendisliği derslikleri	2462,4	2592	3240	8294,4
Elektrik mühendisliği derslikleri	4752	2592	3240	10584
İnşaat mühendisliği derslikleri	5616	25920	3600	35136
Endüstri mühendisliği derslikleri	6048	37440	3600	47088
Laboratuvarlar	18144	6048	0	24192
Ofisler	11491,2	32256	0	43747,2
Toplam Tüketim (kWh)				169041,6
Toplam CO ₂ Emisyonu (ton)	$tCO_2 = [(ET \times EF \times iDK\%) + (ET \times EF)] \times 10^{-3}$			92,99

Tablo 6. Doğalgaz Tüketimi Kaynaklı Oluşan Karbon Emisyonu

DOĞALGAZ TÜKETİMİ KAYNAKLI KARBON EMİSYONU			
Derslikler	Kısa radyatör (kWh)	Uzun radyatör (kWh)	Yıllık Toplam Tüketim (kWh)
Makine mühendisliği derslikleri	31677,8	16093	47770,8
Elektrik mühendisliği derslikleri	33541,2	12874,4	46415,6
İnşaat mühendisliği derslikleri	37268	19311,6	56579,6
Endüstri mühendisliği derslikleri	37268	25748,8	63016,8
Laboratuvarlar	78262,8	135181,2	213444
Ofisler	156525,6	0	156525,6
Toplam Tüketim (kWh)			583752,4
Toplam Tüketim (m ³)			54863,9
Toplam CO ₂ Emisyonu (ton)	$tCO_2 = [(YT \times d \times 10^{-3}) \times DF \times 10^{-3}] \times EF \times 10^{-3} \times OKY \times KI$		98,98

İnsan kaynaklı oluşan karbon emisyonunun hesaplanmasında, öncelikle her bölüm için aylık ortalama öğrenci sayısı belirlenmiştir. Sonrasında aylık kişi başı karbon ayak izi değerinden A bloktaki insan yoğunluğuna göre yıllık toplam emisyon değerine ulaşılmıştır ve bu değerler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. İnsan Kaynaklı Oluşan Karbon Emisyonu

İNSAN KAYNAKLI KARBON EMİSYONU		
	Yıllık Toplam Karbon Emisyonu (kg)	Yıllık Toplam Karbon Emisyonu (ton)
Makine mühendisliği	42206400	42206,4
Elektrik mühendisliği	42206400	42206,4
İnşaat mühendisliği	35172000	35172
Endüstri mühendisliği	35172000	35172
Toplam CO ₂ Emisyonu (ton)		154756,8

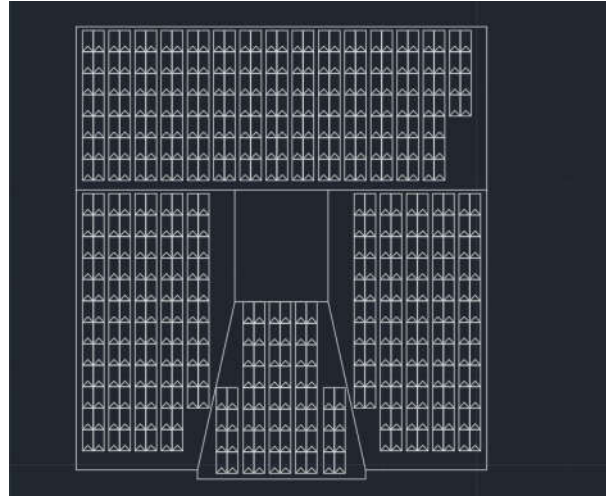
Karbon Emisyonunu Azaltmak İçin Alternatif Çözüm Senaryoları

Elektrik İhtiyacının Güneş Panelleriyle Karşılanması

Elektrik kullanımı kaynaklı karbon emisyonunu azaltmak için Şekil 1’de görülen fakülte binasının elektrik ihtiyacının güneş panelleriyle karşılanması durumu incelenmiştir. Binanın elektrik ihtiyacını güneş panelleriyle karşılamak amacıyla, PVsyst üzerinden çatıya kurulabilecek güneş enerjisi sisteminin üretebileceği enerji, aylık ve yıllık olarak hesaplanmıştır. Çatı üstü panellerin yerleşimi Şekil 2’de gösterilmiştir. PVsyst yazılımından elde edilen proje özeti Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 1. Mühendislik Fakültesi

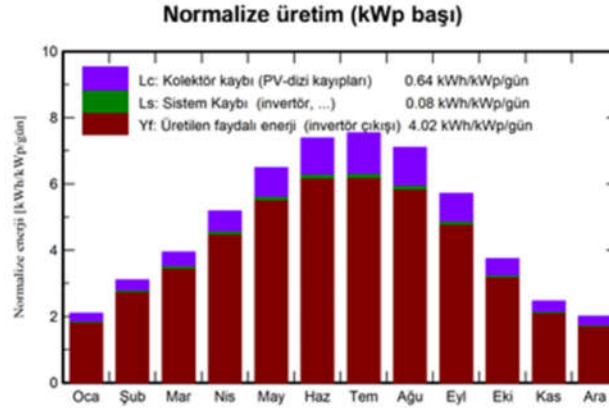


Şekil 2. A Blok Binasının Çatısına Yerleştirilecek Olan Güneş Panelleri

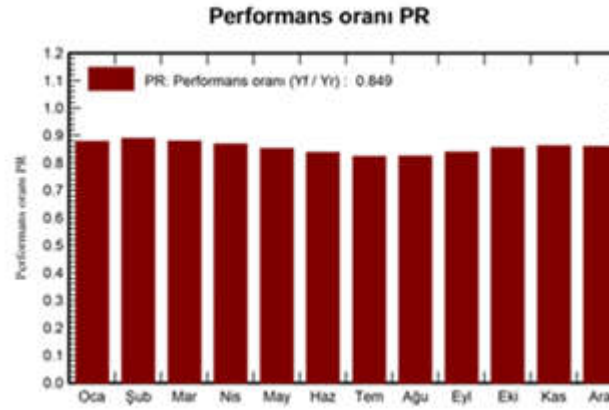
Proje özeti			
Cografik konum	Konum	Proje ayarları	
Alparistan Türkiye	Enlem: 38.71 °N Boylam: 35.52 °E Rakım: 1075 m Saat dilimi: UTC+3	Albedo: 0.20	
Hava durumu verileri			
Alparistan Meteoroloji 8.1 (2005-2013) - Sarımsak			
Sistem özeti			
Şebekeye bağlı sistem	3B sahne tanımlanmadı, gölgelemesiz		
Yıl no 1 için simülasyon			
Kolektör düzleminin yönlendirilmesi	Yakın gölgelemeler	Kullanıcı ihtiyaçları	
Sabit düzlemler: 2 yönlendirme Eğilim: 13 / 102 ° 13 / -78 °	Gölgelemesiz	Sınırsız yükleme (şebeke)	
Sistem bilgisi			
PV alanı	İnvertör		
Panel sayısı: 200 adet	Öçe sayısı: 1 adet		
Toplam nom. güç: 110 kWp	Toplam nom. güç: 100 kWac		
	Şebeke güç sınırı: 100 kWac		
	Şebeke sınırlı Prizm oranı: 1.100		
Sonuçların özeti			
Özden enerji: 161401 kWh/yıl	Özellikler: 1467 kWh/kWh/yıl	Perf. oranı PR: 84.86 %	

Şekil 3. PVsyst Üzerinde Yapılan Projenin Sonuçları

Şekil 3’de verilen proje özeti incelendiğinde 100 kWp kurulu çatı üstü GES’den yıllık üretilen enerji değeri 161401 kWh olarak elde edilmiştir. 2024 yılı için 100kW’lık GES kurulum maliyeti yaklaşık 40000\$’dır. Kurulu sistemin aylık normalize üretim değerleri Şekil 4’de ve sistemin aylık performans oranının değişimi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 4. Sistemin Aylık Normalize Üretim Grafiği



Şekil 5. Sistemin Aylık Performans Oranı

Yıllık elektrik tüketiminin azaltılması için, enerjinin mevsim şartlarına göre daha uygun kullanıldığı ve bahar ve yaz aylarındaki günlük aydınlatma kullanımının diğer aylara göre bir saat daha az olduğu varsayılmıştır. Tasarruf yapılması durumunda elektrik tüketiminin aylık değişimi Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 9’da ise kurulu GES’ten elde edilecek aylık elektrik üretim değerleri verilmiştir. Sonuçlar kıyaslandığında fakülte binasının yıllık toplam elektrik ihtiyacının, güneş panellerinden üretilen enerji ile karşılanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 8. Elektrik Kullanımının Azaltılması Durumunda Aylık Elektrik İhtiyacı

Elektrik Kullanımı		
Aylar	Normal durumda	Tasarruflu durumda
Ocak	17617,6	14708,8
Şubat	17617,6	14708,8
Mart	17617,6	14708,8
Nisan	17617,6	14266,2
Mayıs	17617,6	14266,2
Haziran	3494,4	3010,6
Temmuz	3494,4	3010,6
Ağustos	3494,4	3010,6
Eylül	17617,6	14266,2
Ekim	17617,6	14266,2
Kasım	17617,6	14708,8
Aralık	17617,6	14708,8
Yıllık toplam tüketim (kWh)	169041,6	139640,5
Toplam CO ₂ Emisyonu (ton)	93,0	0

Tablo 9. Güneş Panellerinden Üretilebilecek Aylık Enerji Miktarı

Bilanço ve genel sonuçlar								
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	oran
Ocak	65.5	29.80	-1.25	64.9	58.0	6384	6261	0.878
Şubat	87.6	38.36	0.84	86.9	79.3	8653	8491	0.888
Mart	123.9	52.67	5.82	122.3	113.6	12055	11821	0.879
Nisan	157.1	67.29	10.38	155.3	145.4	15138	14840	0.868
Mayıs	203.9	72.01	15.05	201.1	189.2	19236	18859	0.852
Haziran	224.2	63.82	19.51	221.5	208.9	20829	20417	0.838
Temmuz	236.7	59.27	23.33	233.6	220.3	21571	21154	0.823
Ağustos	222.6	48.50	23.33	220.3	207.3	20348	19957	0.824
Eylül	173.4	43.91	17.76	171.2	160.0	16120	15810	0.840
Ekim	117.0	40.29	11.94	116.1	106.8	11129	10919	0.855
Kasım	74.7	30.51	5.25	73.9	66.5	7136	7002	0.862
Aralık	62.3	25.14	0.64	62.1	54.7	5982	5868	0.859
Yıl	1749.0	571.58	11.11	1729.1	1610.0	164582	161401	0.849

Açıklama

GlobHor Global yatay ışınlama
 DiffHor Yatay difüz ışınlama
 T_Amb Çevre sıcaklığı
 GlobInc Kolektöre yansıyan global
 GlobEff IAM ve gölgeleme için düzeltilmiş etkin Global

EArray Dizinin dışında etkin enerji
 E_Grid Şebekeye enjekte edilen enerji
 PR Performans oranı

Doğalgaz Kullanımını Azaltma Yöntemi

Fakülte binasının doğalgaz tüketimini azaltmak için, radyatör sıcaklığının 2 derece düşürülmesiyle %10 oranında enerji tasarrufu sağlanması amaçlanarak hesaplama yapılmıştır. Tasarruf yapılması sonucunda aylık doğalgaz tüketim değerleri ve buna bağlı olarak karbon emisyon değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Doğalgaz Kullanımın Azaltılması Durumunda Aylık Doğalgaz Tüketimi

Doğalgaz Kullanımı		
Aylar	Normal durumda	Tasarruflu durumda
Ocak	116750,5	105075,4
Şubat	116750,5	105075,4
Mart	116750,5	105075,4
Nisan	0	0
Mayıs	0	0
Haziran	0	0
Temmuz	0	0
Ağustos	0	0
Eylül	0	0
Ekim	0	0
Kasım	116750,5	105075,4
Aralık	116750,5	105075,4
Yıllık toplam tüketim (kWh)	583752,48	525377,16
Yıllık toplam tüketim (m ³)	54863,9	49377,6
Toplam CO ₂ Emisyonu (ton)	99,0	89,1

Sonuçlar

Mühendislik Fakültesi A blok için elektrik kullanımı normal durumda yıllık 169041 kWh ile yılda toplam 93 ton CO₂ emisyonuna sebep olurken, tasarruflu durumda 139640 kWh olarak, binanın elektrik ihtiyacının güneş enerjisiyle karşılanması durumunda emisyon değeri sıfırlanmıştır.

Doğalgaz kullanımı sonucu normal durumda yıllık 54863 m³ ile 99 ton CO₂ atmosfere salınırken, enerji tasarrufu sağlandığında yıllık doğalgaz tüketimi 49377 m³ olması sonucunda emisyon değeri %10 azaltılarak 89 tona düşürülmüştür.

Kaynaklar

International Organization for Standardization (ISO) 2018. ISO 14064, <https://www.iso.org/standard/66453.html>

Sera Gazı Protokolü (SGP), 2017. What is GHG Protocol? <http://www.ghgprotocol.org/about-us>

Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAS), 2020. Sektör raporu. https://www.tedas.gov.tr/fileupload/mediafolder/sx.web.docs/tedas/docs/Stratejikplan/2020_Yili_Turkiye_Elektrik_Dagitimi_Sektor_Raporu.pdf

Türkiye Elektrik İletim A.Ş., TEIAS, 2024. Faaliyet Raporu. <https://www.teias.gov.tr>.

Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK), 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>

Yenilenebilir Enerji - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (YEGM), 2018. Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değerleri ve Petrol Eşdeğerine Çevrim Katsayıları. http://www.yegm.gov.tr/duyurular_haberler/document/SENER_15_Usul_ve_Esaslar_Ek2.pdf Erişim 18.06.2018

PARAMETER SENSITIVITY ANALYSIS FOR ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE OF A SODIUM-ION BATTERY**Sevde ERTÜRK ÇETİNKAYA**Erciyes University, Institute of Science, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3048-040X>**Muhammet ÇELİK**Aksaray University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Aksaray, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8978-4814>**Gamze GENÇ**Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Türkiye
(Responsible Author), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-2161>**Abstract**

The precise identification of physical parameters in a sodium-ion battery model is vital for developing next-generation battery management systems. The complexity of the electrochemical model complicates the identification process, analyzing parameter identifiability essential for accurate parameter identification. The main objective of this paper is to study the parameter sensitivity of an electrochemical model during discharge. In a battery management system based on an electrochemical model, the sensitivity of the parameters is specifically examined for terminal voltage. Sensitivity analysis was performed for the different electrolyte volume fractions and the initial concentrations at the positive electrode to observe their effects on the model output under the same conditions. Comparing these analyses to each other, it was found that the battery's operating range decreased as the concentration increased (in the sensitivity range of 1–5 kmol/m³) and that the battery discharged quickly when the volume fraction in the positive electrode increased (in the sensitivity range of 0.1–0.5).

Keywords: Sodium ion battery, Sensitivity, Electrolyte volume, Concentration.**Introduction**

The increasing demand for high-performance and reliable energy storage solutions has propelled the development of advanced battery technologies, particularly sodium-ion (Na-ion) batteries. To optimize the performance and lifespan of these batteries, a deep understanding of the underlying electrochemical and thermal processes is essential. In recent years, sensitivity analysis has emerged as a powerful tool to investigate the impact of various parameters on battery behavior. Sensitivity analysis involves systematically varying input parameters and observing the corresponding changes in output variables. By quantifying the sensitivity of battery models to different factors, researchers can identify critical parameters that significantly influence battery performance and safety. This knowledge is invaluable for accurate state-of-charge estimation, state-of-health assessment, optimal battery life, and optimal battery management.

Recent studies have highlighted the significance of sensitivity analysis in various aspects of battery research. For instance, Zhang et al. emphasized the importance of understanding air sensitivity, degradation mechanisms, and air stability strategies for electrode materials (R. Zhang et al., 2022). Jocher et al. investigated the impact of inhomogeneous contact resistances and unequal cell temperatures on current distribution in different battery chemistries. The study revealed that different cell technologies exhibit varying sensitivities to these inhomogeneities. LIBLFP was highly sensitive to both factors, leading to significant variations in maximum currents and SoC. SIBs, while less sensitive to resistance, and were more susceptible to temperature differences. LIBNCA showed relatively low sensitivity to both inhomogeneities. These findings highlighted the importance of considering cell technology and operating conditions when designing battery systems to ensure optimal performance and safety (Jocher et al., 2024). Li et al. focused on the importance of accurate parameter identification in electrochemical models for Li-ion batteries, analyzing the sensitivity of 26 physical

parameters to various factors. By understanding the impact of parameter variations on key model outputs, the paper aimed to improve the accuracy and reliability of battery management systems. The findings highlighted the varying degrees of sensitivity for different parameters under different conditions, providing valuable insights for parameter identification and model calibration (Li et al., 2020). Lai et al. proposed a method for analytically deriving the sensitivity of battery electrochemical parameters, specifically focusing on a single particle model. The significance of this work lies in its potential to enable faster sensitivity computation, which can be beneficial for data optimization in both offline system identification and online data selection/mining for real-time estimation (Lai et al., 2019). Han et al. investigated the sensitivity of battery system State of Power (SoP) to various factors, including battery health, state of charge, temperature, and cell imbalances (Han et al., 2022).

L. Zhang et al. developed a multi-physics model for cylindrical Li-ion batteries, coupling thermal and electrochemical processes, and conducted a comprehensive sensitivity analysis to identify key parameters. By clustering parameters based on their sensitivity, the study provided a strategic approach for parameter identification, leading to improved model accuracy and predictive capabilities. (L. Zhang et al., 2014). Rahimi-eichi et al. analyzed the sensitivity of battery models to parameter variations, focusing on the impact of resistance, capacitance, and open-circuit voltage on the model's output voltage. The findings showed the importance of considering parameter variations, especially during charging cycles, to ensure accurate state-of-charge estimation and model-based control strategies (Rahimi-eichi et al., 2013).

Appiah et al. improved the accuracy of battery degradation models by conducting a sensitivity analysis to identify key parameters affecting model output. This analysis helps to optimize the model's calibration process and provides insights into the underlying mechanisms of battery degradation, such as SEI growth and irreversible capacity loss (Appiah et al., 2023). Lagnoni et al. investigated the impact of thermal parameter uncertainties on the performance of Li-ion batteries, highlighting the importance of accurate thermal parameter estimation. The results highlight the importance of accurate thermal parameter estimation, particularly for high-rate charging scenarios, to ensure reliable battery modeling and optimization (Lagnoni et al., 2021). Finally, Vazquez-arenas et al. presented a methodology for estimating the parameters of a Li-ion battery model, conducting a sensitivity analysis to determine the impact of key parameters on model accuracy. By understanding the sensitivity of the model to different parameters, the study provides insights into the importance of accurate parameter estimation for predicting battery performance and state of health. This approach can be applied to various Li-ion battery chemistries and can be extended to include additional phenomena like capacity fade (Vazquez-arenas et al., 2014)

By reviewing these studies, it was aimed to provide a comprehensive overview of the current state-of-the-art sensitivity analysis for Na-ion batteries. For this purpose, a sensitivity analysis was conducted on the electrochemical performance and cycle life of the Sodium-ion battery concerning the positive electrode concentration and volume fraction. This study will highlight the potential benefits of sensitivity analysis in advancing battery technology and improving the performance and reliability of energy storage systems.

Materials and Methods

In this study, a Sodium-ion battery was used as a hard carbon (HC) negative electrode, a separator, and a $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ (NVPF) positive electrode. The schematic of the Na-ion cell is shown in Figure 1, it consists of a negative current collector, a negative electrode (anode), a separator, a positive electrode (cathode), and a positive current collector. HC was chosen as the anode material due to its high theoretical capacity and low cost for storing Sodium ions. NVPF was selected as the cathode material owing to its high energy density and excellent cycle life

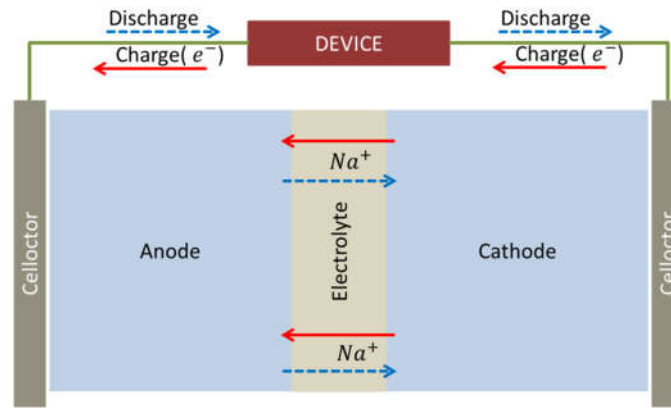


Figure 1. Schematic of a Sodium-ion battery

In Comsol Multiphysics, a comprehensive 1D model of the Sodium-ion battery was created. The model geometry, as depicted in Figure 2, simplified the battery into a one-dimensional domain. The software's versatile physics-based modeling capabilities were leveraged to accurately simulate the battery's behavior. These interfaces enabled the modeling of Sodium ion transport in the electrolyte, as well as electronic conduction in the electrode materials. The model was parameterized using experimentally determined material properties.

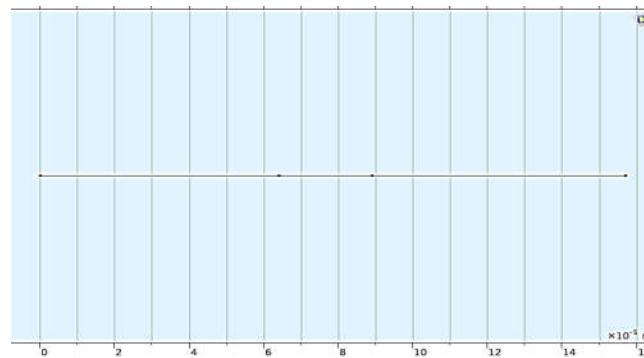


Figure 2. One dimensional Sodium-ion model geometry.

The sensitivity of the electrochemical performance to the volume fraction of NVPF in the positive electrode, within the range of 0.1 to 0.5, and to the concentration of the electrolyte, within the range of 1-5 kmol/m³, were investigated. This parameter significantly influences the battery's capacity, rate capability, and cycle life. By systematically varying the volume fraction, the aim was to determine the optimum composition that maximizes these performance metrics. A high sensitivity to the volume fraction suggests that even small changes within this range can have a substantial impact on the battery's characteristics.

Findings and Discussion

A sensitivity study was carried out at a constant current density of 5 A/m² on the positive electrode concentration, ranging from 1 to 5 kmol/m³, while holding all other parameters constant in order to examine the effect of initial concentration on the battery performance. Figure 3 presents the results of a sensitivity analysis conducted to assess the influence of initial positive electrode concentration on the electrochemical performance of a Sodium-ion battery. The graph plots the electrode potential (V) against cell capacity (mAh) for various initial concentrations. As the initial concentration of the positive electrode material increases from 1 to 5 kmol/m³, a notable slope emerges: the battery undergoes a faster discharge. This indicates that higher initial concentrations lead to a quicker depletion of the battery's capacity. Conversely, lower concentrations

exhibit a slower discharge rate. This behaviour suggests that while a higher concentration may initially provide a higher energy density, it comes at the cost of reduced cycle life.

Furthermore, the graph includes a reference curve representing the negative electrode's potential. Varying the positive electrode concentration has a negligible impact on the negative electrode's performance. This implies that the observed changes in discharge behaviour are primarily attributed to the alterations in the positive electrode. In summary, the sensitivity analysis reveals that the initial concentration of the positive electrode plays a crucial role in determining the battery's discharge rate. While higher concentrations may offer higher initial capacities, they also accelerate capacity fading. Optimizing the positive electrode concentration is essential for balancing Sodium-ion batteries' energy density and cycle life.

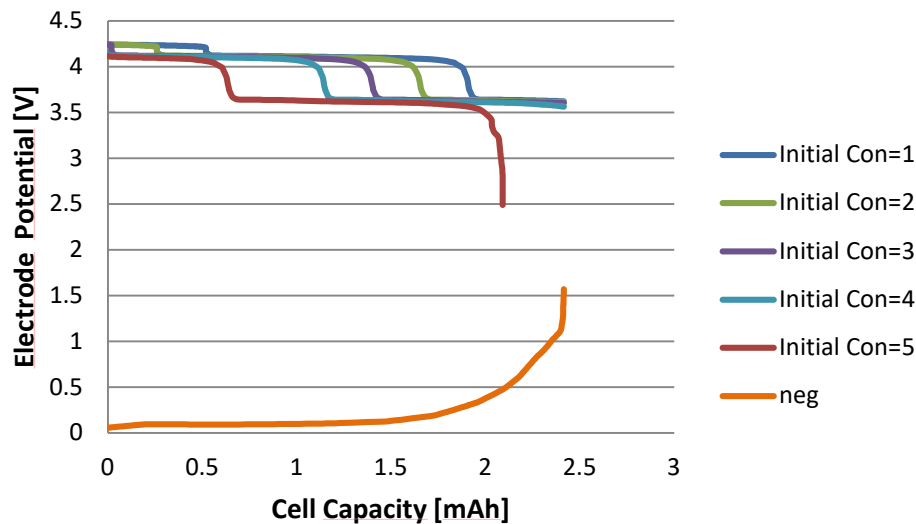


Figure 3. Sensitivity evaluation of initial concentration

Figure 4 presents the results of a sensitivity analysis conducted to investigate the relationship between the change in potential difference (ΔV) in a Sodium-ion battery. The graph plots the electrode potential (V) against cell capacity (mAh) for various ΔV values. As the ΔV value increases from 1 to 5 kmol/m³, the battery undergoes a faster discharge. This indicates that a larger potential difference leads to a quicker depletion of the battery's capacity. Conversely, lower ΔV values exhibit a slower discharge rate. This behavior aligns with the findings from Figure 3, where an increase in the initial positive electrode concentration also resulted in a faster discharge rate.

The fact that the negative electrode's performance remains relatively unchanged as the ΔV varies suggests that the observed changes in discharge behavior are primarily attributed to the alterations in the positive electrode. This implies that the ΔV is directly proportional to the changes in the positive electrode's initial concentration. Consequently, both Figures 3 and 4 demonstrate that increasing either the initial positive electrode concentration or the potential difference (ΔV) results in a faster discharge rate. This indicates a direct correlation between these two parameters. The observed behavior can be attributed to the increased electrochemical activity at the positive electrode, leading to a more rapid consumption of the active material.

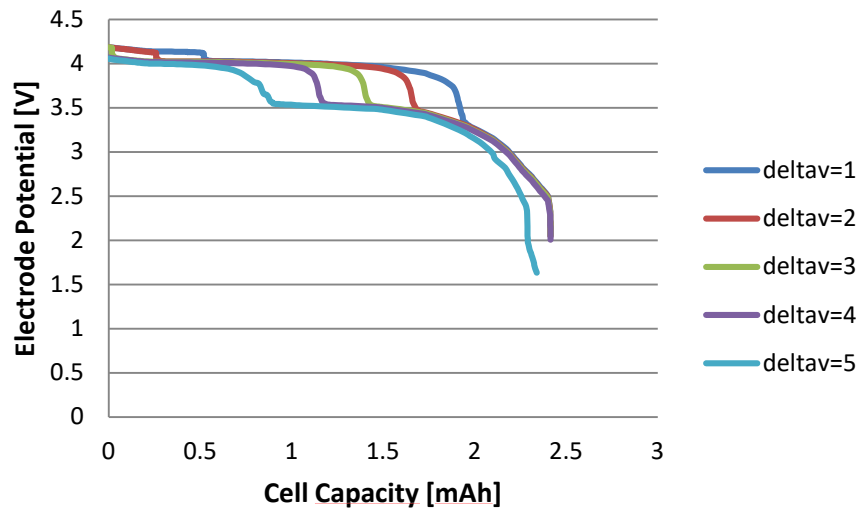


Figure 4. Sensitivity evaluation of concentration potential difference

Additionally, Figure 5 illustrates the impact of initial concentration on the temporal evolution of the electric potential at the battery boundary. Furthermore, the graph includes a reference curve representing the negative electrode's potential. Varying the positive electrode concentration has a negligible impact on the negative electrode's performance. This implies that the observed changes in discharge behaviour are primarily attributed to the alterations in the positive electrode. In summary, the sensitivity analysis reveals that the initial concentration of the positive electrode plays a crucial role in determining the battery's discharge rate. While higher concentrations may offer higher initial capacities, they also accelerate capacity fading. Optimizing the positive electrode concentration is essential for balancing Sodium-ion batteries' energy density and cycle life.

An optimal concentration exists, where the battery can deliver both high energy density and long-term durability. In this case, concentrations below 4 kmol/m^3 appear to offer a better balance between these two factors. Therefore, careful consideration of the initial concentration is crucial in designing high-performance Sodium-ion batteries. By selecting an appropriate concentration, it is possible to optimize the battery's performance and extend its lifespan.

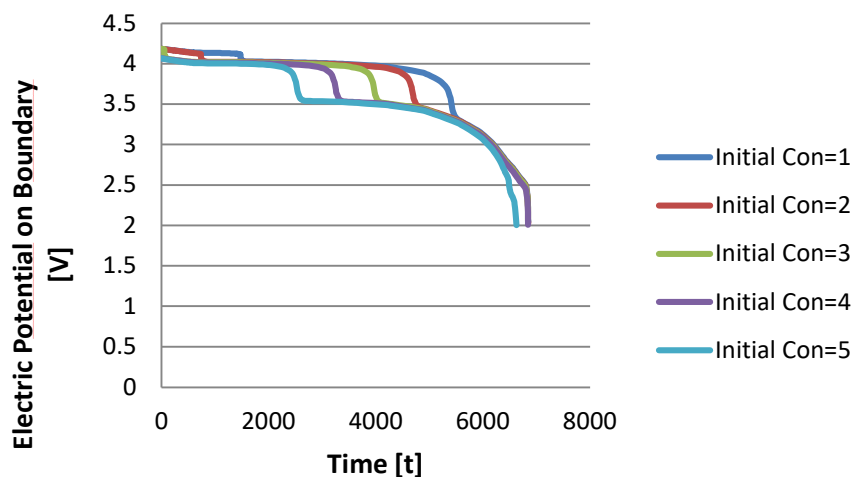


Figure 5. Concentration sensitivity analysis according to time

Figure 6 presents a more detailed analysis of the concentration sensitivity within the range of $3\text{-}4 \text{ kmol/m}^3$. By examining the potential profiles for different concentrations within this narrow range, we can gain further

insights into the optimal concentration for the Sodium-ion battery. Figure 7 depicts the electrode potential as a function of cell capacity for various initial concentrations within this range.

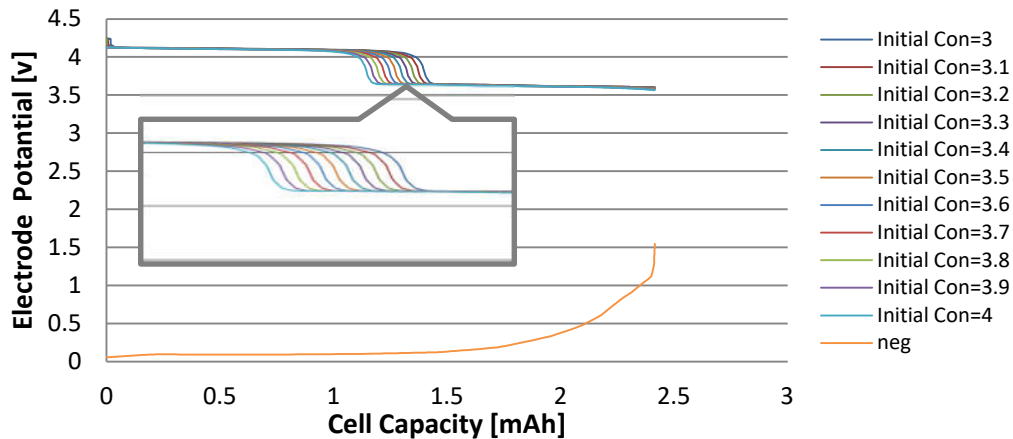


Figure 6. Concentration sensitivity analysis for the initial concentration from 3 to 4 stepped 0.1

As the concentration increases from 3 to 4 kmol/m^3 , the discharge curves exhibit subtle differences. While the overall trend remains similar, the battery with the higher concentration (4 kmol/m^3) appears to discharge slightly faster. This suggests that even within this relatively narrow concentration range, there is a delicate balance between energy density and cycle life. To achieve the best possible performance, it is crucial to identify the optimal concentration that maximizes energy density without significantly compromising cycle life.

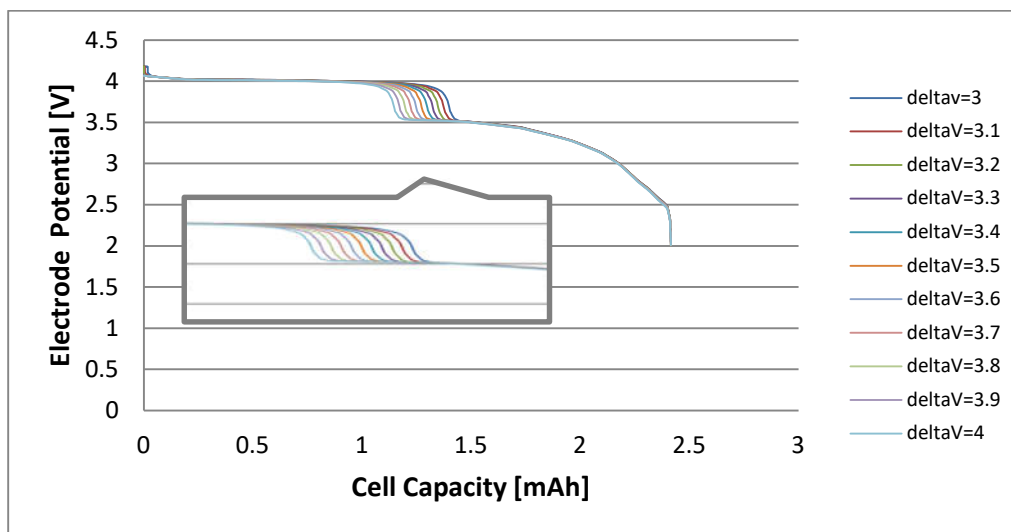


Figure 7. Potential difference analysis

Upon closer inspection, it becomes evident that as the initial concentration increases, the battery exhibits a slightly faster discharge rate. This suggests a trade-off between energy density and cycle life. Higher concentrations may lead to higher initial capacities, but they can also accelerate capacity fading. Therefore, identifying the optimal concentration within this range is crucial for achieving a balance between these two critical factors. The graphs also highlight the potential for performance degradation at higher concentrations. The steeper discharge curves for higher concentrations indicate a more rapid decline in battery voltage, which may compromise the overall performance and lifespan of the battery. In conclusion, a careful analysis of the concentration sensitivity within the 3-4 kmol/m^3 range is essential for optimizing the performance of Sodium-

ion batteries. By selecting the appropriate concentration, it is possible to achieve a balance between energy density, power density, and cycle life.

A sensitivity study was performed to determine how sensitive battery performance was to variations in the positive electrode volume fraction. All other parameters were held constant while the volume fraction was varied between 0.1 and 0.5 at a constant current density of 5 A/m².

Figure 8 illustrates the impact of varying the volume fraction of the active material in the positive electrode on the electrochemical performance of a Sodium-ion battery. The graph plots the electrode potential (V) against cell capacity (mAh) for different volume fractions ranging from 0.1 to 0.5. Figure 9 demonstrates the influence of varying the volume fraction function (ΔV) of the active material within the positive electrode on the electrochemical performance of a Sodium-ion battery.

As the volume fraction increases from 0.1 to 0.5, the battery undergoes a faster discharge. This indicates a trade-off between energy density and cycle life. A higher volume fraction may lead to higher initial capacity, but it can also accelerate capacity fading.

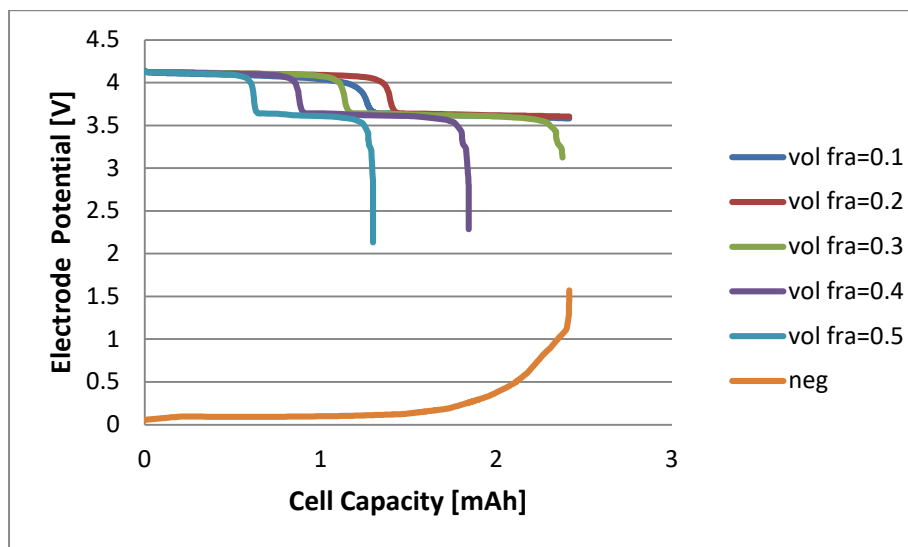


Figure 8. Sensitivity evaluation of volume fraction

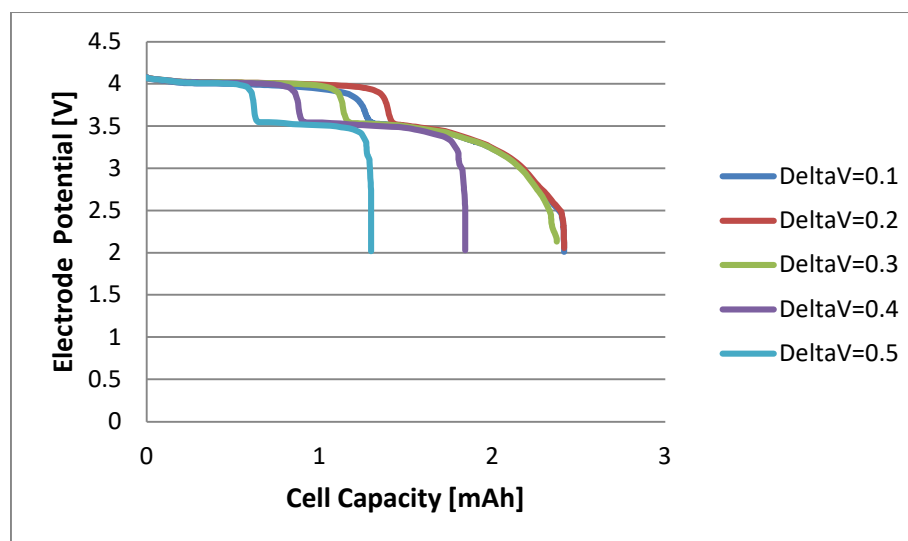


Figure 9. Sensitivity evaluation of potential difference

A closer examination reveals that a volume fraction of 0.1 is too low, leading to suboptimal performance. The battery's performance improves as the volume fraction increases to 0.2 and 0.3. However, further increasing the volume fraction beyond 0.3 may lead to a decline in performance. Therefore, the optimal range for the volume fraction appears to be between 0.2 and 0.3. It's important to note that the negative electrode's performance remains relatively unchanged as the volume fraction of the positive electrode varies. This indicates that the observed changes in discharge behavior are primarily attributed to the alterations in the positive electrode. In conclusion, the optimization of the volume fraction of the active material within the positive electrode is essential for attaining an optimal balance between energy density and cycle life in Sodium-ion batteries. A careful analysis of the sensitivity to volume fraction can guide the design of high-performance batteries.

A thorough sensitivity study of the impact of altering the volume fraction of active material in the positive electrode is shown in Figure 10, and the impact of altering the volume fraction function (ΔV) in the Sodium-ion battery's positive electrode is displayed in Figure 11. The graph specifically focuses on a narrower range of volume fractions, from 0.2 to 0.3, to provide a more refined understanding of the optimal conditions within this region. The x-axis denotes the cell capacity measured in milliampere-hours (mAh), which signifies the quantity of electrical charge that can be stored and subsequently delivered by the battery. The y-axis represents the positive electrode potential in volts (V), which is a measure of the voltage difference between the positive and negative electrodes of the battery.

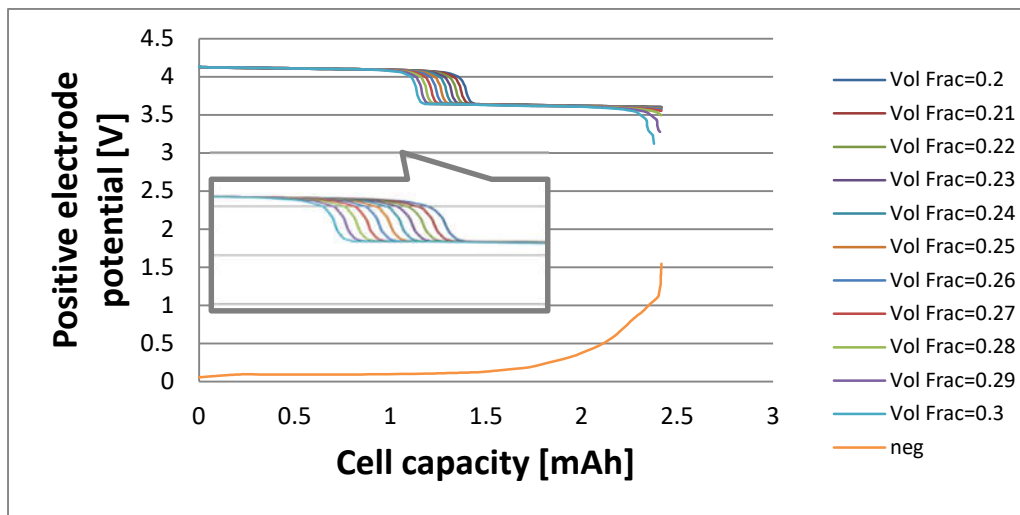


Figure 10. Volume fraction sensitivity analysis

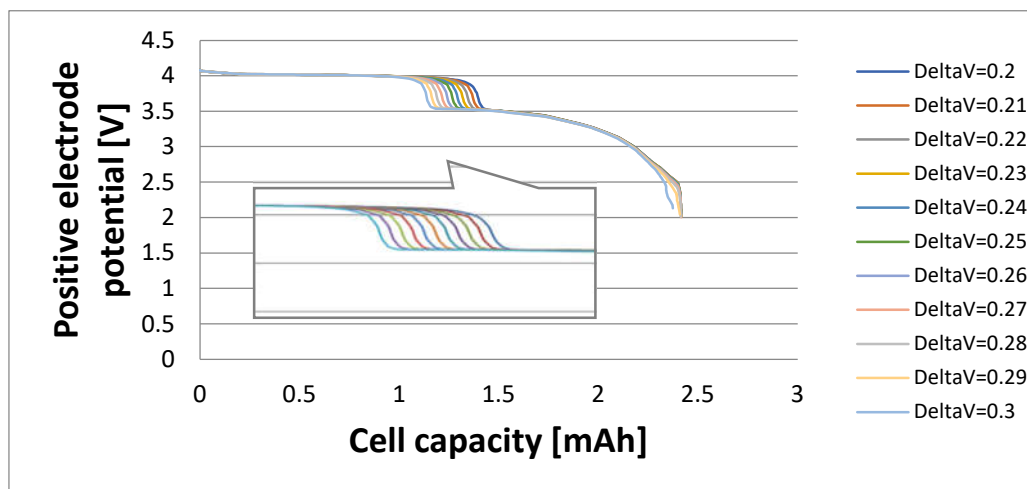


Figure 11. Volume fraction potential difference analysis

Each line on the graph corresponds to a different volume fraction value. As the volume fraction increases from 0.2 to 0.3, the battery's discharge behavior exhibits subtle changes. These changes indicate that even within this narrow range, there is a sensitive volume fraction that can maximize the battery's performance.

Conclusion and Recommendations

This study presents a sensitivity analysis of parameters such as concentration and volume fraction, which is a critical step in improving the performance of Sodium-ion batteries. By varying the concentration within the 1-5 kmol/m³ range and the volume fraction between 0.1 and 0.5, a significant impact on the battery's discharge rate and cycle life was observed. Specifically, increasing the concentration or volume fraction led to faster discharge rates, indicating a trade-off between energy density and cycle life. These findings provide valuable insights for optimizing battery design and operation. Future research can delve deeper into the underlying mechanisms, explore the effects of other parameters like temperature and current rate, and leverage advanced modeling techniques to predict battery performance more accurately.

Thanks and Information Note

Sevde ERTÜRK ÇETİNKAYA has received research support from The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) 2211-C Priority Areas Ph.D. Scholarship Program and also thank the Turkish Higher Education Institution YÖK 100/ 2000 Ph.D. Scholarship Program.

References

- Appiah, W. A., Busk, J., Vegge, T., & Bhowmik, A. (2023). Electrochimica Acta Sensitivity analysis methodology for battery degradation models. *Electrochimica Acta*, 439(August 2022), 141430. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141430>
- Han, W., Altaf, F., Zou, C., & Wik, T. (2022). Sensitivity Analysis of the Battery System State of Power. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(1), 976–989. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3116658>
- Jocher, P., Roehrer, F., Rehm, M., Idrizi, T., Himmelreich, A., & Jossen, A. (2024). Scaling from cell to system: Comparing Lithium-ion and Sodium-ion technologies regarding inhomogeneous resistance and temperature in parallel configuration by sensitivity factors. *Journal of Energy Storage*, 98(PB), 112931. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112931>
- Lagnoni, M., Nicolella, C., & Bertei, A. (2021). Electrochimica Acta Survey and sensitivity analysis of critical parameters in lithium-ion battery thermo-electrochemical modeling. *Electrochimica Acta*, 394, 139098. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139098>
- Lai, Q., Jangra, S., Ahn, H. J., Kim, G., Joe, W. T., & Lin, X. (2019). Analytical Sensitivity Analysis for Battery Electrochemical Parameters. *2019 American Control Conference (ACC)*, 890–896.
- Li, W., Cao, D., Jöst, D., Ringbeck, F., Kuipers, M., Frie, F., & Uwe, D. (2020). Parameter sensitivity analysis of electrochemical model-based battery management systems for lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 269(May), 115104. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115104>
- Rahimi-eichi, H., Balagopal, B., Chow, M., & Yeo, T. (2013). Sensitivity Analysis of Lithium-Ion Battery Model to Battery Parameters. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 6794–6799. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700257>
- Vazquez-arenas, J., Gimenez, L. E., Fowler, M., Han, T., & Chen, S. (2014). A rapid estimation and sensitivity analysis of parameters describing the behavior of commercial Li-ion batteries including thermal analysis. *Energy Conversion and Management*, 87, 472–482. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.076>
- Zhang, L., Lyu, C., Hinds, G., Wang, L., Luo, W., & Zheng, J. (2014). Parameter Sensitivity Analysis of Cylindrical LiFePO₄ Battery Performance Using Multi-Physics Modeling. *161(5)*, 762–776.

<https://doi.org/10.1149/2.048405jes>

Zhang, R., Yang, S., Li, H., Zhai, T., & Li, H. (2022). Air sensitivity of electrode materials in Li/Na ion batteries: Issues and strategies. *InfoMat*, 4(6), 1–26. <https://doi.org/10.1002/inf2.12305>



PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS OF SPENT LUBE OIL FOR AUTOMOBILES AND ITS IMPACT ON ENERGY CONSUMPTION

^{1*}Fowotade, S. A., ²Umar, A. A., ³Murtala Y. D., ⁴Haruna D. A., & ⁵Hafsat, U. K.

^{1,3,4}Department of Science Laboratory Technology & ²Department of Polymer Technology, ⁵Department of Hospitality and Management, School of Science and Technology, Hussaini Adamu Federal Polytechnic, Kazaure, Nigeria.

Abstract

It is undoubted that engine is the most important and crucial operating mechanism in a car. In order to protect the engine of the car from breakdown and maintain its performance, the engine needs to be lubricated with the appropriate lubricant. A lubricant is a substance used to reduce friction between surfaces in mutual contact, which ultimately reduces the heat energy generated when the surfaces move. This lube oils help to reduce the heat energy dissipation in moving parts of motor engines. The study of spent automotive lubricating is important in order to predict the extent of usage, the length of usage and the possible physicochemical changes observable over the long time application of the oils. This work describes the physicochemical analysis of spent lubricating oil. A spent lube oil is that which is drained out of the automobile after covering a stipulated amount of distance. The process is referred to as servicing the engine. If this oil is not changed at the specified time the energy consumption of the automobiles may rise. The methods used include physical analysis comprising of density, viscosity, flash point and refractive index and chemical analysis using FTIR spectroscopy. The results show that density of spent lubricating oil is 0.8945, viscosity of spent lubricating oil is 82.5, refractive index of spent lubricating oil is 1.4800. FTIR spectroscopy shows the spectral of spent lubricating oils, and also the alterations in lubricating oil showing the soot and water present after being used. Generally, the prolong use of lubricating oil may increase the soot and water presence and cause the knockdown of engines.

Keywords: Spent lube oil, Lubricating oil, Friction, Automobile, Bond stretching, Heat energy

Introduction

Lubricant as a liquid introduced between two surfaces to reduce friction thereby leading to decrease in wear. More than 50 million tons of lubricants are consumed annually and 30% of lubricants by volume of hydraulic and transmission fluids are consumed (Nadkarni 2010). Lubricants are basically 90% base oil and less than 10% additives. Lubricating oil from petroleum fractions are mainly composed of paraffinic, naphthenic, and small amount of aromatic hydrocarbons while metallo-organic compounds are usually added as additives (Aucelio 2007). lubricating oil functions by preventing friction between sliding or rolling engine parts; protection of surfaces from corrosion, transportation of wear metal particles and contaminants as well as transfer of heat through the engine parts (Maten 2008). Anderau *et al.*, (2012) analyzed samples of new and old lubricating oils obtained from a customer using ICPOES (inductive coupled plasma optical emission spectrometry). They diluted the oil in 1:100 ratio (w/v) using deodorized kerosene and found that the values of wear metals in used oil are higher than those of new oil. They also indicated that some wear metals that were not in the new oil were found in the used oil. The focus of the present study is the spent lube oils. The physicochemical status of the spent lube oil should be unveiled to know the extent the oil had gone in reducing friction among moving components of automobiles and the resultant conservation of energy. The present study thus hopes to carry out physical tests such as viscosity, density, flash point, pH test and spot test and chemical tests using FTIR spectroscopy on spent lubricating oil with a view to assessing the energy implications of the lube oil.

Materials and Methods

Spent lubricating oil was gotten from Academic Staff Union of Polytechnic Van. A fresh lube oil was purchased from Amasco international limited, club road (Kano, Nigeria) in June 2021 and was drained from the vehicle in August 2021 after covering the required distance recommended by the manufacturing company

for its service. That is change of the lube oil for another new one. The drained oil from the vehicle is termed spent lube oil. Digital pH meter for measuring the acidity and alkalinity of the lube oil was bought from Mettler Toledo Pvt Ltd (Mumbai, India). Density bottle employed to measure the specific gravity of samples was purchased from Krish Scientific industries (Shakurpur, New Delhi, India). Blotting paper for conducting the spot test was sourced from Yashika Solutions (Madurai, India). Viscometer for measuring the viscosity was procured from J. T. Baker (Phillipsburg, New Jersey, USA) Closed cup apparatus for determining the flash point was purchased from A & D Company Ltd. (Tokyo, Japan) Fourier Transform Infra-red spectroscopy for the performance of chemical tests was acquired from Buck Scientific (East Norwalk, U.S.A.). Analytical weighing Balance for weighing out mass of samples accurately was purchased from Fluka (Durban, South Africa). All glasswares, plastic wares and ceramics wares used in the study were thoroughly washed, rinsed with de-ionized water, dried in oven and placed in the clean hood to avoid contamination.

Sampling and sample preparation

The drained lube oil sample from the ASUP van popular known as Tonga Cruise was emptied into a sterilized vessel and corked. It is then safely transported to the science laboratory technology complex of Hussaini Adamu Federal Polytechnic, Kazaure, Jigawa, Nigeria where the sample preparation was conducted. The sample of spent lube oil on arrival at the laboratory was received by senior technologist, Haruna D. Abubakar. The sample was placed in a desiccator awaiting the commencement of the tests. The samples were dispensed into eight (8) clean sterilized airtight vessels at known weight of 10g each. These vessels are labeled with respect to the test type. This action relatively minimizes the entry of contaminants into the sample.

Physical tests

The following physical tests were performed on the samples of spent lube oils using standard methods. pH test, viscosity test, spot test, flash point test, water crackle test, density and refractive index test.

Chemical test

FTIR Sample preparation

The IR sample is prepared by making a sandwich of the sample. A drop of the spent lubricating oil is placed on the face of a highly polished salt plate (such as NaCl, AgCl or KBr), then a second plate is placed over it so as to spread the liquid in a thin layer between the plates, and both plates are clamped together while wiping off any sample out of the edge of plate. The sample sandwich plate is then mounted onto the sample holder of the spectrometer to commence the analysis.

FTIR Technique

FTIR Analysis measures the infrared region of the electromagnetic radiation spectrum, which has a longer wavelength and a lower frequency than visible light, and is measurable in a sample when submitted to infrared radiation (IR). The basic theory at work is that the bonds between different elements absorb light at different frequencies. The samples absorbance of the infrared lights energy at various wavelengths is measured to determine the materials molecular composition and structure.

Results and Discussion

The results of the physical and chemical tests of the various samples of spent lube oil as contained in the airtight vessels are hereby presented. Following the presentation of the results is the a brief note discussing the outcomes.

Table 4 Physical parameters of spent lube oil

S/N	Parameter type	Quantity/Remark
1	Density	0.8945
2	Viscosity	82.5
3	Refractive index	1.4800
4	Flash point	98°C
5	pH	8.8
6	Water Crackle	Present

As shown in Table 4, the viscosity of the sample is . The value of sample viscosity is often affected by the presence of impurity. Nakom and Pongpan (2010) opined that the presence of impurity do lowers the viscosity of liquid samples. The value obtained in the present study is lower than that of neat lube oil of 89.4 (Isaiah and Fowotade, 2021). The impurities contained in the spent lubricant may be responsible for the reduction in its viscosity. The unprecedented high flash point (98⁰C) of the spent lube oil depicts the presence of contaminant in the sample. This result is supported by Sjoblom (2003) who posited that an increase in flash point of spent lubricant indicates contamination by dilution of lubricating oils with unburned fuel and present of water. The water crackle test however confirmed the presence of water as one of the impurities present in the sample of spent lube oil. Water is as a result of the product of combustion when the lube oil is in use. More water is being generated while the lube oil is running in the engine of the automobile. This implies that more heat energy is also produced as the lube oil thins out, the machine part of the engine contact each other to release more heat energy. If this process continues then engine may knock down. The incompressibility of water relative to oil can result in a loss of the hydrodynamic oil film that in turn leads to excessive wear. The excessive wear degenerated to loss of heat energy.

The specific gravity of spent lube oil is 0.8945. This value is lower than the value of neat lube oil reported by Isaiah and Fowotade, (2021). This implies that the spent lube oil is lighter due to the presence of impurity majorly water. Since the lube oils are primarily products of hydrocarbons. Their combustion products on combining with oxygen often yield water. The high refractive index of the spent lube oil suggests that the sample picked up the refractive index of the impurities from its interaction with engine parts of the automobiles.

Table 5 Spot test on spent lube oil

S/N	Observed parameters	Remark
1	Area of spot	4.913
2	Area of diffuse zone	27.354
3	Colour of spot	Gray
4	Colour of diffuse zone	Gray
5	Density	Opaque

As displayed in Table 5 the spent lubricating oil covers larger area of spot and area of diffusion than the neat oil as reported by Isaiah and Fowotade, (2021), This may be owing to the soot present in spent lube oil. The spot and diffuse area of spent oil appears gray and its density is opaque, while neat oil spot and diffuse area appears colourless and density of translucent (Isaiah and Fowotade, 2021).

Table 6 FTIR results of spent Lubricating oil

S/N	Frequency Range of Signal on the Correlation Table (cm ⁻¹)	Absorption Frequency on the FTIR Spectral (cm ⁻¹)	Appearance	Functional Group Present
1	3880-3480	3651	Weak	N-H Stretching
2	3200-2400	2955	Strong	C-H Stretching
3	3200-2400	2921	Strong	C-H Stretching
4	3200-2400	2854	Strong	C-H Stretching
5	1540-1470	1462	Strong	N-O Binding in Nitro compound
6	1380	1380	Medium	N-O Binding in Nitro compound
7	1160-1150	1160	Medium	S-O Stretching
8	860-800	862	Weak	O-H in Glycerol
9	740-600	728	Medium	N-H Wagging

The FTIR results of the spent lube oil are displayed in Table 6. Strong stretchings of C-H bond were evident in the range 2955 – 2854 cm⁻¹ and N-O (1462 cm⁻¹). Weak stretching of N-H and O-H was also observed in the sample. Medium stretchings are unveiled for S-O (1160 cm⁻¹) and N-O (1380 cm⁻¹). The medium wagging of N-H (728 cm⁻¹) is present as well. These outcomes portray the fact that the lubricants are oxygenated, nitrogen and sulphur containing compounds. Oxygenation of lubricating oil increases its viscosity. Glycol will interfere with the quantification of the water level when present, but the converse is not true. Therefore, when glycol is present, water cannot be reliably quantified using FT-IR. This is not considered a problem because the presence of glycol has a greater significance to engine performance. Water content of the spent oil was confirmed by the crackle test. C-N Stretching at 1704 cm⁻¹ was also absent in the FTIR spectra of the spent oil which is due to degradation. The S-O Stretching at 1160 cm⁻¹ is the result of sulfate compounds as well as overlap with oxidation products. Sulfate material is a result of the introduction of sulfur from fuels or from the oxidation of sulfur from the base oil and additives. This band is a fairly specific measure of over basing additive consumption and relates to total base number (TBN).

There is a shift in the baseline of the spectrum which is associated with suspended soot as a result of incomplete combustion of fuel which could be indicative of carburetor or injector problems with other fuel systems. While it has no specific frequency of absorption in the infrared spectrum, soot causes a shift in the baseline of the spectrum due to absorption and scattering of light. Since there are no other spectral features in the region around 2000 cm⁻¹, this area is used to assess the level of soot in a sample. The baseline shift caused by soot is affected by the amount of soot present and the effective particle size. The effective particle size is a resultant of the nature of the combustion system and the dispersants in the oil.

The spent oil sample is an embodiment of the energy conservation fluid in automobile engines. This is evident in the just concluded study of the physicochemical parametric assay of the spent lube oil. The essence of lube oil in automobile engines is to reduce wear and tear processes orchestrated by frictional forces. This wear and tear process gives rise to energy loss in the form of heat dissipation from the engines. The spent oil is thus a sure indicator of the commencement of heat energy loss from the engine. In a nut shell, to avoid knock in the engines periodic replacement of the used lube oil should never be compromised.

Conclusion

The study has successfully carried out physical and chemical tests on spent lube oil. The results obtained from the analysis are presented and discussed. The users of automobiles are advised to religiously comply with the ethics of servicing the engine as at when due to avoid knock. Unnecessary, dissipation of heat energy is abated via prompt replacement of used lube oil. The spent oil is no doubt an indicator of energy conservation property of neat lube oil.

References

- Anderau C, Fredeen K, Thomsen MY, Yoles D (2012) Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA
- Aucélio RQ, de Souza RM, de Campos RC, Miekeley N, da Silveira CLP (2007) The Determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 62, 952-961
- Isaiah S. J. and Fowotade, S.A. (2021) Physicochemical properties of neat and spent Lubricating oils of automobiles Unpublished HND project work, Science Laboratory Technology Department, Hussaini Adamu federal Polytechnic, kazaure 23 - 56
- Nadkarni R. A., (2010) Modern instrumental methods of analysis of petroleum products and lubricants. ASTM International, New Orleans, 154 pp
- Nakorn, T., Pongpan, S., (2010). Assessment of lubricating oil degradation in small motorcycle engine fueled with gasohol. *International Journal of Science and Technology*, 2, p. 201-209.
- Maten T van der (2008) X-Ray fluorescence analysis of additives and wear metals in used lubricating oils. *Analytical Instrumentation*, pp 70-71. Available online: www.petro-online.com
- Sjoblom, J., Aske, N., Harald Auflem, I., Brandal, O., Erik Havre, T., Saether, O., Westvik, A., Eng Johnsen, E. and Kallevik, H. (2003). Our Current Understanding of Water-in-Crude Oil Emulsions. Recent characterization techniques and high pressure performance. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100–102: 399–473

RELIABILITY ENHANCEMENT OF POWER SYSTEM USING PHASOR MEASUREMENT UNITS**Mrutyunjaya MUDULI**

PwC Acceleration Center, Bangalore, India

Kunjabihari SWAIN

NIST University, Berhampur, India

Murthy CHERUKURI

NIST University, Berhampur, India

Abstract

The phasor measurement units (PMUs) which are one of the important components of smart grid are playing a vital role for increasing the reliability of power system by enhancing the operation time and decreasing the failure time. This paper provides a description of the fault diagnosis of the individual power system components such as generator, transformer, transmission line and circuit breaker with the help of synchrophasor measurements obtained from PMUs. A mathematical model representing the two state and multi-state Markov model of the individual components of the power system considered has been formulated. Additionally, the situational awareness of the system is quantified through the indices such as observability reliability (OR) and loss of data expectation (LODE) with PMU based monitoring.

Keywords: Phasor Measurement Unit, Situational Awareness, Power System Reliability, Markov Model, Real-Time Monitoring.

Introduction

The demanding need to modernize the grid and make it smart enabled a number of technological innovations in the field of information and communication technology (ICT). This has consequently led to strengthen the power system reliability. Traditionally, the power system is monitored using supervisory control and data acquisition (SCADA) with its inherent limitations. These limitations were overcome by monitoring the system with the help of synchronized phasor measurements derived from PMUs. In spite of technological advancement in the field of power system, still the electrical disturbances do occur and even sometimes it can endanger the life of a person and greatly affects the economy of the country. So, there is a great need to protect the power system. Recent blackouts such as North-Eastern blackout of USA 2003 (Force, 2004), the UCTE system disturbance of 2006, Indian blackout of 2012 confirms that inefficiencies of the equipment, ICT infrastructure as well as human errors caused very weighty impact on these blackouts. Inadequate situational awareness has been pictured as a significant reason of the above large blackouts during the recent years (Panteli et al., 2013). Situational awareness is a major agent in consolidating the security of power system, because it empowers the operators to react and take well timed efficient decisions against any incident. Therefore, to handle the power system in a safe and secured manner, the continuous assessment of system components along with the system as a whole is crucial. The wide-ranging growth of power grids has forced for secured, robust and reliable monitoring methods operating in the concept of wide area measurement system (WAMS). PMUs play an essential role in WAMS. PMUs provide synchronized measurements (synchronization obtained from GPS signals) of current and voltage phasors. This ability of a PMU to produce synchrophasors can enhance the reliability of the power system. The reliability of system, on the other hand, can be assessed with the use of Markov model and plays a great role in analyzing even the unpredictable nature of faults.

Materials and Methods

A lot of research has been done in finding the reliability of PMU considering several constraints. Reference (Aminifar et al., 2014 and Mohanta et al., 2016) provides a comprehensive review of the articles in the area of

synchrophasor measurements and evaluating the reliability of PMU. Reference (Falahati et al., 2013) presented a brief mathematical formulation of the power system using Markov model incorporating the presence of smart monitoring device. Reference (Phadke et al., 2008) emphasizes on PMU and WAMS technology and describes the usage of measurement of phasors for enhanced monitoring, protection and control of power systems.

The power system with the PMUs has multi-state operation modes. This paper proposes multistate Markov model for individual components of a power system such as generator, transformer, circuit breaker, transmission line and are being monitored by the PMUs to evaluate the reliability of individual components as well as reliability of the whole system in terms of the basic reliability indices such as availability, unavailability considering a specific number of derating states of components. The unique contributions of this paper are given as follows:

- (i) Determination of respective derated states of each component using PMU
- (ii) Establishes two stage as well as multistage Markov model for every component using the derated states obtained.
- (iii) Defines the mode of system failure, or defines the criterion for normal and faulty systems.
- (iv) Quantifies observability reliability and loss of data expectation of the power system when PMU fails.

Findings and Discussion

Situational Awareness and Markov Model: A Brief Overview: The synchronized phasor measurements derived from PMU make them very unique from situational awareness perspective. Firstly, PMUs provide measurements at a very high rate i.e., typically 30-60 samples per second. Secondly, PMUs gives voltage and current phase angles directly without necessitating state estimation. Fig. 1 below shows the functional block diagram of PMU and its detailed operation is given in (Phadke et al., 2008).

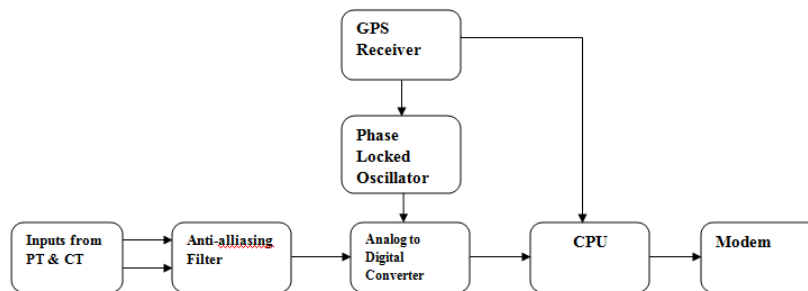


Figure 1. Functional block diagram of PMU

The persistent monitoring of grid to record, measure and process continually varying grid vitals for better understanding of grid operation is called situational awareness. Given the unique role of PMU in providing real time situational awareness of the system, failure of PMU leads to unobservability and make the task of the operator's tough to make decisions. Therefore, some basic situational awareness indices such as observability reliability (OR) and loss of data expectation (LODE) have been proposed to quantify the expectation of losing data due to PMU outage.

$$OR = \sum_k P_k \cdot \text{Obs}_k \quad (1)$$

$$LODE = 1 - OR \quad (2)$$

where k is number of states, P_k is the probability of system k , Obs_k is the observability of the power system in system k which equals the number of observable buses in system state k divided by total number of buses.

The basic principle of Markov approach is that, the transition of a system from one state to another can occur whenever it undergoes a failure or repair state characterized by definite reliability data i.e. failure rate (λ) or repair rate (μ). When a component of a system fails, it will not directly enter into failure state. In this paper, a

Markov model has been used to represent those intermediate states with the help of PMU monitoring. The following Fig. 2 shows Markov model for a typical component in the system without and with PMU.

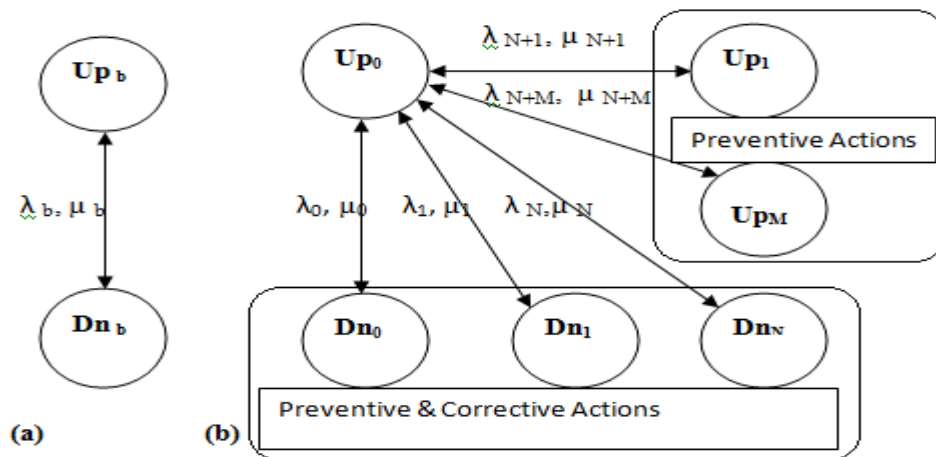


Figure 2. (a) Two state Markov model without PMU and (b) Multi state Markov model with PMU

From the Fig. 2(a), it can be observed that there are only two states namely UP state and DOWN state. Figure 2(b) shows that by placing PMU, several new states (intermediate states/derated states) can be conceived (Allan and Billinton, 1985 and Allan and Billinton, 1996). PMUs greatly impact the preventive and corrective measures of the component in the system, which are in turn responsible for creation of derating states in exhausted equipment's using a set of mandatory actions. A preventive action is capable of producing both prevented UP state or prevented DOWN state by decreasing failure rate or increasing repair rate respectively. On the other hand, a corrective action can create a DOWN state with short repair time (Falahati et al., 2013). Fig. 2(b) shows a multi-stage Markov model of a system component after being monitored using PMU where Dn_b is again divided into Dn_0 - Dn_N & Up_1 - Up_M . Dn_0 is considered to be an unmonitored state responsible for de-energization of system components. So monitoring degree (total number of new states after being monitored) is $N+M$. Dn_1 - Dn_N are new down states, whereas Up_1 - Up_M are new up states.

Role of PMU in Fault Detection of Power System Components: The proposed system considered in this paper is shown in Fig. 3. It consists of generator, transformer, circuit breaker and transmission line. A brief account of faults and failure statistics of generator is presented in (Sumereder, 2018, Papadopoulos et al., and Stone et al.). The basic causes for failure of generation system are thermal stress (highest and lowest temperature, overload), electrical stress (surges, over voltages, partial discharge (PD)), ambient stress (reactive chemicals, aggressive particles, contamination), mechanical stress (vibration, oscillation in slot sections and in end winding). Some common but hazardous generator faults include rotor earth faults (10%), bearing failures (41%) and stator winding failures (37%). Rotor winding damage is frequently, mainly on turbo generators where rotor winding insulation is fairly stressed and effected by centrifugal forces. The first rotor ground fault causes just a little fault current, although it stresses the insulation in portions of the winding where the fault is. The real danger is the second ground fault which can cause significant impact. During second ground fault, it can draw large currents which may cause extensive damage to rotor winding and armature (Eleschova et al., 2005). Therefore, there is a need to detect the first ground fault. When first ground fault occurs, then a small amount of fault current flows through the field winding. PMU is capable of detecting this kind of fault current on the basis of real-time measurement and it alerts the operator. A fault in shaft bearing distorts the electro-mechanical symmetry of the generator, causing both static as well as dynamic deviations to the air-gap of the generator compared to normal conditions. The mechanical nature of a bearing fault yields predictable frequencies in the machine vibration spectrum which can be indicative to the bearing geometry and fault location (Damian S et al., 2013). Using PMU, the vibrational signals can be detected to ensure bearing failure by analyzing the signal (Savvatin, 2017). High amount of economic loss is felt due to forced outage of generator caused due to stator winding failure due to its high repairing cost and obstruction in production (Kong et al., 2015). The negative influence of transient voltage conditions on the winding life can be observed using PMU. Power transformers have vital use in transmission of generated power to long distances with least possible losses. The various means of transformer failure include failure in insulation, manufacturing errors,

contaminated oil, moisture, overloading, line surge, and some other natural and man-made causes (Tang et al., 2014). Two of the most common type of transformer failures include failure of OLTC (On load tap changer) (31%) and temperature increase of winding and oil (55%) (Picher et al., 2012 and Bartley, 2003). A series of mechanical and electrical events lead to several vibration and noise patterns during the tap changing process. As all contacts are caged in oil filled steel tank, an onlinemonitoring of the OLTCs using PMU can be done as a means to detect the vibration signals from a tap-changer process (Kandagal et al., 2016 and Charles et al., 2016).

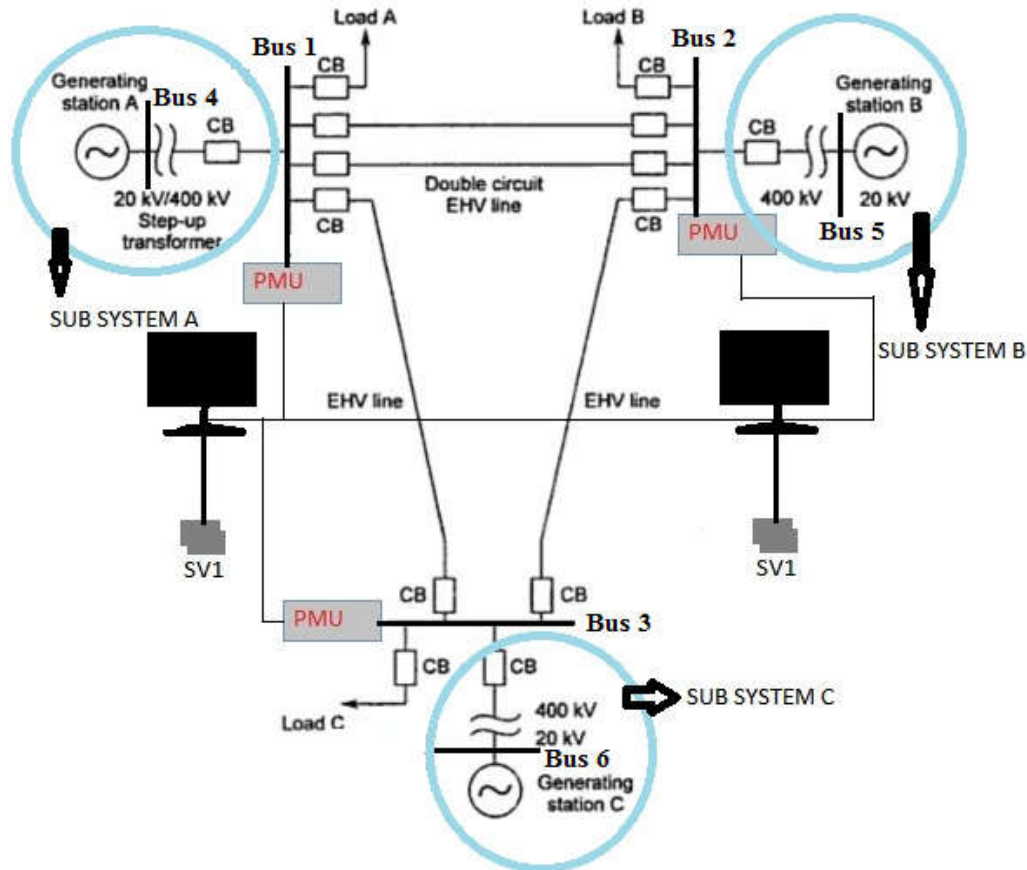


Figure 3. A Typical Power System with PMUs

The winding temperature is non-uniform and high temperature of the hot spot causes rapid ageing of insulation and can lead to premature-failure of transformer. Overload current can be defined as the current flowing through the transformer resulted from the power system faults, which mainly causes winding temperature rise. This fault current appears for a very short duration (Patil et al., 2017). So, it requires real-time monitoring to get detected by the monitoring device which is easily possible by PMU based monitoring. Similarly, temperature increase in oil results in short circuit can be detected by PMU. The various factors affecting health of circuit breakers include quality of equipment, operations like load-stress, maintenance, environmental elements such as temperature, moisture and pollution. Two main types of circuit breaker failure includes insulation failure (55%) and mechanical failure (17%) (Suwanasri et al., 2014 and IEEE Transactions on Industry Applications, 1974). Mechanical faults of high voltage circuit breakers (HVCB), mechanical operation mechanism are the major reasons for HVCBs faults (Huang et al., 2016). The closing or opening operation of the HV circuit breakers produces mechanical vibration which contains a large amount of equipment condition information (Zhang, 2017). The PMU helps in monitoring operational vibration signal. Insulation failure of circuit breaker is generally caused by breakdown of insulating medium leading to flow of current even when the circuit breaker is in tripped condition. This current can be easily detected by placement of PMU. Most basic types of transmission line faults include single line to ground faults (78%), line to line faults(11%), two lines to ground faults(4%), three phase faults (3%) (Wang, 2017). These type of faults can

be easily depicted by observing the phase and line currents which is an easy task for PMU based monitoring system (Davis, 2012).

Proposed Methodology And Case Study: Situational awareness indices,

$$OR = \sum_k P_k Obs_k \quad (1)$$

$$LODE = 1 - OR \quad (2)$$

Where k is number of states.

The relationship between the failure rate, repair rate, MMTF and MTTR is given as follows.

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4)$$

The repair rates $\mu_1 - \mu_{N+M}$ are greater than repair rate of unmonitored components μ_b as the repair time of new states are less than the original repair time in case of preventive and corrective actions.

$$\mu_b \leq \mu_i, 1 \leq i \leq N \quad (5)$$

The failure rate of the equipment without monitoring λ_b is equal to its total departing transition rates with monitoring (λ_0 to λ_{M+N}).

$$\lambda_b = \sum_{i=0}^{N+M} \lambda_i \quad (6)$$

Basically, the impact of unpredicted failure of components is equal to component failure without monitoring.

$$\mu_0 \leq \mu_b \quad (7)$$

The availability and unavailability of the individual components are calculated using the following equations (Falhati et al., 2013).

$$Availability (A) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (8)$$

$$Unavailability (U) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} = 1 - A \quad (9)$$

Availability of unmonitored components,

$$A_b = \frac{\mu_b}{\mu_b + \lambda_b} \quad (10)$$

Availability of a component after being monitored,

$$A' = \frac{1 + \sum_{i=1}^{N+M} \frac{\lambda_{N+i}}{\mu_{N+i}}}{1 + \sum_{i=0}^{N+M} \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (11)$$

Equivalent failure rate of component with monitoring,

$$\lambda_{MI} = \sum_{i=0}^n \lambda_i \quad (12)$$

The general equation for the availability of equivalent two state components with monitoring,

$$A' = \frac{\mu_{MI}}{\lambda_{MI} + \mu_{MI}} \quad (13)$$

So the equivalent repair rate with monitoring equals to,

$$\mu_{MI} = \frac{\lambda_{MI} \times A'}{1 - A'} \quad (14)$$

The failure rate decrement,

$$k_{\lambda} = \frac{\lambda_{MI}}{\lambda_b} \tag{15}$$

The repair rate increment,

$$k_{\mu} = \frac{\mu_{MI}}{\mu_b} \tag{16}$$

The maximum benefits of PMU based monitoring can only be obtained if the monitoring device i.e., the PMU is reliable. So availability of PMU should be considered in order to account monitoring system failure.

Consider A_C & U_C be availability and unavailability of PMU.

$$A^* = \frac{\mu_b}{(\mu_b + \lambda_b)} U_C + \frac{\mu_{MI}}{(\mu_{MI} + \lambda_{MI})} A_C \tag{17}$$

But $U_C = 1 - A_C$

$$A_C = \frac{[(\mu_b + \lambda_b)A^* - \mu_b] (\mu_{MI} + \lambda_{MI})}{\mu_{MI}(\mu_b + \lambda_b) - \mu_b (\mu_{MI} + \lambda_{MI})} \tag{18}$$

Availability & unavailability of components in series (when failure of one component results in system failure,

$$A_{series} = \prod_i A_i \tag{19}$$

$$U_{series} = 1 - A_{series} \tag{20}$$

Unavailability & availability of components in parallel (i.e., when failure of each and every component simultaneously results in system failure),

$$A_{parallel} = \sum_i A_i \tag{21}$$

$$U_{parallel} = 1 - A_{parallel} \tag{22}$$

Case Study: In this section, a typical power system consisting of generator, transformer, circuit breaker and transmission line is provided. A two state as well as multi-state Markov model has been obtained for each component to show the states of components without and with PMU monitoring respectively. The availability and unavailability of individual component is calculated with and without PMU monitoring. PMU yields two considerable outcomes for every system component - (i) fault detection ahead of cascading failures and persistent outages (ii) Replacing timely maintenance with PMU based real-time monitoring.

Markov Model for Generator: In case of generator, rotor earth fault, bearing failures and stator winding failures are regarded as Dn_1 , Up_1 , Up_2 states respectively (Eleschova et al., 2005 and Kong et al., 2015). The Markov model for generator is shown in Fig. 4.

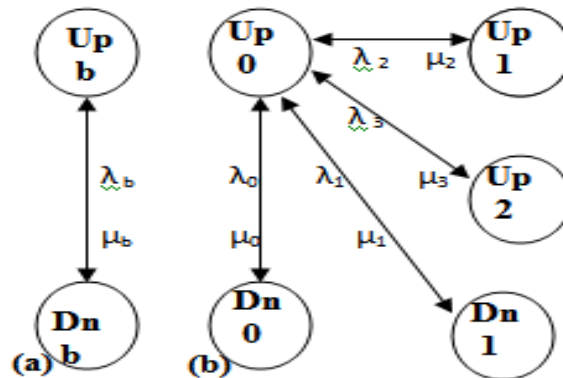


Figure 4. Markov model for generator (a) without (b) with monitoring by PMU

Markov Model for Transformer: For transformer, failure of OLTC and temperature increase of winding and oil are regarded as Dn_1 & Up_1 states respectively (Charles et al., 2016). Markov model for transformer is shown in Fig. 5.

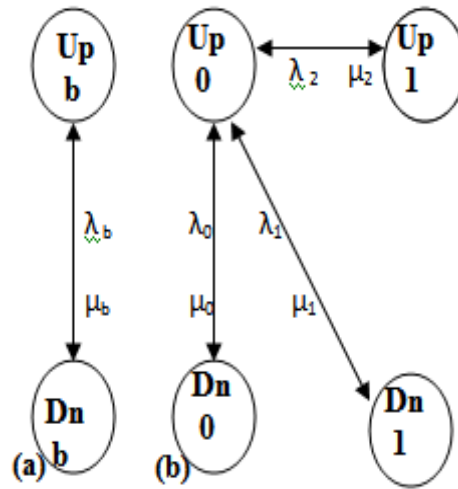


Figure 5. Markov model for transformer (i) without PMU (ii) with PMU

Markov Model for Circuit Breaker: In case of circuit breaker, insulation failure and mechanical failure are considered as Dn_1 & Dn_2 respectively (Huang et al., 2016). The Markov model defining various states of a high voltage circuit breaker is shown in Fig. 6.

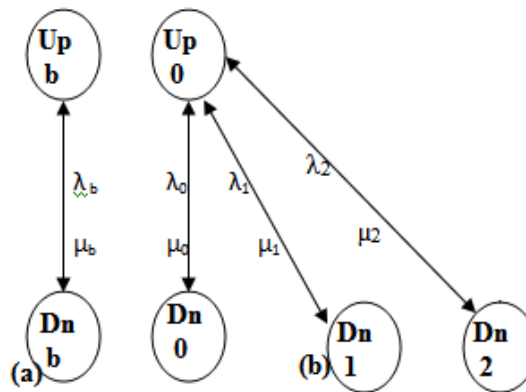


Figure 6. Markov model for High voltage Circuit breakers (i) without PMU (ii) with PMU

Markov Model for Transmission Line: For overhead transmission lines, Dn_1 , Up_1 , Up_2 , Up_3 states are assigned to three phase faults, single line to ground faults, two lines to ground faults, line to line faults respectively (Wang, 2017 and Davis, 2012). The Markov model defining various states of transmission line is shown in Fig. 7.

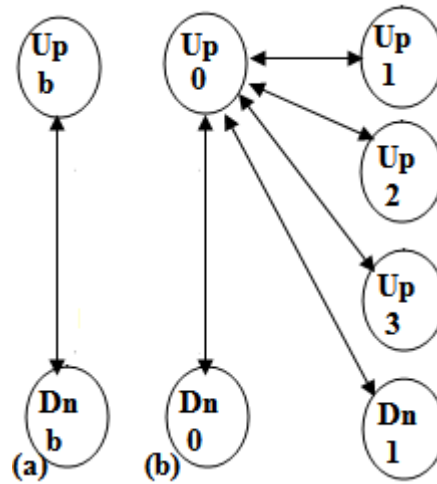


Figure 7. Markov model for overhead transmission line (a) without PMU (b) with PMU

Table-1. Reliability data of the components

Parameters (G)	Value	Parameters (Transformer)	Value
λ_0	0.02004	λ_0	0.0032
λ_1	0.01670	λ_1	0.0071
λ_2	0.06847	λ_2	0.0127
λ_3	0.06179	μ_0	73
μ_0	268	μ_1	730
μ_1	670	μ_2	730
μ_2	1340	MTTF	42 years
μ_3	2680	MTTR	120 hours
MTTF	6 years		
MTTR	32.7 hours		
Parameters (CB)	Value	Parameters (TLine)	Value
λ_0	0.045	λ_0	0.0056
λ_1	0.092	λ_1	0.0042
λ_2	0.030	λ_2	0.1092
μ_0	162	λ_3	0.0056
μ_1	810	λ_4	0.0154
μ_2	1620	μ_0	267
MTTF	6 years	μ_1	667.5
MTTR	54 hours	μ_2	1335
		μ_3	1335
		μ_4	1335
		MTTF	7 years
		MTTR	32.8 hours

(The units of λ and μ are occurrences/year)

Here four parameters related to each component associated with the given system are taken as inputs for the proposed methodology i.e., failure rate, repair rate, mean time to failure and mean time to repair. Table-1 shows reliability data of all the power system components.

Table-2. Availability & unavailability of each system component before and after monitoring

Component	States	λ_b	μ_b	With PMU Monitoring		Without PMU monitoring		With PMU monitoring		λ_{MI}	μ_{MI}	K_λ	K_μ
				$(A')_{st}$	$(U')_{st}$	$(A_b)_{com}$	$(U_b)_{com}$	$(A')_{com}$	$(U')_{com}$				
Generator	Dn ₀	0.1	26	0.99992	0.00007	0.99936	0.00063	0.99990	0.00009	0.36	368.	0.	1.3
				523	477	5711	4289	0317	9683				
	Dn ₁			0.99997	0.00002								
				507	493								
Up ₁				0.99994	0.00005								
				891	109								
Up ₂				0.99997	0.00002								
				694	306								
Transformer	Dn ₀	0.0	73	0.99995	0.00004	0.99968	0.00031	0.99994	0.00005	0.01	192.	0.	2.6
				616	384	503	497	644	356				
	Dn ₁			0.99999	0.00000								
				027	973								
Up ₁				0.99998	0.00001								
				260	740								
Circuit Breaker	Dn ₀	0.1	16	0.99972	0.00027	0.99897	0.00102	0.99959	0.00040	0.16	407.	1	2.5
				229	771	019	980	029	971				
	Dn ₁			0.99988	0.00011								
				643	357								
Dn ₂			0.99998	0.00001									
			148	852									
Transmission Line	Dn ₀	0.1	26	0.99997	0.00002	0.99947	0.00052	0.99997	0.00002	0.00	359.	0.	1.3
				920	098	593	407	274	726				
	Dn ₁			0.99999	0.00000								
				370	630								
	Up ₁				0.99991	0.00008							
					820	180							
Up ₂				0.99999	0.00000								
				580	420								
Up ₃				0.99998	0.00001								
				846	154								

Table-3. Availability & Unavailability of each sub-system

Sub-system	Without PMU Monitoring		With PMU Monitoring	
	A_b	U_b	A'	U'
A	0.99802210	0.00197790	0.99943712	0.00056288
B	0.99802210	0.00197790	0.99943712	0.00056288
C	0.99802210	0.00197790	0.99943712	0.00056288

Table-4. Probability and Observability of PMU outage

States	P_k	Obs_k
No Outage	$(0.983)^3$	1
PMU 1 Out	$(0.983)^2 \times (0.017)$	5/6
PMU 2 Out	$(0.983)^2 \times (0.017)$	5/6
PMU 3 Out	$(0.983)^2 \times (0.017)$	5/6
PMUs 1,2 Out	$(0.983) \times (0.017)^2$	4/6
PMUs 2,3 Out	$(0.983) \times (0.017)^2$	4/6
PMUs 3,1 Out	$(0.983) \times (0.017)^2$	4/6
All Three PMUs Out	$(0.017)^3$	0

From equations (1) & (2), the two SA indices are found to be

OR=0.9914975435

LODE=0.0085024565

Results and Discussion: Table-2 shows the availability and unavailability of each component of the given system without and with PMU based monitoring system. The equivalent failure rate as well as equivalent repair rate has been calculated according to equations (12) and (14) respectively. For example, in case of generator, the failure rate without monitoring is 0.167 occ/yr and with PMU based monitoring it is reduced to 0.03674 occ/yr. Also the repair rate with monitoring (368.53 occ/yr) has increased than that of without monitoring (268 occ/yr). The same thing can be observed from each component with the use of PMU based monitoring system along with improvement of availability of system components as shown in Table 2. Table 3 shows the availability and unavailability of the three subsystems considered in our case. For example, in subsystem-A, the availability with PMU based monitoring (0.99943712) is increasing than that of without monitoring (0.99802210). Hence, the unavailability of subsystem-A is decreasing with PMU based monitoring system. The same is true for remaining subsystem-B and subsystem-C. Probability of all the possible situations of PMU outage in the system has been calculated and observability associated with each situation in terms of PMU outage has been addressed in Table 4. Finally, two situational awareness indices i.e., observability reliability and loss of data expectation has been calculated to prove the enhancement of reliability of monitoring system (PMU based synchrophasor monitoring system) and the SA of the power system using PMU based monitoring system.

Conclusions: PMU provides GPS time stamped phasor data due to which it is regarded as a vital tool in WAMS for adequate situational awareness. The focus of this paper is on the real-time monitoring, fault detection of the modern power system grids using resilient synchrophasor networks (PMUs). Multi-stage Markov chain models were provided for each component in order to model the reliability of individual components along with the whole system. A mathematical formulation has been proposed in this paper to evaluate the reliability and situational awareness indices (OR & LODE) to ensure the enhancement of situational awareness using PMUs.

REFERENCES

- Force, U.S.-C.P.S.O.T. (2004), *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations.*, April 2004.
- Mathaios Panteli, Peter A. Crossley, Daniel S. Kirschen, Dejan J. Sobajic (2013), *Assessing the impact of Insufficient Situation Awareness on Power System Operation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 3, pp. 2967-2977, 2013.
- Farrokh Aminifar, M F Firuzabad, Amir Safdarian, Ali Davoudi, Mohammad Shahidehpour (2014), *Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art*, IEEE Access, Vol. 2, pp. 1607-1628, 2014.
- D K Mohanta, Cherukuri Murthy, and Diptendu Sinha Roy (2016), *A Brief Review of Phasor Measurement Units as Sensors for Smart Grid. Electric Power Components and Systems*, Vol. 44, No. 4, 411-425, pp. 2016.
- B. Falahati, Y. Fu and M. J. Mousavi (2013), *Reliability Modeling and Evaluation of Power Systems with Smart Monitoring*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 1087-1095, June 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2240023.
- A G Phadke, J S Thorpe (2008), *Synchrponized Phasor Measurements and Its Applications*, Springer, 2008, ISBN 978-0-387-76537-2.
- R N Allan, Roy Billinton (1985), *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, 1985.
- R N Allan, Roy Billinton (1996), *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, 1996.
- C. Sumereder (2018), *Statistical Lifetime of Hydro Generators & Failure Analysis*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, July 2018.
- M. Papadopoulos, N.Boulaxis, D. Tsanakas, A. Safakas, *Failure Analysis of A 360 Mw Power Unit Generator*, <http://www.cigre.org>.
- Greg C Stone, Edward A Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani, *Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Ageing, Testing & Repair*, IEEE Press.

- Z. Eleschova, A. Belan, D. Gasparovsky (2005), *Rotor Ground Fault Protection Of Generator With Static Excitation System*, Теоретична Електротехніка Electrical Engineering, 2005(58): p. 138-146.
- Damian S. Vilchis-Rodriguez, Sinisa Djurovic, Alexander C. Smith (2013), *Wound Rotor Induction Generator Bearing Fault Modelling and Detection Using Stator Current Analysis*, IET Renewable Power Generation, Vol. 7, No. 4, pp. 330-340, 2013.
- M. Savvatin (2017), *Localisation Sources for Low Frequency Oscillations with Different Origin on Synchronized Vector Measurements*, 2017 International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing (ICIEAM), IEEE, 2017.
- Tae-Sik Kong, H.D. Kim, Tae-Sung Park, Kyeong-Yeol Kim, Ho-Yol Kim (2015), *Analysis of Partial Discharge Patterns for Generator Stator Windings*, American Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 17-22, 2015.
- Shenseng Tang, Clay Hale, Hardik Thaker (2014), *Reliability Modelling of Power Transformers with Maintenance Outage Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, pp. 316-324, 2014.
- P. Picher, S. Riendeau, M. Gauvin, F. Léonard, L. Dupont, J. Goulet, C. Rajotte (2012), *New Technologies For Monitoring Transformer Tap-Changers And Bushings And Their Integration Into A Modern IT Infrastructure*, CIGRE 2012, <http://www.cigre.org>, 2012.
- William H. Bartley (2003), *An Analysis of Transformer Failures: Part I*, International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm, 2003, The Locomotive <http://www.hsb.com/TheLocomotive>, Vol. 73, No. 2, pp 1–8, 2003.
- Kandagal S. S, Santhoshkumar G.M., and J.G. Shivanagutti (2016), *On-load Tap Changer Fault Diagnosis and Maintenance of 100 MVA Power Transformer*, National Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (NCETET 2016), January 2016, p.570-572.
- Adeyemi Charles, Adewole1, Raynitchka, Alexander, Apostolov (2016), *Real-Time Underload Tap-Changer Control Based on Synchrophasor Measurements* Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique, Vol. 61, No. 4, pp. 343-348, 2016.
- R.V. Patil, Dhiraj Kalantre, Niranjana Hirugade, Arun More, Ashwinee Kakade (2017), *Transformer Health Monitoring & Control Through Arduino*, International Journal of Electrical, Electronics & Data Communication, Vol. 5, No. 1, Jan. 2017.
- Thanapong Suwanasri, May Thandar Hlaing and Cattareeya Suwanasri. (2014), *Failure Rate Analysis of Power Circuit Breaker in High Voltage Substation*, GMSARN International Journal, 2014. 8: pp. 1 – 6.
- An IEEE Survey of Electrical Equipment Reliability in Industrial Plant*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 10, No. 2, pp. 213-235, 1974.
- Nantian Huang, H.C., Shuxin Zhang, Guowei Cai, Weiguo Li, Dianguo Xu and Lihua Fang (2016), *Mechanical Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breakers Based on Wavelet Time-Frequency Entropy and One-Class Support Vector Machine*, Entropy 2016, www.mdpi.com/journal/entropy, Vol. 18, No. 7, 2016.
- Beining Zhang (2017), *Mechanical Fault Diagnosis for HV Circuit Breaker with Operational Vibration Signal*, International Journal of Advanced Computer Technology (IJACT), Vol.6, No. 5, 2017.
- Li Wang (2017), *The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network*, MATEC Web of Conferences 61, 2017 (2016) ,DOI: 10.1051/mateconf/2016610.
- W.P. Davis (2012), *Analysis of Faults in Overhead Transmission Lines*, MS Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, California State University, Sacramento, 2012.

COMPARATIVE PRODUCTION OF BIOGAS FROM COW DUNG AND POULTRY DROPPINGS**Daikwo S.^a, Amuna O.T.^b, Simon V.O.^c, Akowe N.A.^d**^a Department of Biology, Federal University Lokoja, Nigeria^bDepartment of Biology, Federal University Lokoja, Nigeria^cDepartment of Biology, Federal University Lokoja, Nigeria^dDepartment of Chemistry, Federal University Lokoja, Nigeria**Abstract**

The study was conducted to determine the comparative production of biogas from cow dung and poultry droppings. Biogas yield from chicken droppings and cow dung was measured for a period of 21 days in the uncontrolled ambient conditions and the cumulative amount of biogas production from the chicken droppings for the 21 days period was 0.1 kg while that of the cow dung was 0.12 kg. The result, biogas yield was observed for 21 days, The chicken droppings started yielding from the ninth day of digestion. The yield continued to grow until the twelfth day when a decrease in gas yield was observed and the decrease continued until the thirteenth day when gas production was observed to cease. The decrease in biogas production could be as a result of the unregulated temperature and non interval agitation of the substrates. The low yield of biogas from the chicken droppings could be as a result of high pH value of 9.38 as measured at the commencement of the experiment. A pH value of between 7.0 to 7.2 has been observed to be the most ideal for optimal biogas yield. Gas yield was also observed to increase from the eighteenth day.

This could be as a result that it takes about 21 days for complete digestion of Chicken droppings. There was no gas yield for the Cow dung for the first six days; it was on the seventh day that gas yield was observed for the cow dung, this could be as a result that biogas production rate in batch condition is directly equal to specific growth of methanogenic bacteria. The yield peaked on the eleventh day and started dropping until the sixteenth day when an increment was observed. The highest biogas yield on the eighteenth day was in agreement with the findings of. The gas yield continued till the 21st day when the gas yield ceased completely. However, gas yield from the cow dung was observed and measured. Developing countries like Nigeria face dilemma regarding environment protection due to their heavy dependency on biomass and fossil fuel and to save the environment from further deterioration and also supplement the energy needs of the natural populace it is therefore important to develop a strategy incorporating local resources and technology as biogas technology can be effectively utilized.

1. Introduction

The utilization of renewable feedstocks, such as animal manure, crop residues, and food wastes, for biogas production holds significant potential in developing countries. This approach not only presents an economically viable option but also addresses the environmental challenges associated with land-filling (Ogwueleka *et al.*, 2022). The utilization of renewable feedstocks, such as animal manure, crop residues, and food wastes, Nigeria, being rich in these feedstocks and blessed with abundant energy resources, stands to benefit. The country boasts an average solar radiation of 5.548 kWh/m²/day (Nwokoye *et al.*, 2021), promoting mesophilic temperatures ideal for anaerobic digestion, a key process in biogas production. With the recent surge in conventional fuel prices, biogas emerges as a valuable alternative that can substitute for fuels derived from crude oil, especially considering the environmental and health risks posed by advanced refining methods (Adeniyi *et al.*, 2020).

Furthermore, Nigeria's significant rural population, with over 80 percent residing in rural areas, relies heavily on firewood for energy. This over-reliance has led to a crisis in wood fuel availability and environmental degradation due to unsustainable harvesting practices (Okpara *et al.*, 2022). Introducing biogas production can offer a sustainable solution to these challenges. Biogas, produced through anaerobic digestion by specialized

microorganisms, finds diverse applications such as combustion engines, burners, gas turbines for electricity generation, and combined heat and power generation (Alfa *et al.*, 2020). Notably, the use of manure for biogas production does not diminish its value as a fertilizer, as the essential nutrients like nitrogen remain in the treated sludge (Akpan *et al.*, 2021).

The global significance of biogas as an environmentally beneficial energy source is underscored by its increasing popularity, driven by concerns over energy depletion and environmental degradation from fossil fuels (Awulu *et al.*, 2020; Lawal *et al.*, 2021). Biogas primarily consists of methane (60%) and carbon dioxide (35-40%), along with trace amounts of other gases like ammonia, hydrogen sulfide, hydrogen, oxygen, nitrogen, and carbon monoxide (Oyebisi *et al.*, 2021). This environmentally friendly gas is a product of anaerobic digestion, a process where organic compounds are broken down by microorganisms in the absence of oxygen, releasing biogas (Ogugbue *et al.*, 2021). As a result, the global biogas market has experienced substantial growth, aided by supportive regulations, research funds, subsidies, and contracts for electricity purchase, making it a competitive option against conventional energy sources (Ogugbue *et al.*, 2021).

2. Materials and method

2.1 Fresh Cow Dung and Poultry Droppings Collection

Fresh cow dung was sourced from the Lokoja Agricultural Development Project Abattoir, while poultry droppings were obtained from a household poultry in Lokoja. Various materials necessary for the research, such as a mercury glass thermometer for temperature readings, inlet and outlet pipes, outlet hoses for gas transfer, a stirrer for slurry agitation, and a car tire tube serving as the gas collector, were purchased from different stores in Lokoja, Kogi State.

2.2 Slurry Preparation

The cow dung and poultry droppings were mixed with water in a container to create a slurry, ensuring smooth particles. This slurry was then fed into the bio-digester container through the inlet pipe. Additionally, the cow dung was separately mixed with water to form a slurry before being introduced into the biogas digester. A woody stirrer was constructed and incorporated into the bio-digester using rubber tubes to seal it firmly.

2.3 Bio-digester Set up and Loading

Three 20-liter plastic cylindrical containers were used as digesters, each containing either 100% cow dung or 100% poultry droppings. The digesters, with a diameter of 20 cm and height of 40 cm, had lids that were perforated to accommodate a 2 cm hose for gas outlet and a stirrer for enhanced gas production. All perforations were sealed adequately to prevent gas leakage. Space was provided at the top of each fermentation chamber to store the biogas produced before its delivery through the hose. Each bio-digester was loaded with 3 kg of substrate in batches, and a plastic stirrer was used to agitate the slurry for optimal gas production. The experiment was conducted under ambient conditions without control over temperature, pressure, or pH adjustments.

2.4 Methodology

Fresh cow dung and poultry droppings were collected from the Lokoja abattoir and domestic poultry farms, respectively. The biodigester used for biogas production was set up at the Federal University Lokoja's biological garden. The poultry droppings and cow dung, each weighing 3 kg, were diluted with 10 liters of water to form a slurry, which was then fed into the biodigester through the inlet pipe. The biodigesters were sealed tightly to initiate anaerobic digestion immediately.

2.5 Biogas Collection

The gas produced during anaerobic digestion flowed through a rubber hose into a tire tube connected to the top of the bio-digester. The pressure from the generated gas caused a balloon to rise, and the amount of gas produced was measured daily at 4 pm using a digital hanging scale for 21 days. On the 21st day, the gas collected in the tire tube, formed in a spherical shape, was used to calculate the volume of gas produced using the equation for a sphere ($V = 4/3\pi r^3$).

3. Results and Discussion

3.1 Data Collection and Analysis

Throughout the 21-day period, daily ambient temperatures and the amount of gas produced were recorded using a mercury-in-glass thermometer and a digital hanging scale, respectively. pH readings were taken every two days by allowing a small portion of the slurry to flow into a beaker and measuring with a pH meter. The collected data were analyzed using Excel software.

The amount of biogas produced from cow dung in kilogram per day at varying temperatures and pH are presented on table 1

Table 1: Biogas (kg) produced from cow dung at varying temperature and pH for 21 days.

Day's	Temperature (°C)	Amount of biogas produced from Cow dung (kg)	pH
1	34	–	8.42
2	32	–	
3	33	–	
4	35	–	6.54
5	37	–	
6	39	–	
7	36	0.005	6.82
8	38	0.008	
9	38	0.010	
10	35	0.005	6.90
11	37	0.010	

12	36	0.000	
13	35	0.000	7.30
14	37	0.000	
15	38	0.000	
16	37	0.010	7.40
17	38	0.020	
18	39	0.070	
19	37	0.100	7.70
20	35	0.060	
21	38	0.120	

The amount of biogas produced from poultry droppings in kilogram per day at varying temperatures and pH are presented on table 2

Table 2: Biogas (kg) produced from poultry droppings at varying temperature and pH for 21 days.

Day's	Temperature (°C)	pH	Amount of biogas produced from poultry droppings (kg)
1	34	9.38	–
2	32		–
3	33		–
4	35	7.80	–
5	37		–
6	39		–
7	36	7.90	–
8	38		–

9	38		0.010
10	35	8.20	0.020
11	37		0.005

3.2 Analysis of the Result

Table 3: t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	<i>Amount of gas from cow dung(kg)</i>	<i>Amount of gas from poultry dropping(kg)</i>
Mean	0.027866667	0.026923077
Variance	0.001576124	0.001252244
Observations	15	13
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	26	
t Stat	0.06648934	
P(T<=t) one-tail	0.473748445	
t Critical one-tail	1.70561792	
P(T<=t) two-tail	0.947496891	
t Critical two-tail	2.055529439	

12	36		0.000
13	35	8.50	0.000
14	37		0.100
15	38		0.005
16	37	8.80	0.020
17	38		0.010
18	39		0.050
19	37	8.90	0.030
20	35		0.000
21	38		0.100

3.3 Discussion

At the end of the two-sample t-test to compare the means of the amount of gas from cow dung and the amount of gas from poultry droppings, the result was not statistically significant, implying no significant difference between the means of the two different samples at the 0.05 level of significance. Biogas yield from chicken droppings and cow dung was measured for a period of 21 days in uncontrolled ambient conditions, and the cumulative amount of biogas production from the chicken droppings for the 21-day period was 0.1 kg, while that of the cow dung was 0.12 kg. From the result, biogas yield was observed for 21 days. The chicken droppings started yielding from the ninth day of digestion. The yield continued to grow until the twelfth day when a decrease in gas yield was observed, and the decrease continued until the thirteenth day when gas production ceased, consistent with the findings of Idris *et al.*, (2021). The decrease in biogas production could be a result of unregulated temperature and non-interval agitation of the substrates. The low yield of biogas from the chicken droppings could be due to a high pH value of 9.38 as measured at the commencement of the experiment. A pH value between 7.0 to 7.2 has been observed to be the most ideal for optimal biogas yield (Olusola *et al.*, 2023). Gas yield was also observed to increase from the eighteenth day. This could be due to the fact that it takes about 21 days for complete digestion of chicken droppings (Adeoti & Salau, 2022). There was no gas yield from the cow dung for the first six days; it was on the seventh day that gas yield was observed for the cow dung. This could be because biogas production rate in batch condition is directly equal to the specific growth of methanogenic bacteria. The yield peaked on the eleventh day and started dropping until the sixteenth day when an increment was observed. The highest biogas yield on the eighteenth day was in agreement with the findings of Abdullahi *et al.*, (2021). The gas yield continued until the 21st day when the gas yield ceased completely. However, gas yield from the cow dung was observed and measured. A graphical plot to compare the gas yield from the chicken droppings and cow dung biogas yield is shown below. From the figure, there was a relatively steady production of biogas from the cow dung, though the chicken droppings initially showed an abrupt increase in biogas production, and more gas yield was observed from the chicken droppings.

3.4 Conclusion

Biogas yield from chicken droppings was observed to commence from the ninth day of anaerobic digestion of the chicken droppings while the biogas yield from cow dung started from the sixth day. And it was observed that even in uncontrolled ambient conditions, there were still production of gas from both the chicken droppings and cow dung respectively.

3.5 Acknowledgement

3.6 Ethical Approval

All authors hereby declare that “Principles of laboratory animal care” (NIH publication No. 85- 23, revised 1985) were followed, as well as specific national laws where applicable. All experiments have been examined and approved by the appropriate ethics committee.

3.7 Competing Interests

Authors have declared that no competing interests exist.

References:

1. Ogwueleka, T. C., Idris, S. B., Olusola, K. O., Adeoti, A. I., & Salau, O. A. (2022). Comparative analysis of biogas production from cow dung and poultry droppings. *Environmental Science and Pollution Research*.
2. Nwokoye, C., Akpan, M. N., Alfa, M. I., & Abdullahi, Y. S. (2021). Solar radiation potential for biogas production in Nigeria. *Renewable Energy*.
3. Adeniyi, A. O., Awulu, F. N., Lawal, S. O., & Bijman, J. (2020). Biogas as an alternative to conventional fuels in Nigeria. *Journal of Renewable Energy*.

4. Okpara, B. O., Ogugbue, C. J., & June, J. (2022). Impact of wood fuel dependency on environmental degradation in rural Nigeria. *Environmental Management*.
5. Alfa, M. I., Akpan, M. N., Oyebisi, T. O., & Bijman, J. (2020). Applications of biogas produced from animal manure in Nigeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*.
6. Akpan, M. N., Ogugbue, C. J., & Olusola, K. O. (2021). Utilization of manure-derived biogas for sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*.
7. Awulu, F. N., Lawal, S. O., & Bijman, J. (2020). Environmental benefits of biogas as an alternative energy source in Nigeria. *Environmental Technology & Innovation*.
8. Lawal, S. O., Adeniyi, A. O., & Awulu, F. N. (2021). Biogas production and its environmental implications in developing countries: A review. *Journal of Environmental Management*.
9. Oyebisi, T. O., Ogugbue, C. J., & Akpan, M. N. (2021). Composition and characteristics of biogas produced from organic waste in Nigeria. *Waste Management & Research*.
10. Ogugbue, C. J., Oyebisi, T. O., & Alfa, M. I. (2021). Global biogas market trends and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
11. Idris, S. B., Awulu, F. N., & Lawal, S. O. (2021). Biogas production from poultry droppings: Optimization and challenges. *Journal of Environmental Science and Engineering*.
12. Olusola, K. O., Adeoti, A. I., & Salau, O. A. (2023). Optimization of biogas production from poultry droppings using response surface methodology. *Journal of Environmental Management*.
13. Abdullahi, Y. S., Alfa, M. I., & Bijman, J. (2021). Enhancing biogas production from cow dung: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*.
14. Bijman, J., & June, J. (2014). Biogas production from organic waste: Challenges and opportunities. *Waste Management & Research*.

USE OF ENERGY-SAVING BUILDING MATERIALS IN THE ENERGY SECTOR

Assistant – Eshkulov Nuriddin

Jizzakh Polytechnic Institute

Assistant - Potes Tatyana

Belarusian National Technical University

Xayitov Fayozjon

Jizzakh Polytechnic Institute

Аннотация

В статье представлены расчеты эффективности современных энергосберегающих окон в сбережении тепла в помещениях и сравнительные таблицы обычных окон и современных энергосберегающих окон.

Annotation

The article presents calculations of the effectiveness of modern energy-saving windows in saving heat in rooms and comparative tables of ordinary windows and modern energy-saving windows.

Ключевые слова: энергосбережение, резонансное состояние, стеклопакет, магнетронный метод, оксиды металлов.

Keywords: energy saving, resonant state, double-glazed window, magnetron method, metal oxides.

Production of modern building materials and their effective use remain one of the pressing problems today. Every architect or designer designing a building should be able to choose building materials that will not only make the rooms warm, moderate, comfortable, but also ensure that the air in them is always clean, taking into account energy efficiency. [1].

When the air temperature drops sharply, up to 50% of heat is lost in rooms with ordinary windows, and the temperature is low near the windows. Modern energy-saving windows are better than ordinary windows, double and multi-chamber windows. They are 20% more heat-efficient than double-chamber windows. Such windows reflect sunlight on summer days, because the reflection activity is double-sided, as a result, cool air is provided in the room [2]. Resonance is not observed in single-chamber energy-saving glass packages, this situation occurs in double and multi-chamber glass packages. Low-emissivity glass packages also provide noise insulation when used on exterior windows. In normal cases, 6mm or even 8mm glass is used instead of the usual 4mm glass. A leader in the building materials industry and today known worldwide for its skyscrapers, glass forms the exterior of Dubai's buildings without consuming much electricity despite the hot climate, they manage to provide cool air temperature inside the building. The main reason for this is that the glass of the building frames in Dubai is equipped with energy-saving glass. So, how can we save energy in the summer season if we install energy-saving windows? As a result of experiments and research, it became known that 40 percent more electricity is spent on cooling a room with ordinary glass compared to a room with energy-saving glass.

Energy-saving glass is a special coating created by sprinkling metal oxides such as silver, titanium, nickel chrome in a vacuum chamber from the 7th to the 10th layer in a vacuum chamber. The thickness of these layers is created in such a way that due to this, the glass has the maximum light transmission, as well as blocking the infrared rays of the sun and heat, while ordinary glass is made of quartz sand, soda, lime and broken glass pieces. made by swelling. Due to the fact that it does not contain any metal oxides, the glass does not have energy-saving properties.

As for the cost of heating a room in the winter season, today in the Republic of Uzbekistan, 183.2 kW/h of electricity is used to heat 1 square meter of space. In the case of Sweden and Finland, it is 135 kW/s. Because

of this, 90 percent of houses and building frames in Sweden and Finland are equipped with energy-saving glass. For this reason, the countries mentioned above use 40 percent less electricity than us (Table 1).

Table 1

T r	Energy consumption per hour in kW/h	Hot days (20<c ⁰)	Consumed energy kW/h	Energy saved kW/h
1.	6,8 (simple window)	100	4080	0
2.	6,8 (energy efficient window)	100	2448	1632

References

1. I.I. Kasimov “Arzon zamonaviy qurilish ashyolari”. A textbook for graduate students studying architecture, construction and a guide for young entrepreneurs. Cholpon publishing house is a creative house of printing. Tashkent - 2017.
2. N.A.Mahmudova, H.N.Nuritdinov “Pardozlash va issiqlik izolatsiya materiallar” Recommended by the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan as a study guide for higher educational institutions in the field of construction. "Publisher" Tashkent-2010.
3. N.A.Samigov “Qurilish materiallari va buyumlari” Recommended by the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan as a textbook for higher education institutions "Cholpon Creative House of Publishing and Printing" Tashkent-2013
4. Komilov X.X “Zamonaviy qurilish materiallari” (educational and methodological complex), TAQI. 2020.
5. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated November 8, 2017 No. PQ-3379 «Energiya resurslaridan oqilona foydalanishni ta’minlash chora-tadbirlari to’g’risida»

CURRENT SENSORS FAULTS DETECTION AND ISOLATION OF DFIG FOR WIND TURBINE BASED ON GENERALIZED OBSERVER SCHEME (GOS)

Chaima Gherari, Farid Berrezzek, Khaled Khelil

Electrical Engineering department ,Laboratory of Electrical Engineering and Renewable Energy ,University of Souk ahras, Souk ahras,Algeria

Abstract

In order to increase the efficiency, to ensure availability and to prevent unexpected failures of the doubly fed induction generator (DFIG), widely used in speed variable wind turbine (SVWT), a model based approach is proposed for diagnosing stator and rotor winding and current sensors faults in the generator. In this study, the Extended Kalman Filter (EKF) is used as state and parameter estimation method for this model based diagnosis approach. The generator windings faults and current instruments defects are modelled, detected and isolated with the use of the faults indicators called residuals, which are obtained based on the EKF observer. The mathematical model of DFIG for both healthy and faulty operating conditions is implemented in Matlab/Simulink software. The obtained simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed technique for diagnosis and quantification of the faults under study.

Keywords: extended kalman filter (EKF), doubly fed induction generator (DFIG), speed variable wind turbine (WT), dedicated observer scheme (GOS)

I. Introduction

The electrical power generation by renewable energy systems (RES); among the envisaged solutions, wind systems emerge as one of the most promising option contribute to the reduction of carbon dioxide emission and therefore to a lower environmental pollution [1][2][3]. It should be noted that among the various types of wind turbine generators, the DFIG is the most commonly used generator in on-shore and off-shore applications, accounting for around 70% of the installed wind turbine nominal capacity worldwide. Their versatility is evident in various contexts, ranging from grid-connected farms or isolated sites to configurations of hybrid energy systems [4][5][6]. It should be noted that the majority (70%) of wind turbines typically rely on a doubly fed induction generator (DFIG) [7][1]. This machine has a stator winding connected to the grid through a transformer, while the rotor is connected to the electrical network through AC/DC/AC converters. Thanks to this architecture, the wind turbine can operate in a variable speed range, varying between $\pm 30\%$ around the synchronous speed. This characteristic helps reduce the size of the converters, offering a significant economic advantage over other types of generators [8]. These converters play a central role in controlling the power exchanged with the grid. These operations are carried out using specific control techniques applied to these converters, which constitute key elements of the underlying technology. The entire set of control techniques relies primarily on current measurements [9]. These sensors are prone to numerous faults that impair measurement quality. Based on industrial and field statistics [10], current sensor faults are classified as significant issues arising from high power density and electromagnetic interference [11]. In order to ensure the service continuity of the wind power system and anticipate any degradation, it is imperative to establish an effective diagnostic method enabling the detection, localization, and isolation of faults in the current sensors. These diagnostic methods are generally categorized into three types: signal processing, model-based approaches, and methods using artificial intelligence [12]. Concerning the model-based approach, several researchers have chosen to use it to detect and isolate faults, especially those related to current sensors. The first observer-based diagnostic approach is a very interesting methodology for dynamic systems [13][14][15][16][17][18][19][20][21]. Furthermore, regarding model-based methods for sensor fault detection in wind system based on DFIG are developed to detect and locate multiple and simultaneous faults for the current sensors of the DFIG. This is done through a bank of observers based on a Kalman filter, structured according to the generalized observer scheme (GOS), as described in [22], or structured according to the dedicated observer scheme (DOS), as presented in [8][11][23]. Observer-based diagnostic involve comparing the estimated outputs with the actual measurements to detect significant deviations that could

indicate a fault in the system[24]. Observer-based diagnostics consists of comparing estimated outputs with actual measurements to detect significant deviations that could reveal a fault in the system[25]. There are several types of observers used for fault diagnosis. Among the observers cited in the literature we find, the Luenberger observer, Kalman filter, Sliding Mode observer, and H_∞ observer. The choice of observer depends on the type of fault being diagnosed and the nature of the system. For this, the objective of this paper is to design an efficient fault diagnosis framework based on observers using an extended Kalman filter. The proposed diagnostic system is applied to detecting sensor faults in a wind energy system utilizing a DFIG machine. The objective of this paper is to design and propose efficient fault diagnosis structure based observers bank using extended Kalman filters . The studied fault detection system is applied to failure detection in DFIG. For that the rest of the paper is organized as follows: Section 2 describes the main components of the wind system along with the mathematical model of the DFIG. In Section 3, we present the proposed fault diagnosis framework using the extended Kalman filter. The results of the fault diagnosis are presented and discussed in Section 4, and Section 5 concludes the paper.

II. System description and Modeling

In a DFIG-based wind turbine, as shown in Fig. 1, the DFIG is coupled to the wind turbine rotor through a gearbox. The stator of the DFIG is directly connected to the grid and the rotor side is connected to a back-to-back converter via slip-rings. The grid-side converter ensures the stability and control of power injection into the grid while maintaining a constant DC link voltage. The machine-side converter regulates rotor speed, optimizes wind power generation at varying wind speeds, and efficiently manages active and reactive power, ensuring optimal system operation[26][27][28].

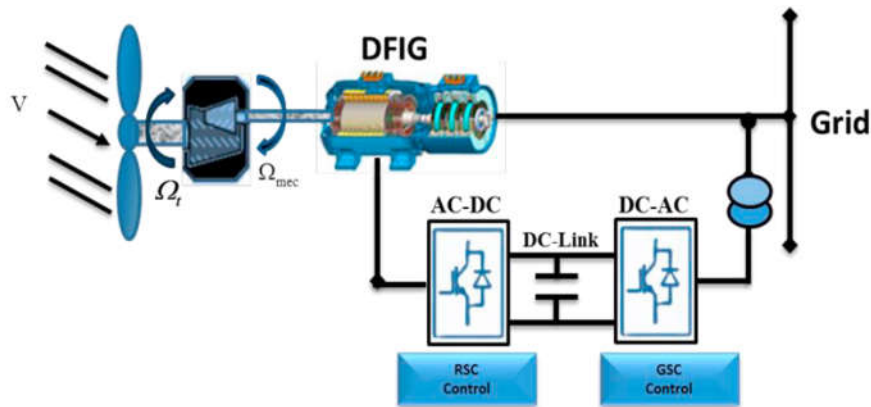


Fig.1. Basic diagram of wind system based on doubly fed induction generator.

A. Dynamic model of the DFIG system:

In order to implement a model-based Fault Detection and Isolation (FDI) approach for the DFIG of wind turbine, a preliminary system modeling. The model of the DFIG is modeled in the park transformation reference frame (dq) linked to the rotating magnetic field, in order to control and detect its faults. Each variable admits a direct component denoted d and a quadratic component denoted q[7]. The voltage equations of the DFIG in the (dq) reference frame are Starting from its electrical and mechanical equations, a state space model of DFIG in the Park reference frame, related to the rotating magnetic field is addressed. DFIG voltage equations in the d-q reference frame, are[1][29][30]:

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dx} - \omega_s \phi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dx} - \omega_s \phi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dx} - \omega_r \phi_{qr}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dx} - \omega_r \varphi_{dr}$$

The mechanical equation of the DFIG is expressed as:

$$J \frac{d\Omega}{dx} = T_{em} - T_r + T_f \quad (2)$$

The electromagnetic torque is expressed as:

$$T_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (3)$$

Where:

V_{ds}, V_{qs} : are Direct and quadrature voltages [V], and I_{ds}, I_{qs} are direct and quadrature currents [A] of stator phases. V_{dr}, V_{qr} are direct and quadrature voltages [V], and I_{dr}, I_{qr} Direct and quadrature current [A] of rotor phases.

$$\varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr}$$

$$\varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \quad (4)$$

$$\varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds}$$

$$\varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs}$$

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$: are Direct and quadrature flux [Wb] and $\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$ Direct and quadrature flux of rotor phases [Wb]. R_s, R_r : are stator and rotor resistance, respectively. L_s, L_r are the self-inductance of the stator and rotor [H]. M is the mutual inductance between the stator and the rotor [H]. ω_s and ω_r are the stator and rotor pulsations [rad/s], respectively. J is the inertia of the DFIG $K \cdot m^2$; p is the number of pairs of poles. T_{em}, T_f and T_r are the generator and resistive and frictional torque [N·m], respectively.

B. The Non Linear State Space Model of DFIG:

In order to facilitate handling of DFIG equations, the fixed reference frame Concordia, denoted $(\alpha, \beta, 0)$ was chosen instead of the rotating reference frame $(d, q, 0)$. Therefore, the discrete nonlinear state space model of the doubly fed induction generator has been developed in this paragraph. The matrix exponential method is used for the model discretization. The discrete model of DFIG in the two-axis stationary reference frame linked to the rotating magnetic field, named Concordia and noted (α, β) , is given by [26][8]:

$$X(t) = A_1(\omega_s, \omega(t)) \cdot x_1(t) + B_1 \cdot U_1(t) \quad (5)$$

$$Y_1(t) = C_1 \cdot x_1(t)$$

$$x_1 = [I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}, I_{r\beta}]^T, U_1 = [V_{s\alpha}, V_{s\beta}, V_{r\alpha}, V_{r\beta}]^T$$

The state vector x_1 represents the currents of both the stator and rotor in the $\alpha\beta$ reference frame. The control input U_1 corresponds to the voltages of both the stator and rotor in the $\alpha\beta$ reference frame, while Y_1 denotes the output vector. The state matrix A is:

$$A_1 = \mu * \begin{bmatrix} -L_r R_s & \omega L_m^2 & R_r L_m & \omega L_r L_m \\ -\omega L_m^2 & -L_r R_s & -\omega L_m^2 L_r & R_r L_m \\ L_m R_s & -\omega L_s L_m & -R_r L_s & -\omega L_s L_r \\ L_s \omega L_m & L_m R_s & \omega L_s L_r & R_r L_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

The input matrix is:

$$B_1 = \mu * \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

Where: $\sigma = \frac{M^2}{L_r L_s}$, $\mu = \frac{1}{\sigma L_r L_s}$: the leakage coefficient represents; L_r which denotes the cyclic rotor inductances measured in [H], while ω stands for the frequency of the rotor in [rad/s]. The resulting matrix C_1 is represented as follows:

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

III. Proposed Diagnosis methodology :

As all industrial systems, the generator is often affected by three types of faults according to their localization, which are: Actuator faults (AF), Sensor or Instrument faults (IF) and Component faults (CF). In this work, we are interested in detecting and isolating the sensor current faults of DFIG. For achieving this purpose, a model based method with the use of observers to generate residuals is then designed. The observer chosen for that aim is the Extended Kalman filter. The model-based FDI methods consist of three main steps: reconstruction of the system state, residual generation and decision making. Therefore, the structure of the model-based FDI approach for the sensor currents faults of DFIG, is presented in Figure 2.

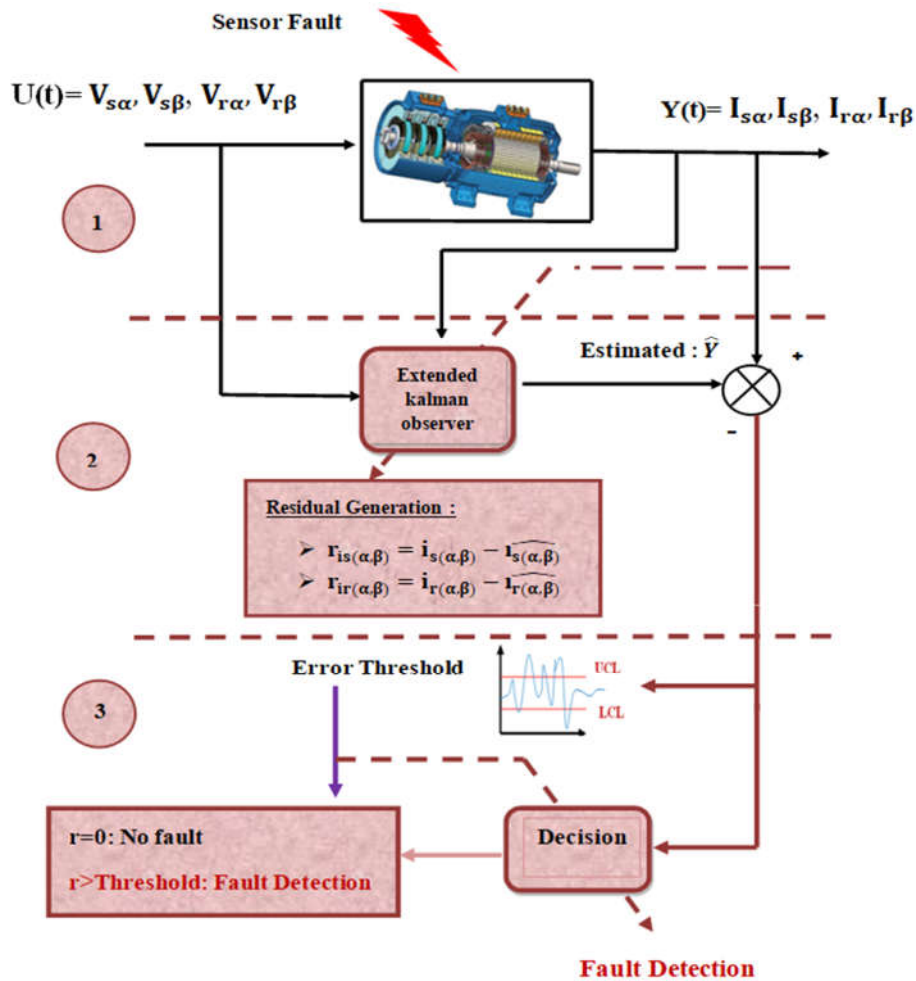


Fig.2. Structure of the model based diagnosis strategy of DFIG.

A. State reconstruction by Discrete Extended Kalman filter:

The classical Kalman filter was originally in 1960 by the mathematician, electrical engineer and inventor Rudolf Emil Kalman. Its main advantage is the ability to provide estimates of system states, outputs and parameters, which are not directly measurable by physic sensors or which are prone to statistical noises and other inaccuracies. This concept is widely applied for navigation and vehicles control as aircraft and spacecraft. Furthermore, it is used in fields such as signal processing, economic and widely for estimation and tracking. The recursive filter kalman algorithm consists of two successive steps that are: firstly the prediction step of the actual state of a system based on its inputs, followed by the correction stage in which the state estimations, previously made, are updated using available and measurable system outputs. Basically, the Standard Kalman filter (SKF) was devoted to the estimation of the nonmeasurable states of linear systems. In fact, most of physical systems have a non linear behavior, hence a powerful extension called extended Kalman filter (EKF), has been developed for state and parameter estimation of non-linear systems, which requires a linearization at each working point of the state equations. The EKF gives an approximation of the optimal estimate. As in many cases, if the nonlinear system is approximately linearized, the EKF may not perform well. If there is a bad initial guess regarding the underlying system's state, then this may cause a bad estimation[31][2][32][23], as shown in Figure 3.

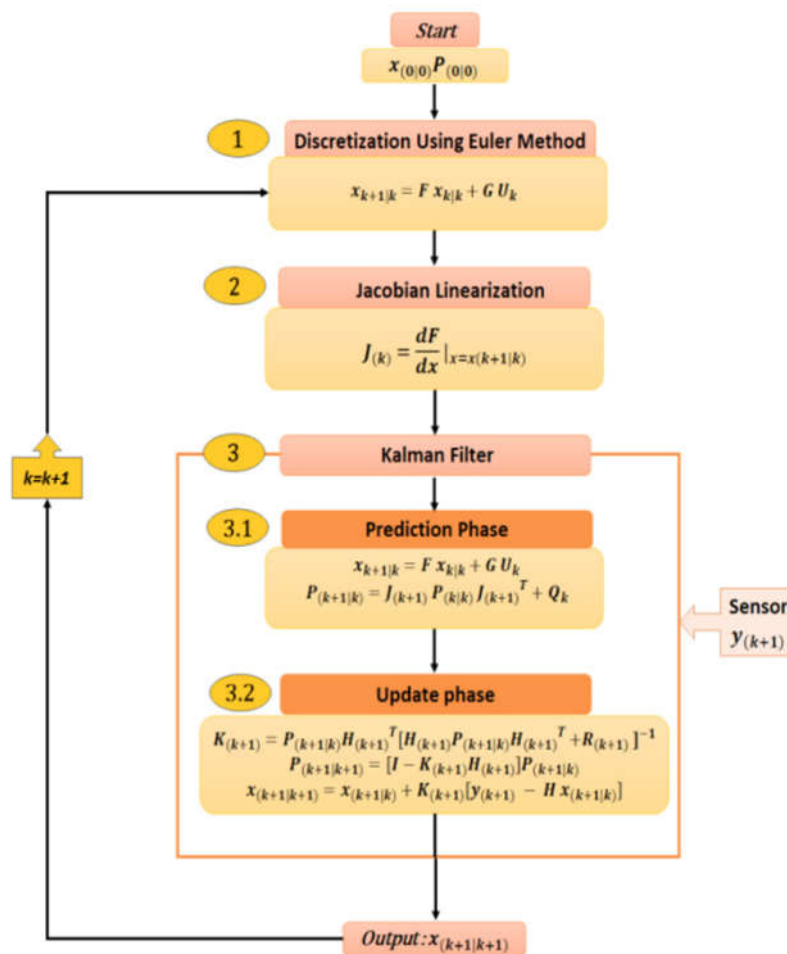


Fig.3. Extended Kalman filter (EKF) algorithm.

B. Residual Generation :

The role of the Extended Kalman filter is to estimate non-measurable state variables. These estimated values are then compared to the sensor measurements used in the creation of isolation and fault detection systems, which generate residuals that serve as fault indicators. A residual should be equal to zero in the absence of fault and significantly different from zero otherwise[11]. These residuals are given by:

For DFIG stator currents:

$$\begin{aligned} r_{is\alpha} &= i_{s\alpha} - \widehat{i}_{s\alpha} \\ r_{is\beta} &= i_{s\beta} - \widehat{i}_{s\beta} \end{aligned} \tag{9}$$

For DFIG rotor currents:

$$\begin{aligned} r_{ir\alpha} &= i_{r\alpha} - \widehat{i}_{r\alpha} \\ r_{ir\beta} &= i_{r\beta} - \widehat{i}_{r\beta} \end{aligned} \tag{10}$$

IV. SIMULATION RESULTS :

This section presents the obtained simulation results in order to demonstrate the ability and the efficiency of the proposed diagnosis structure. Some tests and simulations comprising realistic faults in failure situations are illustrate the efficiency of the suggested methodology for detecting sensor faults in the DFIG. Based on the elaborated structure based on a bank of Extended kalman observers, structured according to the generalized observer scheme (GOS) is used. This structure consists in designing four (EKF); the i^{th} Extended kalman observer is controlled by all outputs except the i^{th} output and all the DFIG inputs. The figure below presents the GOS structure, based on (EKF) to generate residuals of multiple and simultaneous current sensors faults ,that is presented in Figure 4, the responses of the system and the detected faults are discussed here. We will present the obtained results for the employed observers on two sub-sections: firstly, without faults, and secondly with the occurred faults in the sensors.

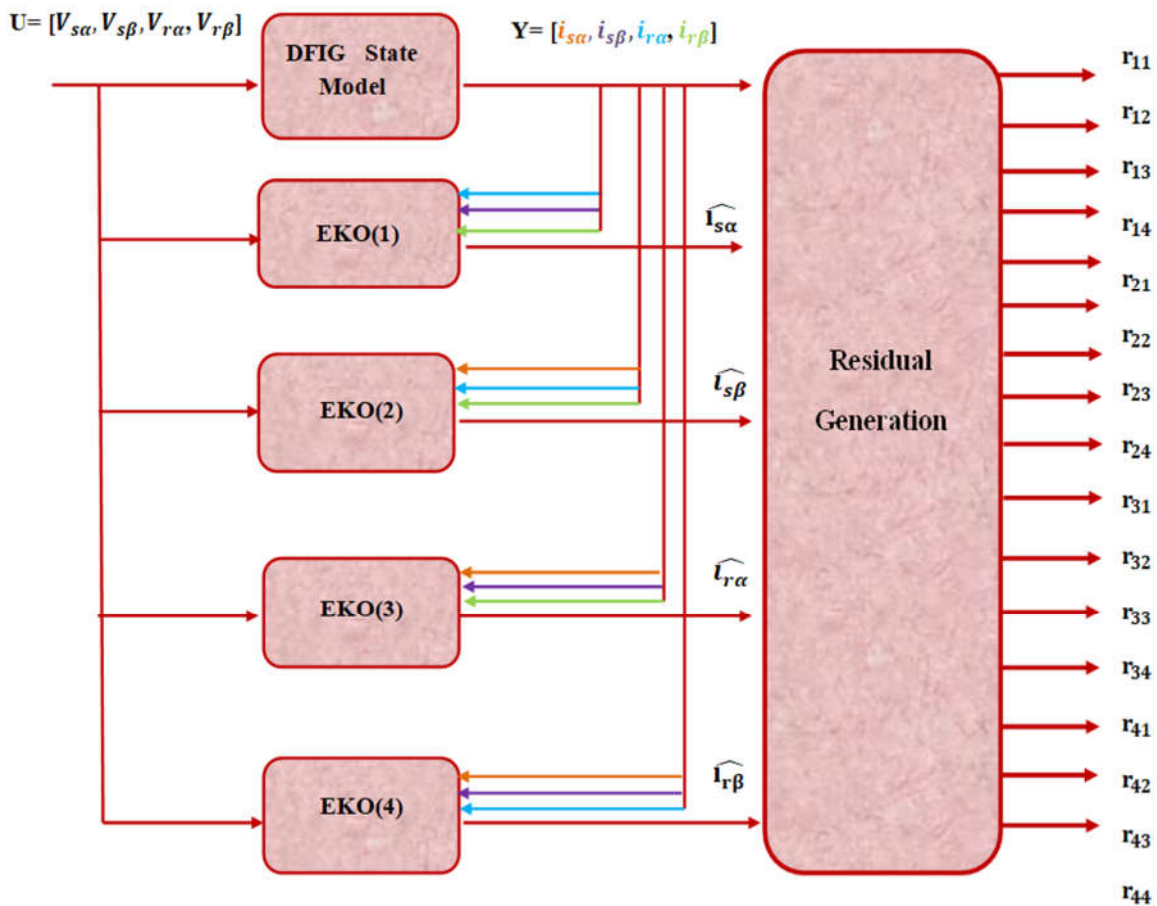


Fig.4. Structure of the Extended Kalman GOS bank.

A. Results without faults using Extended Kalman Filter bank :

In the case of operating the system without faults, the α -component and β - component of both stator and rotor currents of DFIG are shown respectively in Figures 5, 6 and 7.

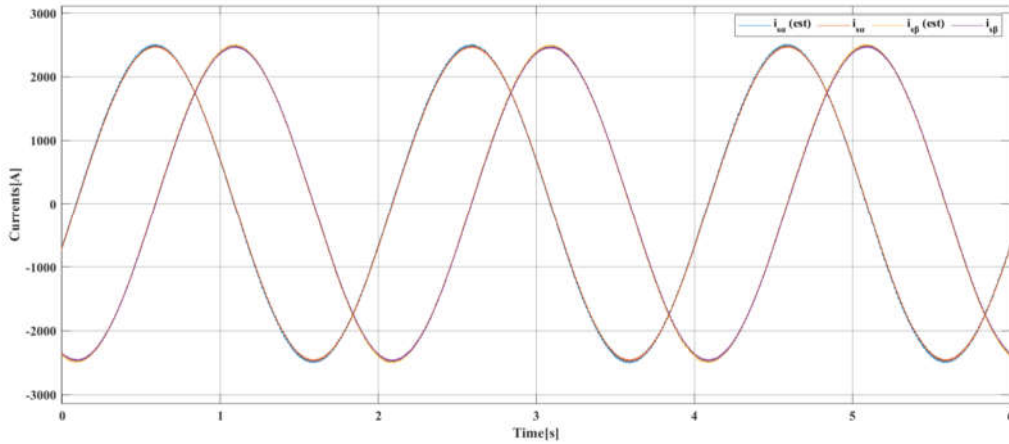


Fig.5. Stator currents in Concordia frame [A].

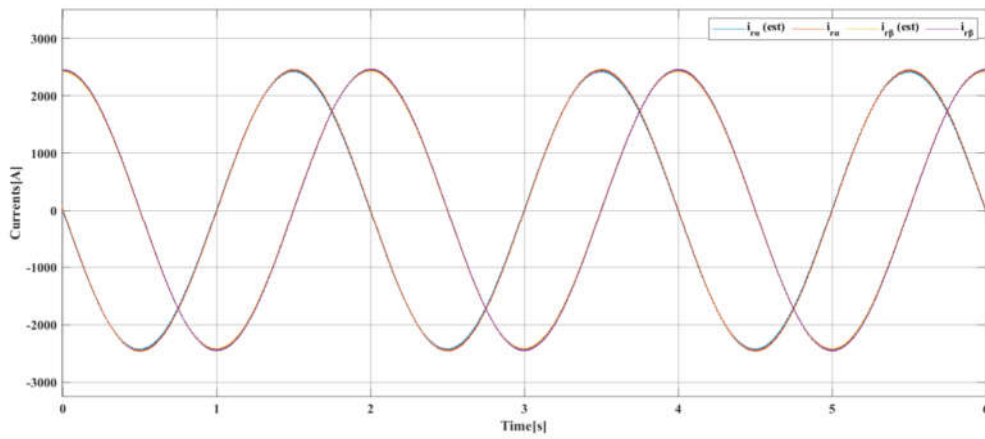


Fig.6. Rotor currents in Concordia frame [A].

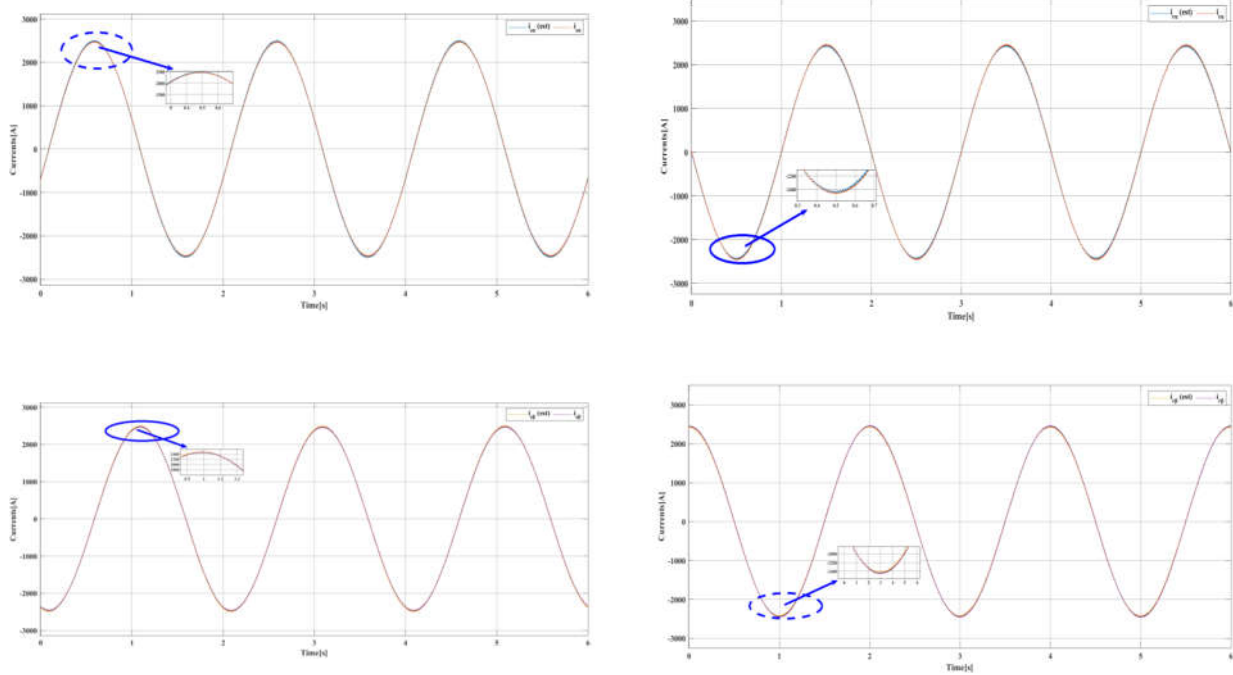


Fig.7. zoom part for stator and rotor current in Concordia frame without fault.

Whereas Figure 8 present the error as residuals calculated between the process responses ($Y(t)$) and the estimated values $\hat{Y}(k)$ using Extended Kalman observer bank .In these figures, we present a zoom that shows the big similarity and the correct convergence between the two responses of the real system and the estimated values for the two currents .It can be seen that in the case of normal functioning mode (without faults), the elaborated observers are able to estimate correctly currents, as depicted in the zoom captured. The current sensor is working correctly without any problems. The error as residual is always zeros in all simulation time intervals which demonstrates the efficiency of the estimation used step.

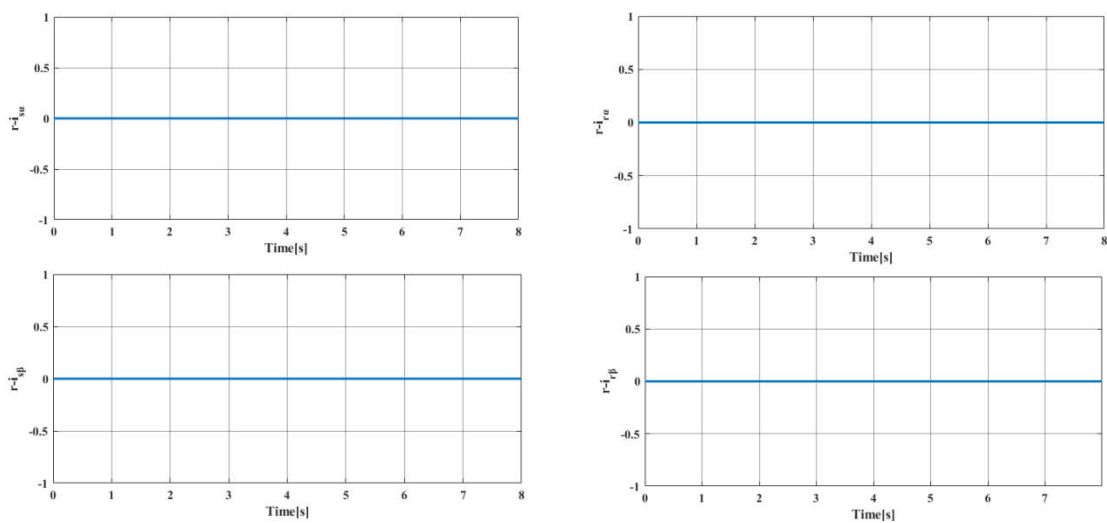


Fig.8. Residuals for current sensors $[i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}]$ in healthy case.

B. Results with occurrence faults using Extended Kalman Filter bank :

As we know in the previous study that using unique kalman observer is easy to implement but it doesn't allow the detection and localization of multiple and simultaneous current sensors faults. localize exactly which current sensor is under faulty condition. That's why, a bank of Extended kalman observers, structured according to the generalized observer scheme (GOS), is used. This structure consists in designing four extended kalman observers. That's to say, each observer reconstructs the model outputs using only one output and all system inputs. In this case. The scenario consists in injecting an additive fault in the first current sensor, which measures the current $i_{s\alpha}$ and in the third sensor of the current $i_{r\alpha}$. Witch introduced at $t=2$ s and disappeared at $t=2.5$ s, By using the proposed bank scheme observers, as shown in Figure.3 ,which is named generalized observer scheme (GOS).The obtained residual signals of multiple and simultaneous current sensors faults are presented in Figures below:

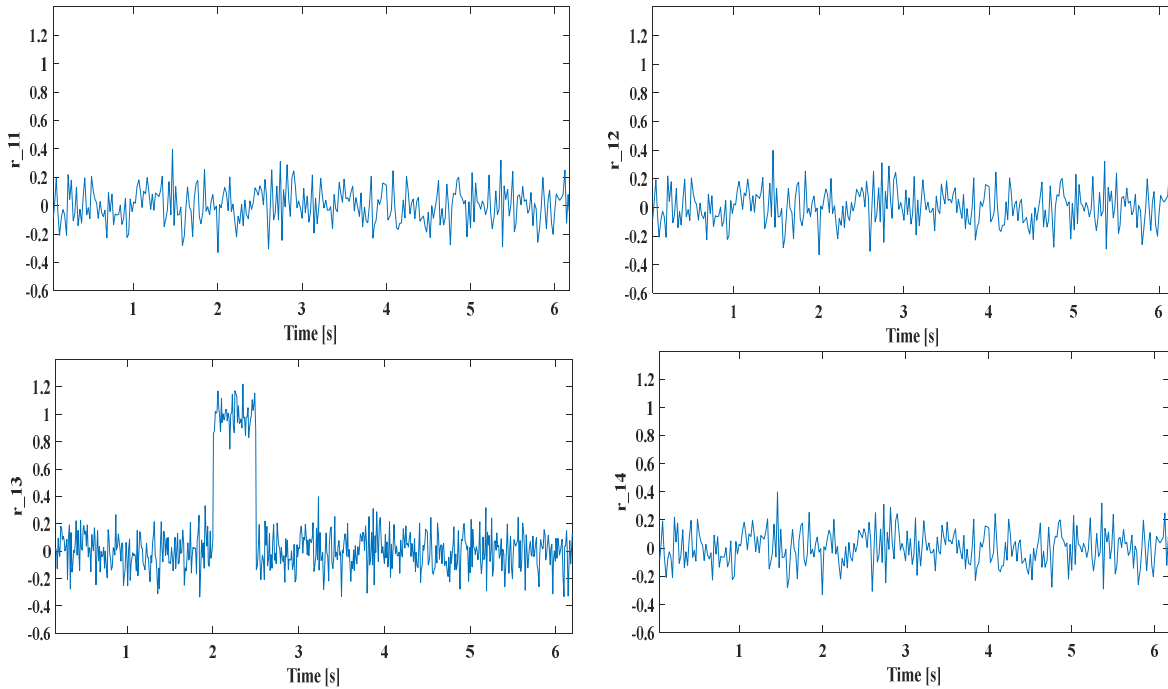


Fig.9. Residuals of extended kalman observer 1.

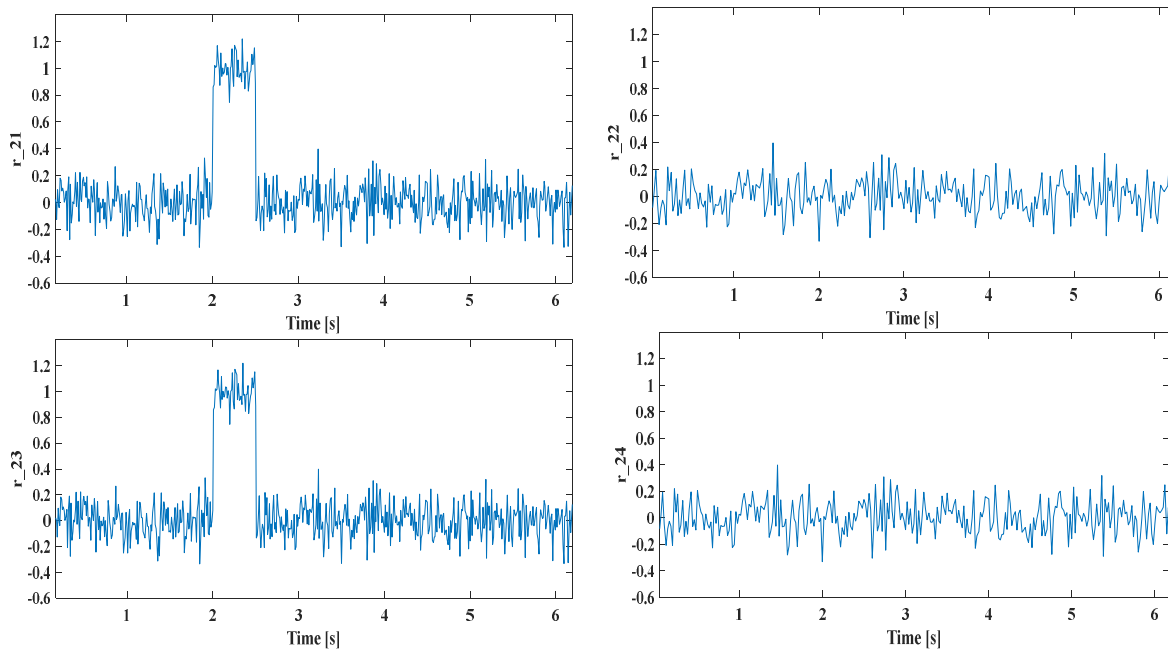


Fig.10. Residuals of extended kalman observer 2.

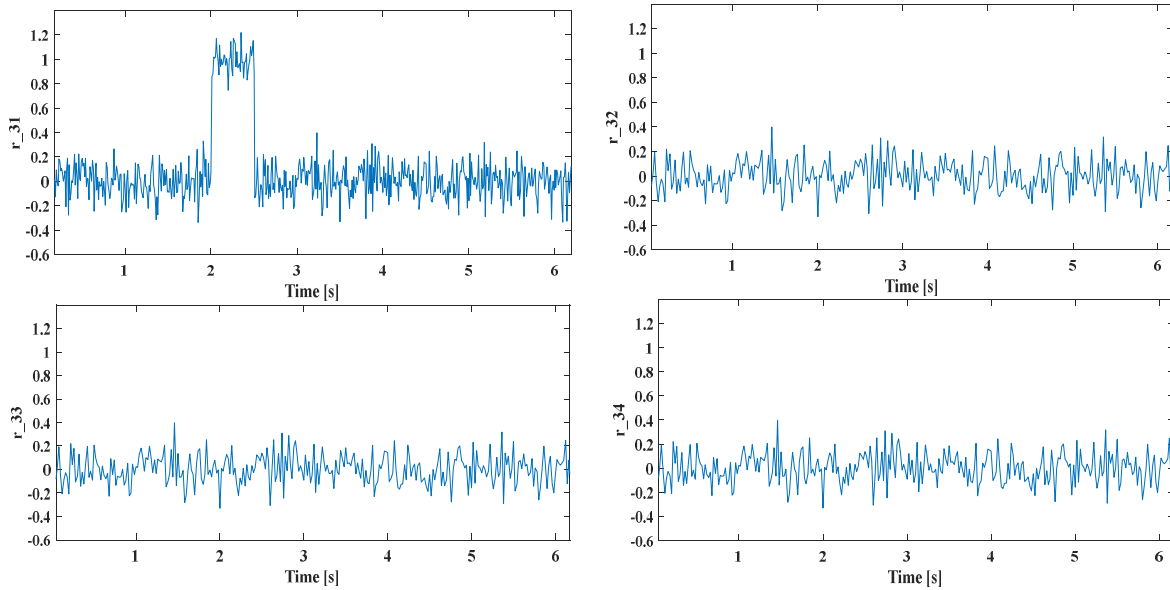


Fig.11. Residuals of extended kalman observer 3.

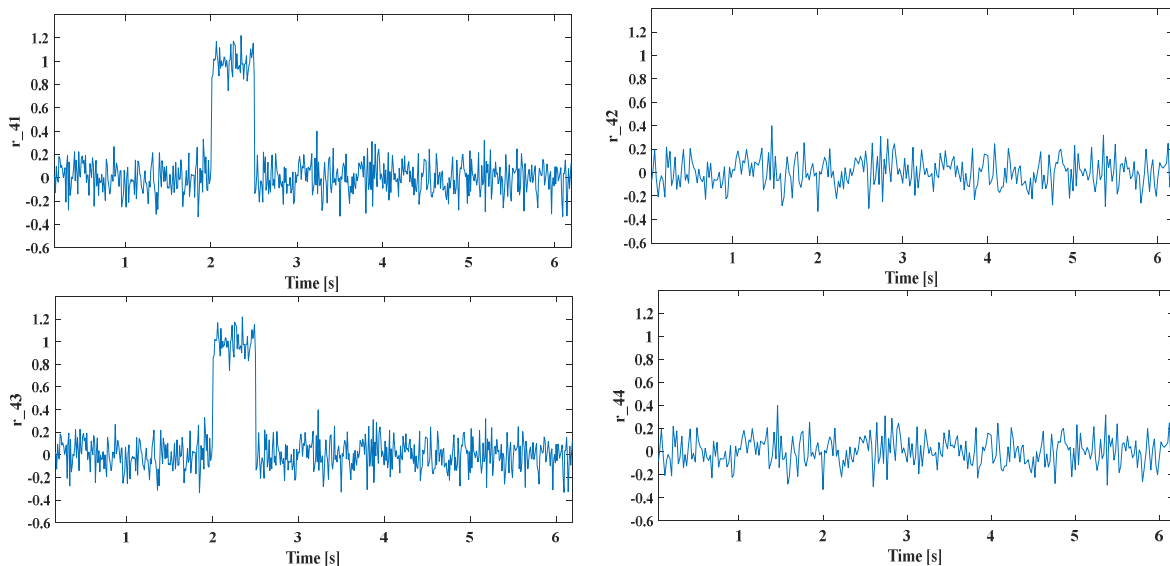


Fig.12. Residuals of extended kalman observer 4.

By analyzing the getting residual signals of each observer, we deduce that the kalman observer 2 and 4 have a poor outputs estimations and residuals: r_{13} , r_{21} , r_{23} , r_{31} , r_{41} , r_{43} , r_{33} , r_{43} are different of zero when the current sensor is affected by fault. This can be explained by the fact that they are controlled by the biased outputs $i_{s\alpha}$ and $i_{r\alpha}$. While the residuals of extended kalman observers 1 and 3, which are controlled only by one faulty outputs $i_{s\alpha}$ or $i_{r\alpha}$. As a result, the structure GOS has the advantage to detect and localize multiple and simultaneous faults.

V. Conclusion:

This paper treats the problem of fault detection and isolation (FDI) in the current sensors of DFIG. To detect and isolate one and multiple current sensors faults the generalized extended kalman observers scheme (GOS) has been designed. An efficient fault diagnosis structure based observers is proposed using Kalman filter for DFIG. Sensor faults have been investigated and detected using this fault detection strategy. The proposed defect detection with isolation system is based on the observation of the output values using the elaborated

observers in order to generate the corresponding residual of the occurred fault. All simulated sensor faults are detected and identified successfully in the DFIG.

References:

- [1] M. Abbas, H. Chafouk, and S. A. E. M. Ardjoun, "Fault Diagnosis in Wind Turbine Current Sensors: Detecting Single and Multiple Faults with the Extended Kalman Filter Bank Approach," *Sensors*, vol. 24, no. 3, 2024, doi: 10.3390/s24030728.
- [2] M. Abdelrahem, C. Hackl, and R. Kennel, "Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems," *5th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2015*, pp. 226–233, 2015, doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177628.
- [3] H. Touiou, A. Ganouche, Z. Ahmida, H. Bouzekri, and F. Tachi, "Real-time current sensor fault detection and localization in DFIG wind turbine systems," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 2388–2397, 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i4.pp2388-2397.
- [4] A. González, J. C. Pérez, J. P. Díaz, and F. J. Expósito, "Future projections of wind resource in a mountainous archipelago, Canary Islands," *Renew. Energy*, vol. 104, pp. 120–128, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.021.
- [5] S. Ahmed, E. Mehdi, and A. D. Déséquilibre, "meilleure intégration dans un réseau déséquilibré," 2019.
- [6] S. D. Ahmed, F. S. M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F. A. Al-Sulaiman, and I. M. El-Amin, "Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, no. type 1, pp. 10857–10878, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964896.
- [7] H. Torkaman and A. Keyhani, "A review of design consideration for Doubly Fed Induction Generator based wind energy system," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 160, pp. 128–141, 2018, doi: 10.1016/j.epr.2018.02.012.
- [8] I. Idrissi, H. Chafouk, R. El Bachtiri, and M. Khanfara, "Bank of Extended kalman filters for faults diagnosis in wind turbine doubly fed induction generator," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 16, no. 6, pp. 2954–2966, 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i6.10426.
- [9] P. M. Papadopoulos, L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides, and M. M. Polycarpou, "Robust Fault Detection, Isolation, and Accommodation of Current Sensors in Grid Side Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 2852–2861, 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2636815.
- [10] Z. Yang, Y. Chai, H. Yin, and S. Tao, "LPV model based sensor fault diagnosis and isolation for permanent magnet synchronous generator in wind energy conversion systems," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, 2018, doi: 10.3390/app8101816.
- [11] I. Idrissi, R. El Bachtiri, and H. Chafouk, "A Bank of Kalman Filters for Current Sensors Faults Detection and Isolation of DFIG for Wind Turbine," *Proc. 2017 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2017*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477263.
- [12] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2007527.
- [13] A. Fekih, H. Habibi, and S. Simani, "Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Wind Turbines: An Overview," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197186.
- [14] I. Jlassi, J. O. Estima, S. Khojet El Khil, N. Mrabet Bellaaj, and A. J. Marques Cardoso, "Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 5, pp. 2689–2702, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2342506.
- [15] S. A. Kumari and C. Priya, "Current Sensor Fault Detection and Isolation in Doubly Fed Induction Generator," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2007, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2007/1/012045.
- [16] R. Q. LI *et al.*, "Fault detection for DFIG based on sliding mode observer of new reaching law," *Bull.*

Polish Acad. Sci. Tech. Sci., vol. 69, no. 3, pp. 1–13, 2021, doi: 10.24425/bpasts.2021.137389.

- [17] S. Abdelmalek, L. Barazane, A. Larabi, and M. Bettayeb, “A novel scheme for current sensor faults diagnosis in the stator of a DFIG described by a T-S fuzzy model,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 91, pp. 680–691, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.05.102.
- [18] K. S. Xiahou, X. Lin, and Q. H. Wu, “Current sensor fault-tolerant control of DFIGs using stator current regulators and Kalman filters,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-Janua, no. 1, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274498.
- [19] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, “Doubly fed induction generator model-based sensor fault detection and control loop reconfiguration,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 10, pp. 4229–4238, 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2013683.
- [20] H. Chafouk and H. Ouyessaad, “Fault detection and isolation in DFIG driven by a wind turbine,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 21, pp. 251–256, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.09.536.
- [21] S. Abdelmalek, S. Rezazi, and A. T. Azar, “Sensor Faults Detection and Estimation for a Dfig Equipped Wind Turbine,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 3–9, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.164.
- [22] B. Boulkroune, M. Gálvez-Carrillo, and M. Kinnaert, “Combined signal and model-based sensor fault diagnosis for a doubly fed induction generator,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 1771–1783, 2013, doi: 10.1109/TCST.2012.2213088.
- [23] M. Abbas, H. Chafouk, and S. A. El Mehdi Ardjoun, “Current Sensor Fault Diagnosis of DFIG Wind Turbines Using an Extended Kalman Filter Observer: Experimental Validation,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 4, pp. 610–615, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.07.286.
- [24] J. Teng, C. Li, Y. Feng, T. Yang, R. Zhou, and Q. Z. Sheng, “Adaptive observer based fault tolerant control for sensor and actuator faults in wind turbines,” *Sensors*, vol. 21, no. 24, 2021, doi: 10.3390/s21248170.
- [25] Z. Zakaria, C. Lakhmissi, and A. Hafaiifa, “Fault Diagnosis Structure based on Kalman Filter for the Pitch System of a Wind Turbine Process,” no. March, 2022.
- [26] K. M. Al-Anbary, H. H. Kadhum, and A. A. Al-hayder, “Modeling, Simulation and Analysis of Doubly-Fed Induction Generator for Wind Turbines Under Grid Voltage Fluctuation,” *J. Univ. Babylon Eng. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 27–49, 2021.
- [27] F. Echiheb *et al.*, “Robust sliding-Backstepping mode control of a wind system basedfile:///C:/Users/computer house 41/Downloads/s41598-022-15960-7.pdf on the DFIG generator,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-15960-7.
- [28] S. Abdelmalek, A. T. Azar, and D. Dib, “A Novel Actuator Fault-tolerant Control Strategy of DFIG-based Wind Turbines Using Takagi-Sugeno Multiple Models,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 1415–1424, 2018, doi: 10.1007/s12555-017-0320-y.
- [29] S. A. E. M. Ardjoun, M. Denai, and M. Abid, “A robust power control strategy to enhance LVRT capability of grid-connected DFIG-based wind energy systems,” *Wind Energy*, vol. 22, no. 6, pp. 834–847, 2019, doi: 10.1002/we.2325.
- [30] D. Aguglia, P. Viarouge, R. Wamkeue, and J. Cros, “Determination of fault operation dynamical constraints for the design of wind turbine DFIG drives,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 81, no. 2, pp. 252–262, 2010, doi: 10.1016/j.matcom.2010.05.001.
- [31] W. El Sayed, M. Abd, E. Geliel, and A. Lotfy, “Using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter,” 2020.
- [32] B. Aubert, J. Regnier, S. Caux, and D. Alejo, “Kalman-filter-based indicator for online interturn short circuits detection in permanent-magnet synchronous generators,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 3, pp. 1921–1930, 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2348934.

MICROBIAL FUEL CELLS: INNOVATIONS IN SUSTAINABLE ENERGY AND WASTEWATER TREATMENT**Siya Swarnima^{1,#} and Evangeline Christina^{1,*}**^{1,2}School of Biosciences Engineering and Technology, VIT Bhopal University, Bhopal, Madhya Pradesh, India**Abstract**

Microbial Fuel Cells (MFCs) are bio-electrochemical systems that convert organic waste into electricity through microbial metabolism, offering a dual solution for sustainable energy generation and wastewater treatment. MFCs operate under anaerobic conditions using microorganisms as catalysts at the anode, eliminating the need for costly materials like platinum. They utilize organic substrates such as glucose, acetate, and wastewater, with performance optimized by enhancing electrode materials using carbon nanotubes, graphene, and metal additives. The versatility of MFC designs, including single-chamber, double-chamber, upflow, and stacked configurations, enables applications in power generation, biosensors, and efficient wastewater management. Mixed microbial consortia, including *Geobacter sulfurreducens* and *Shewanella putrefaciens*, enhance nutrient cycling and electron transfer via direct or mediated mechanisms. Substrate selection and concentration significantly influence electricity production and contaminant removal efficiency. Challenges in scaling MFCs include membrane fouling, oxygen leakage, and reduced efficiency at higher organic loading rates. Innovations such as membrane-less systems, advanced proton exchange membranes, and optimized electrode configurations aim to address these limitations. Additionally, integrating MFCs with Microbial Electrolysis Cells (MECs) facilitates hydrogen production, broadening their scope for clean energy applications. MFCs have evolved from scientific curiosities to promising technologies for sustainable development. While still in the early stages of commercialization, ongoing advancements in material science, microbial engineering, and system design hold the potential to make MFCs a viable solution to global challenges in energy and wastewater management. Their role in fostering a cleaner, more sustainable future is both significant and transformative.

Keywords:- Anaerobic conditions, Bio-electrochemical systems, Carbon nanotubes, Hydrogen production, Microbial Fuel Cells (MFCs), Proton exchange

Introduction

Microbial Fuel Cells (MFCs) represent a cutting-edge bio-electrochemical technology that generates electricity by utilizing the metabolic processes of microbes. Fig.1 depicts the Microbial Fuel Cell diagram. These cells convert the chemical energy present in organic waste into electrical power, offering a potential solution to two significant global challenges: the need for sustainable energy and effective wastewater treatment (Logan & Regan, 2006). Unlike traditional fuel cells, which require expensive materials like platinum, MFCs rely on microorganisms such as *Geobacter sulfurreducens* and *Shewanella putrefaciens* to facilitate the electron transfer at the anode (Wang et al., 2015). This not only makes MFCs an environmentally friendly option but also a more affordable one for producing renewable energy.

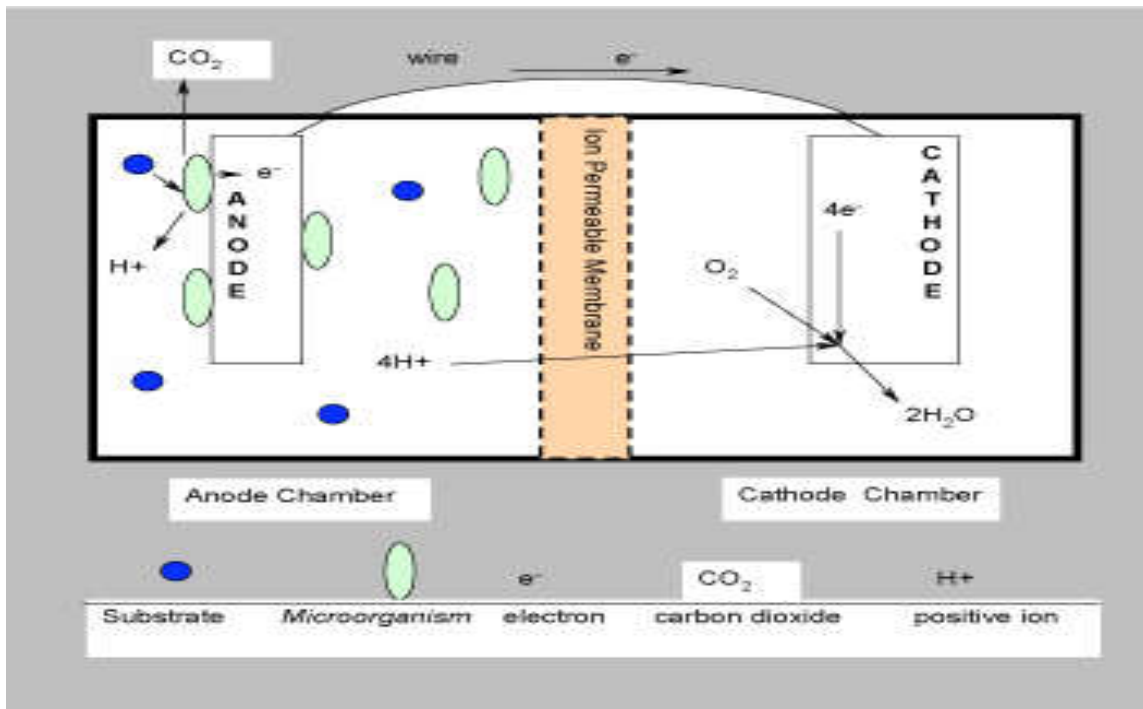


Fig.1-Two-Chambered Microbial Fuel Cell, Anand Parkash, Researchgate (*Prototype Designing and Operational Aspects of Microbial Fuel Cell– Review Paper 2013*)

The way MFCs work involves microorganisms breaking down organic substances like glucose, acetate, or wastewater at the anode. This process produces electrons and protons. The electrons travel through an external circuit to the cathode, generating electrical energy, while the protons move across a proton-exchange membrane (PEM). This dual process makes MFCs adaptable for various uses, such as power generation, wastewater treatment, and biosensing (Xu & Logan, 2012). However, despite their potential, there are still several challenges in scaling up and commercializing MFCs, such as improving efficiency, optimizing substrates, and addressing issues like membrane fouling (Logan & Regan, 2006).

Materials and Methods

The efficiency of Microbial Fuel Cells (MFCs) heavily depends on the materials used for both the anode and cathode. Traditionally, carbon-based electrodes have been the material of choice due to their excellent conductivity and compatibility with biological systems (Zhang & Liu, 2014). Recently, there's been a lot of work to improve these materials by adding things like carbon nanotubes (CNTs), graphene, and metal nanoparticles. These enhancements boost conductivity, increase surface area, and help microbes better adhere to the electrodes, which ultimately improves the overall performance of the MFCs (Wang et al., 2015). These changes have been shown to significantly improve electron transfer efficiency, leading to higher power outputs in MFC systems (Xu & Logan, 2012).

The microbial communities in MFCs are a mix of different species that work together to break down organic materials and transfer electrons. The microbes *Geobacter sulfurreducens* and *Shewanella putrefaciens* are often studied because of their ability to directly transfer electrons to the electrode surface (Gude, 2016). However, other microorganisms play important roles too, either by transferring electrons indirectly or using soluble mediators. The type of organic waste used, whether it's glucose, acetate, or more complex substances, also plays a major role in how efficiently the MFC generates electricity and removes pollutants (Logan & Regan, 2006).

The design of MFC systems varies depending on the application, with options like single-chamber or double-chamber designs, and layouts such as upflow, stacked, or horizontal. Single-chamber MFCs are easier to manage but tend to produce lower power outputs. Double-chamber MFCs, on the other hand, provide better separation between the anode and cathode, which helps improve performance (Wang et al., 2015). Stacking multiple MFC units together in series or parallel has also proven to boost power output, making the system more efficient (Zhang & Liu, 2014).

There's also been a lot of work in MFC design and modeling to minimize energy losses and enhance performance. Different setups, such as air-cathode single-chamber MFCs, flat-plate MFCs, and membrane-electrode assembly MFCs, have been developed for specific needs. While newer designs show promise, the two-chambered "H-shaped" MFC remains one of the most widely used for research. It's simple and reliable, making it perfect for testing new components and fine-tuning operational conditions.

Modeling plays a key role in understanding and improving MFC performance. Whether through mathematical models, computer simulations, or electrochemical studies, modeling helps us figure out what factors influence MFC performance. These models are essential for optimizing designs, predicting behavior under different conditions, and ensuring that we can scale up the technology in real-world applications. Given the complexity of MFC systems, careful experiment design and enough repetition are crucial to getting accurate, repeatable results.

Electroactive Microbes:-

In MFCs, microbes play a vital role in converting organic materials into electricity. They do this by breaking down organic substrates under oxygen-free (anoxic) conditions and releasing electrons in the process. These electrons travel through intricate microbial electron transport chains, which include protein complexes, cytochromes, nanowires, and redox proteins, before being transferred to the anode of the MFC (Fredrickson et al., 2008; Kracke et al., 2015; Costa et al., 2018).

How these microbes transfer electrons to the electrodes can happen in two ways: through indirect electron transfer, using naturally occurring or added redox shuttles, or by direct extracellular electron transfer (Schröder, 2007; Lovley, 2012; Kumar et al., 2017; Martinez and Alvarez, 2018; Yang et al., 2012). Essentially, these methods allow microbes to efficiently pass their electrons to the anode and complete the cycle that generates power.

Interestingly, when it comes to the microbial communities in MFCs, it's not just one type of microbe that gets the job done. Mixed groups of microbes—both electrogenic (electron-producing) and electrotrophic (electron-consuming)—work together to produce more current than pure cultures. This is because these mixed communities cooperate to break down the available substrates more efficiently, forming biofilms that are crucial for the electron transfer process (Logan, 2009; Logan et al., 2019).

The performance of these biofilms can be boosted by carefully controlling the growth conditions, using tools like synthetic biology, and applying engineering techniques to optimize the microbial communities (Li et al., 2018a; Doyle and Marsili, 2015, 2018; Glaven, 2019; Angelaalincy et al., 2018; Chiranjeevi and Patil, 2020). Researchers have also been using advanced technologies like 'omics' tools, flow cytometry, and computational models to better understand how these microbial communities work and how they can be fine-tuned for better performance in MFCs (Rittmann et al., 2008; Lacerda and Reardon, 2009; Moran et al., 2013; Franzosa et al., 2015; Kouzuma et al., 2018; Koch et al., 2014; Haft and Tovchigrechko, 2012; Segata et al., 2013; Buttigieg and Ramette, 2014)

Efficient Electrode Materials in MFCs:-

In Microbial Fuel Cells (MFCs), picking the right electrode material is crucial for the system to work properly. The materials need to be biocompatible (so they don't harm the microbes), electrically conductive (to transfer electrons smoothly), non-corrosive (so they last longer), and stable over time. Wei et al. (2011) go into detail about the pros and cons of different materials and where electrode development might be headed in the future.

A big challenge with MFCs is finding affordable materials that still perform well. To keep costs low without sacrificing efficiency, researchers are turning to options like ceramics, lignocellulosic materials, and biochar. These materials are helping make MFCs more accessible. There's also been progress in making electrodes that interact better with the microbes. For example, Breheny et al. (2019) talk about improving bioelectrodes, which are electrodes that connect directly with the microbes. Pasternak et al. (2020) suggest that using surfactants can boost the performance of these systems.

The anode is especially important since it's where the microbes grow and transfer electrons. Carbon is the most popular choice for anodes because it's conductive, non-reactive, and works well with microbes (Logan, 2008). Carbon cloth and felt are especially useful because they're porous, offering more surface area for microbes to settle and form biofilms. On the other hand, materials like graphite sheets don't have as much space for the

microbes to grow. A breakthrough in MFCs came with the introduction of graphite brush anodes, which provided more surface area in the same reactor space, making the system more efficient.

Nanomaterials have also been a game-changer, increasing conductivity and surface area to improve overall performance (Liu et al., 2020). Gnana Kumar et al. (2013) explain how different anode materials and techniques can help microbes stick better, capture more electrons, and transfer them more efficiently. Finally, Cai et al. (2020) take a closer look at both traditional and modified anodes, showing how we can push MFC technology even further with better materials and designs.

Scaling Up:-

Over the past decade, Microbial Fuel Cells (MFCs) have seen a huge improvement in performance. Schröder (2011) points out that MFC efficiency has increased nearly a thousand times, from just a few microamps per square centimeter to over 1 milliamp per square centimeter. MFCs have made notable progress in power production at the microscale (Wang et al., 2011; Choi, 2015) and microfluidic levels (Yang et al., 2016b; Parkhey and Sahu, 2020).

While lab experiments with small amounts of liquid (microliters or milliliters) have helped us understand how MFCs work, the real challenge is to take this knowledge and apply it to larger systems for pilot-scale testing (Janicek et al., 2014; Butti et al., 2016). This is a crucial step for MFCs to become practical in real-world applications (Logan, 2010). To make scaling up MFCs a viable option, we need a thorough understanding of all the components and processes involved (Logan et al., 2015).

Results and Discussion

Membrane Fouling: A Roadblock for Scaling Up MFCs

One of the most significant challenges in making microbial fuel cells (MFCs) a practical solution for large-scale applications is the issue of **membrane fouling**. The proton-exchange membrane (PEM), a crucial component in traditional MFCs, separates the anode and cathode compartments and allows protons to pass through. However, when these membranes are used in wastewater environments, they face constant exposure to various contaminants. Over time, bacteria and other microorganisms accumulate on the membrane, clogging its pores and slowing down proton movement (Logan & Regan, 2006). Organic substances in the wastewater also stick to the membrane, adding another layer of obstruction. In addition, inorganic particles like salts and metal ions settle on the surface, further reducing its efficiency (Logan & Regan, 2006).

The effects of fouling are far-reaching. It hampers the membrane's ability to conduct protons, resulting in lower energy production. It also increases the internal resistance of the system, making the entire process less efficient. Over time, the membrane may degrade or fail altogether, leading to frequent replacements and driving up maintenance costs. These challenges make it hard to scale up MFCs for widespread use in industries like wastewater treatment or renewable energy generation (Wang et al., 2015).

Membrane-less MFCs: An Innovative Solution

To combat these issues, researchers are turning to **membrane-less MFC designs**. By completely removing the PEM, these systems sidestep the fouling problem entirely. Instead of using a membrane, they employ clever designs, such as physical barriers or specially cultivated microbial communities, to keep the anode and cathode compartments separate (Wang et al., 2015). This approach comes with several advantages. Without a membrane to worry about as shown in Fig.2, the risk of fouling drops to zero, making the system more reliable and easier to maintain. These systems have been shown to deliver better performance, often achieving higher power output and longer operational lifespans compared to traditional MFCs (Wang et al., 2015). They are also more cost-effective since there's no need for constant cleaning or replacing of membranes.

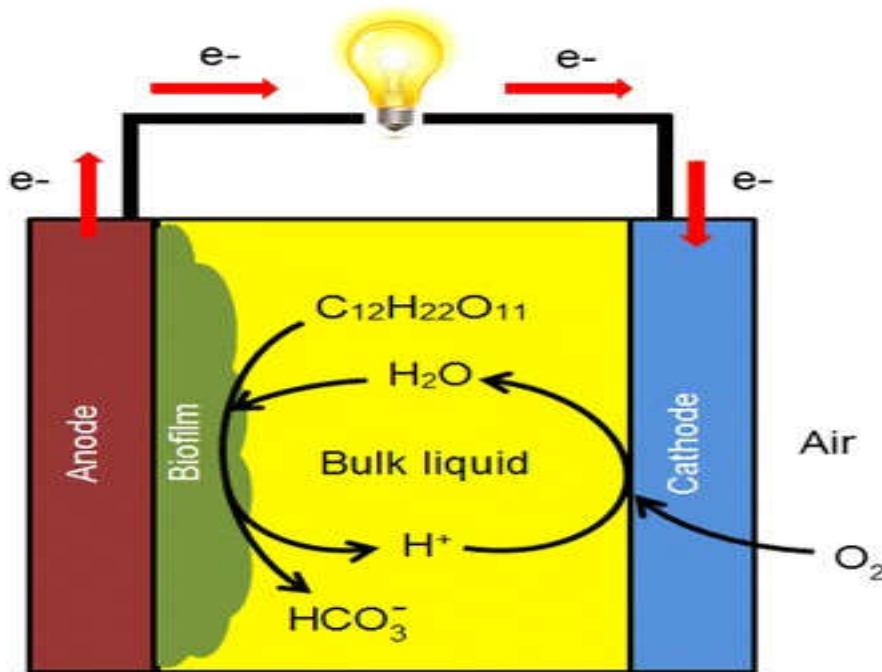


Fig.2-Single Chambered Membrane-less MFC, Bunpot S, Researchgate(*Modeling of a membraneless single-chamber microbial fuel cell with molasses as an energy source, 2014*)

However, membrane-less MFCs aren't perfect. They face challenges like mass transport limitations, where the lack of a dedicated membrane can disrupt the movement of protons and ions. Scaling these systems for real-world applications also remains a technical challenge. Additionally, ensuring their long-term stability and efficiency is crucial before they can become mainstream solutions (Wang et al., 2015).

Despite these hurdles, membrane-less designs represent an exciting direction for MFC technology. As research continues, solutions like these could help overcome the persistent problems of fouling and maintenance, bringing MFCs closer to becoming a practical and scalable solution for sustainable energy and wastewater treatment.

Electrochemical Techniques

To improve MFCs, electrochemical techniques are used to measure changes in performance and reduce losses. Key tools include cyclic voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy, and confocal resonance Raman microscopy, which help analyze the electroactivity of biofilms and performance factors like internal resistance and anode potential. Issues like power overshoot and voltage reversal also need to be addressed for better efficiency.

For beginners, there are tutorials and reviews that explain the basics of electronic circuitry, electrode configurations, and electroanalysis techniques like cyclic voltammetry and impedance spectroscopy. These resources also cover performance indicators and terminology to better understand microbial electrochemical systems. Given the variety of MFC designs, a standardized approach could help improve system analysis and performance.

Effect of Higher Organic Loading Rates on MFC Performance

Another significant challenge faced by microbial fuel cells (MFCs) is maintaining efficiency under **higher organic loading rates (OLR)**. While MFCs perform reliably with low-concentration organic waste, their effectiveness diminishes when exposed to higher concentrations. This performance drop stems from several interconnected issues:

1. **Byproduct Accumulation:** Excess organic matter leads to the production of inhibitory byproducts such as organic acids and alcohols, which disrupt microbial activity and reduce power output.
2. **Electron Transfer Limitations:** The metabolic burden on the microbial community increases, limiting their ability to transfer electrons to the anode effectively.
3. **Microbial Community Overload:** High OLRs can overwhelm the microbial ecosystem, leading to reduced microbial diversity and overall system inefficiency (Gude, 2016).

To address these challenges, advancements in **microbial engineering** are paving the way for innovative solutions. One approach involves the development of **microbial consortia** with specialized metabolic pathways, enabling efficient breakdown of complex organic compounds. Additionally, **strain optimization** focuses on selecting and enhancing microbial species with higher tolerance to elevated organic loads. These engineered microbes demonstrate improved capacity for energy extraction from organic matter, even under demanding conditions.

These strategies not only mitigate the negative effects of high OLRs but also expand the scope of MFC applications. Enhanced microbial communities make MFCs more efficient in treating diverse wastewaters, including industrial and municipal effluents. As a result, these advancements contribute to a more sustainable and scalable wastewater treatment process (Xu & Logan, 2012).

Advancing MFC Technology: The MFC-MEC Hybrid System

A significant advancement in microbial fuel cell (MFC) technology is its integration with **Microbial Electrolysis Cells (MECs)** to create a hybrid system capable of producing both electricity and hydrogen gas. While MECs function similarly to MFCs, their primary role is to generate hydrogen by splitting water and organic substrates using electricity (Zhang & Liu, 2014).

In this hybrid configuration, MFCs serve two essential purposes. First, they treat wastewater by breaking down organic matter through microbial activity, generating electricity as a byproduct. This electricity is then utilized by the MEC to drive the electrolysis of water, producing hydrogen and oxygen gases. This dual-output system depicted in Fig.3 effectively combines wastewater treatment with clean energy generation, offering a sustainable solution suitable for fuel cells and industrial applications (Wang et al., 2015).

The synergy between the two technologies enhances system efficiency. The electricity produced in the MFC supports the hydrogen generation process in the MEC, creating a highly integrated and energy-efficient cycle. Moreover, the additional hydrogen output increases the system's versatility and potential applications.

However, challenges remain. Improving the efficiency of the hybrid system, reducing costs, and scaling it for industrial-level applications are critical areas for further research. Continued efforts in system optimization, pilot-scale demonstrations, and supportive policy frameworks are essential to realize the full potential of this promising technology.

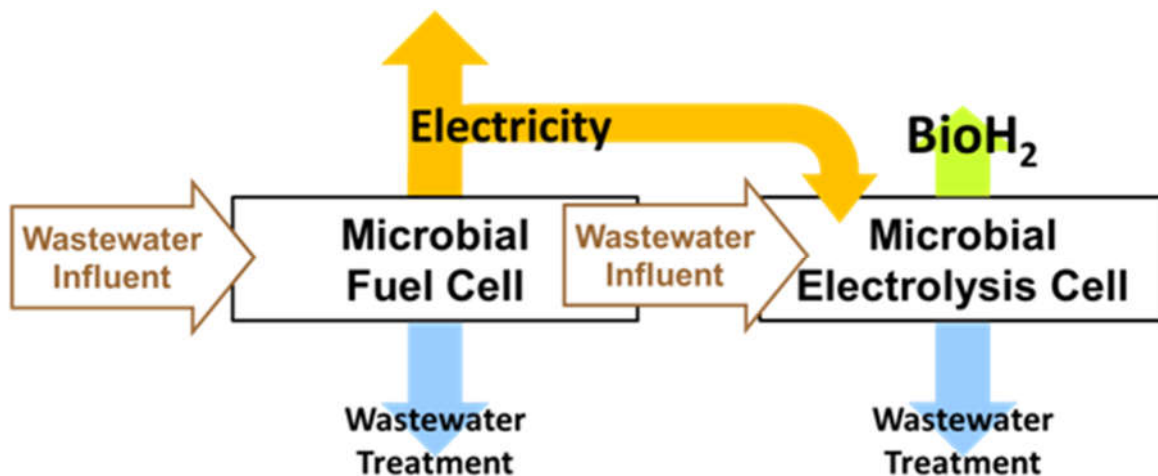


Fig.3-MFC-MEC Hybrid system by ArumHan(Texas A & M),SuSanA

Conclusion and Future Directions

Microbial Fuel Cells (MFCs) have made significant strides in demonstrating their potential to address critical challenges in energy production and wastewater management. By leveraging microbial metabolism to convert organic waste into electricity, MFCs offer a sustainable dual solution for clean energy generation and environmental remediation. However, practical implementation faces hurdles such as membrane fouling, oxygen leakage, and efficiency losses at higher organic loading rates. Innovative advancements, including the development of membrane-less systems, advanced proton-exchange membranes, and improved electrode configurations, are addressing these challenges. The integration of MFCs with Microbial Electrolysis Cells (MECs) for hydrogen production further expands their applications, enhancing their role in sustainable energy systems. Looking ahead, the focus must remain on optimizing materials, enhancing microbial performance, and scaling up MFC systems for real-world applications. Collaborative efforts between researchers, industries, and policymakers will be essential in overcoming existing barriers and accelerating the transition of MFC technology from experimental setups to widespread use.

As these efforts continue, MFCs hold the promise to significantly contribute to a more sustainable and cleaner future, underscoring their transformative potential in energy and environmental management.

Thanks and Information Note

The authors thank VIT Bhopal University, Bhopal for the support and infrastructure provided

References

1. Gude, V.G. (2016). Microbial fuel cells: Advances and applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(24), 24925-24940.
2. Logan, B.E., & Regan, J.M. (2006). Microbial Fuel Cells: Challenges and Applications. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5029-5036.
3. Wang, H., Li, X., & Zhang, H. (2015). Advances in Microbial Fuel Cell Technologies and Applications. *Environmental Science & Technology*, 49(24), 14108-14117.
4. Xu, P., & Logan, B.E. (2012). Scalable and Modular Microbial Fuel Cells. *Biochemical Engineering Journal*, 69, 3-9.
5. Zhang, L., & Liu, S. (2014). Microbial Electrolysis Cells for Hydrogen Production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 65-72.
6. Vishwanathan, A. S. (2021). *Microbial fuel cells: A comprehensive review for beginners*.
7. Naha, A., Debroy, R., Sharma, D., Shah, M. P., & Nath, S. (2023). *Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery*.
8. Wei, Y., Zhuang, L., & Li, H. (2011). Electrode materials for microbial fuel cells: A review. *Biophysical Journal*, 101(9), 2154-2161.
9. Hamelers, H. V. M., Ter Heijne, A., & Rozendal, R. A. (2010). Performance and application of microbial fuel cells. *Journal of Electrochemical Society*, 157(11), B1580-B1586.
10. Winfeld, M., Engelhardt, T., & Müller, M. (2016). Low-cost ceramics for microbial fuel cells: Development and testing. *Electrochemical Energy Reviews*, 6(3), 331-343.
11. Mehta, A., Kumar, S., & Singh, P. (2020). Ligno-cellulosic materials in microbial fuel cells: A sustainable approach. *Renewable Energy*, 148, 285-295.
12. Chakraborty, S., Das, S., & Ghosh, A. (2020). Biochar as an electrode material in microbial fuel cells: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 297, 122450.
13. Breheny, M., & Ghafari, M. (2019). Critical factors for bioelectrode performance in microbial fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*, 423, 31-46.

14. Pasternak, A., & Sundararajan, S. (2020). Enhancing microbial electrochemical system performance using surfactants. *Applied Energy*, 278, 115634.
15. Logan, B. E. (2008). Microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 42(17), 7101-7107.
16. Logan, B. E., & Regan, J. M. (2007). Microbial fuel cells—Challenges and applications. *Environmental Science & Technology*, 41(10), 4003-4010.
17. Liu, H., Cheng, S., & Logan, B. E. (2020). Power generation in microbial fuel cells using graphite brush anodes. *Bioresource Technology*, 102(24), 10871-10875.
18. Gnana Kumar, G., & Karthikeyan, K. (2013). Anode materials in microbial fuel cells: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 178(12), 905-922.
19. Cai, Z., & Sun, Y. (2020). Conventional and modified anodes for improved microbial fuel cell performance: A comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110020.
20. Li, B., Millán, D., Torres-Sánchez, A., Roman, B., & Arroyo, M. (2018). A variational model of fracture for tearing brittle thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 119, 334-348.
21. Doyle, E. L., & Marsili, E. (2015). Electrochemical properties of microbial fuel cells: A review. *Energy & Environmental Science*, 8(5), 1451-1464.
22. Doyle, E. L., & Marsili, E. (2018). Advances in microbial fuel cell technologies for waste treatment. *Biotechnology Advances*, 36(7), 1992-2003.
23. Glaven, R. H. (2019). Electrochemical methods for studying microbial fuel cells. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 11(2), 58-70.
24. Angelaalincy, M., Raj, R. G., & Ravi, S. (2018). Influence of microbial communities on the performance of microbial fuel cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186(1), 232-247.
25. Chiranjeevi, P., & Patil, S. (2020). Optimization of microbial communities in bioelectrochemical systems for enhanced power generation. *Bioresource Technology*, 312, 123643.
26. Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2008). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. McGraw-Hill.
27. Lacerda, M. T., & Reardon, K. F. (2009). Mathematical modeling of microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 150(2-3), 356-366.
28. Moran, M. A., & Hawkes, D. A. (2013). Microbial electrochemical systems: Insights into microbial communities and electron transfer mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 47(18), 10491-10500.
29. Franzosa, E. A., Hsu, T., & Segata, N. (2015). The influence of microbial community structure on environmental processes. *Nature Reviews Microbiology*, 13(7), 433-444.
30. Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2018). Microbial fuel cells: Recent advances in electrogenic microorganisms and their application. *Current Opinion in Biotechnology*, 51, 57-63.
31. Koch, C. R., & Rittmann, B. E. (2014). Microbial fuel cells: A new era for environmental biotechnology. *Biotechnology Advances*, 32(6), 1204-1216.
32. Haft, D. H., & Tovchigrechko, A. (2012). Computational tools for bioengineering microbial communities in MFCs. *Microbial Biotechnology*, 5(1), 1-9.
33. Segata, N., & Haegeman, B. (2013). Computational methods for analyzing microbial communities. *Nature Reviews Microbiology*, 11(4), 246-257.
34. Buttigieg, P. L., & Ramette, A. (2014). Exploring microbial community structure using high-throughput sequencing tools. *Microbial Ecology*, 68(1), 1-13.
35. Choi, Y. (2015). "Recent Progress in the Development of Microbial Fuel Cells: Design and Operational Characteristics." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 49, 1133-1147.

36. Parkhey, P., & Sahu, P. (2020). "Microfluidic Systems for the Optimization of Microbial Fuel Cells." *Biosensors and Bioelectronics*, 150, 111877
37. Janicek, K. A., et al. (2014). "Scaling up Microbial Fuel Cells for Real-World Applications." *Bioresource Technology*, 163, 178–186.
38. Butti, L., et al. (2016). "Challenges in Scaling up Microbial Fuel Cells for Pilot Testing and Commercial Applications." *Energy & Environmental Science*, 9(7), 2299–2307
39. Schröder, U. (2011). "Microbial Fuel Cells: A Review of Recent Developments." *Environmental Science & Technology*, 45(16), 7369–7380.
40. Logan, B. E. (2010). "Scaling Up Microbial Fuel Cells for Practical Applications." *Environmental Science & Technology*, 44(8), 2657–2661.
41. Logan, B. E., et al. (2015). "Practical Approaches to Scaling up Microbial Fuel Cells." *Bioresource Technology*, 195, 201–211.
42. Yang, L., et al. (2016b). "Development of Microbial Fuel Cells for Energy Harvesting from Microbial Communities." *Environmental Science & Technology*, 50(13), 7216–7224.
43. Wang, X., et al. (2011). "Recent Advances in Microbial Fuel Cells: From Fundamental Principles to Applications." *Energy & Environmental Science*, 4(6), 2049–2059.
44. Aziz, S., Rehman, A., Syed, F. S., Shah, S. A., Soomro, A., & Parkash, A. (2013). Prototype designing and operational aspects of microbial fuel cell – Review paper. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 1-12
45. Soomro, A., Shah, S. A., Rehman, A., Aziz, S., & Parkash, A. (2014). Modeling of a membraneless single-chamber microbial fuel cell with molasses as an energy source. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2-3), 1-9.
46. Sirinutsomboon, B. (2014). Modeling of a membraneless single-chamber microbial fuel cell with molasses as an energy source. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2-3), 1-9.

LOW-COST PRODUCTION OF TEXTURED FLEXIBLE SOLAR CELLS USING ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES

Laxmi Vandana

Research Scholar, Biju Patnaik University of Technology, Rourkela, Odisha, India
Dept of ECE, NIST University, Berhampur, Odisha, India
ORCID:0000-0002-2005-2794

Ujjal Dey

Department of ME, IIT Kharagpur, India

Subhasis Mahata

Department of ME, IIT Kharagpur, India

Sandipan Mallik

Dept of ECE, Faculty of Engineering, NIST University, Berhampur, Odisha, India
ORCID:0000-0001-9232-7411

Abstract

This study explores a low-cost approach for producing textured flexible solar cells using additive manufacturing techniques. Employing advanced nano 3D printing technology, we developed a reusable PMMA (Polymethyl Methacrylate) template capable of fabricating highly uniform texture surface. These templates were utilized to mold flexible substrates from PDMS (Polydimethylsiloxane), offering precise textured replication and structural integrity. The textured substrates were then employed to fabricate efficient textured solar cells. This method significantly reduces production cost while maintaining high precision and scalability, making it ideal for large-scale manufacturing. The textured design enhances light absorption, improving the efficiency of solar cell conversion. This innovative approach demonstrates the potential of integrating additive manufacturing and nanotechnology to create cost-effective and efficient solar cell energy solutions, paving the way of advancement in renewable energy applications.

Keywords— Textured solar cells, Additive manufacturing, Nano 3D printing, PMMA Template, PDMS, Flexible substrate.

INTRODUCTION

The global demand for sustainable and efficient energy solutions have driven significant advancement in solar cell technologies. Recent advancement in thin-film solar cell technologies have shown promise in reducing fabrication costs while maintaining high energy conversion efficiencies [1], [2]. However, low cost thin film solar cells have the disadvantage of reduced electrical transport properties. To address this challenge, textured flexible solar cells have emerged as a promising solution due to their ability to enhance light absorption, improve energy conversion efficiency while reducing the overall thickness of the device, lower material consumption, and adapt to various applications requiring flexibility [1]. Apart from efficiency improvement, the texturization of the surface has several other advantages such as, less space requirement to reach a given power capacity, reduced energy payback time, and above all, a lower cost per watt from the module. Various texturing methods such as plasma etching [3], chemical etching [4], ion beam etching [3], laser enhanced chemical etching [5] and photolithographic patterning [6] have been used to realize textured solar cells. However, conventional methods for fabricating textured solar cells often involve high production costs and complex processes, limiting their scalability and widespread adsorption. There is still a long felt need in the art to provide for textured flexible solar cells through a cost-effective route.

Texturing solar cells can be cost effective if the process involves lithography or pattern transfer. Nano 3D printing technology can create reproducible high throughput nano-textured surfaces [7]. Polymethyl methacrylate (PMMA) is a derivative of Methyl Methacrylate, a synthetic polymer. It is a light weight material

used for pattern transfer in Nano 3D printing processes [8]. Polydimethylsiloxane (PDMS), is another organic polymer widely used for prototyping of microfluidic chips. PDMS can also be used as flexible substrate for textured solar cell as it can be easily used to replicate the printed texture.

In this article, we present a novel method for the low-cost production of textured flexible solar cells using additive manufacturing techniques. We have fabricated a series of prototype textured flexible solar cells and characterized their performance. Nano-3D printing technology was used to create a reusable PMMA template, which is then used to fabricate a high-uniformity, flexible textured surface using PDMS. This textured surface serves as the substrate for the deposition of the solar cell layers, resulting in an efficient and cost-effective solar cell design. The key advantages of this approach include the ability to precisely control the surface texture, the reusability of the PMMA template, and the use of low-cost materials and scalable manufacturing techniques. By leveraging these advancements, we aim to contribute to the ongoing efforts in developing affordable and high-performance solar energy solutions. The flexible nature of the solar cells enables their integration into a wide range of applications, including wearable electronics, as well as portable power solutions.

METHODOLOGY

The present invention provides a method for fabrication of textured flexible solar cells, which is cost effective. This method thus significantly involves additively manufactured reusable positive textured template, and then obtains a positive textured flexible substrate by involving the negative textured template, and further deposits thin films and nanomaterials on the obtained positive textured flexible substrate to finally realize the textured flexible solar cells. The material used to manufacture positive textured template can be independently selected from a group of materials, which are nonreactive and insoluble in ethanol. In the present method, PMMA material is used to additively manufacture the positive textured template using nano 3D printing technology (Nanoscribe, Photonic Professional GT). To minimize air bubbles in PDMS, the mixture of Sylgard 184 Silicon elastomer PDMS and curing agent is kept at a vacuum pressure of 1 millitorr. The processed PDMS is then spin coated over the positive textured template at 3000 rpm for 240 s. Further, the coated textured template is ultrasonicated for 3 minutes to evenly spread the processed PDMS. The sample is annealed at 80 °C for 4 hours. The cured PDMS polymer based negative textured flexible substrate is carefully separated from the positive textured template by dipping sample in ethanol for 3 minutes. After separating the cured PDMS polymer, the PDMS is again poured and spin coated into the negative template, followed by ultrasonicated for 3 minutes and annealed at 80 °C for 4 hours. Finally, it is separated from the negative template and placed on glass substrate under plasma environment for better bonding. The positive textured PMMA template is cleaned by ultrasonication process and prepared for reuse. The detailed methodology for the fabrication of PDMS substitutes is available in our previously published work [9], [10].

RESULT AND DISCUSSION

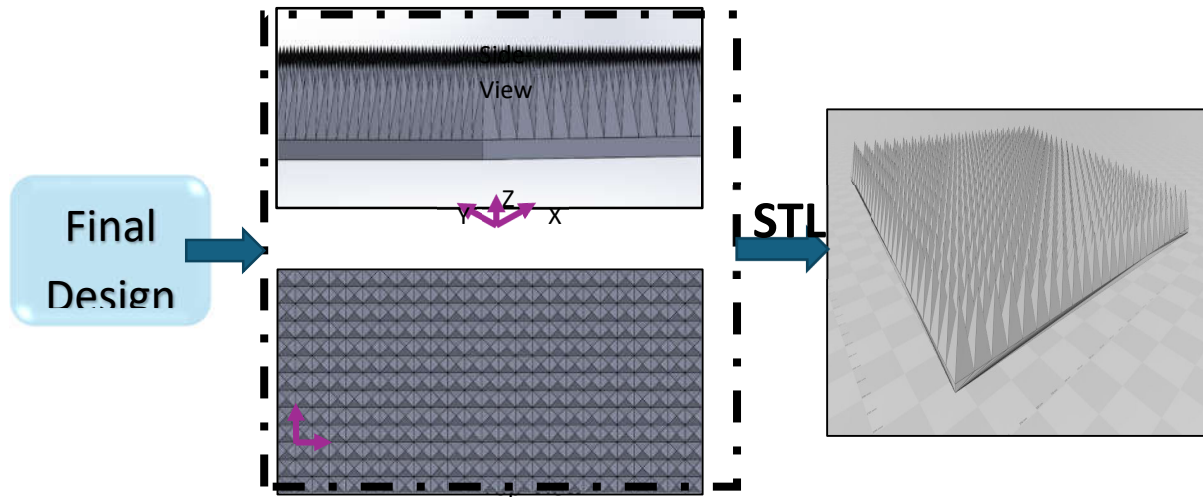


Figure 1: Design of the template using SolidWorks CAD software

The template pattern is initially designed using SolidWorks CAD software, where a detailed 3D model is created. This model is then converted into a stereolithography (STL) file format, which is widely used for 3D printing and nanofabrication applications due to its compatibility with various manufacturing processes. Once the design is in STL format, it becomes suitable for fabrication using any nanofabrication technique. For nanoscale 3D printing, the STL geometry undergoes slicing and hatching processes. Slicing divides the 3D model into thin layers, while hatching generates the coordinate points required for precise laser exposure. These points act as a guide for the laser system to accurately create the structure layer by layer. In this process, two critical parameters must be defined by the user: laser power and scan speed. Laser power determines the intensity of the laser used during fabrication. It is indirectly controlled by adjusting the voltage (ranging from 0 to 5 V) applied to an acousto-optic modulator (AOM). The laser power is typically expressed as a percentage and is multiplied by a power scaling factor to achieve the desired intensity. In this case, a laser power of 40% is used with a power scaling factor of 1. The scan speed refers to the speed at which the laser moves while writing the structure. It directly influences the writing precision and efficiency of the process. For this example, the scan speed is set to 10 mm/s, ensuring an optimal balance between accuracy and fabrication time. This careful selection and calibration of process parameters—laser power and scan speed—are crucial for achieving the desired structural fidelity and functional properties in nano 3D printing. Figure 1 represents the design methodology of the template using SolidWorks CAD software. Figure 2: (a), (b), (c) and (d) show the Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) images of the additively manufactured positive textured template under different magnification condition where the peak to peak distance between two pyramids was found to be $\sim 5.4 \mu\text{m}$ with a height of $6.23 \mu\text{m}$. The fabricated templates demonstrated high uniformity with their shape and size. The shape and dimensions of the negative template are optimized by exploring the figure of merits such as texture surface shape-size, enhancement of absorption, light trapping efficiency, the overall thickness of the device, material consumption, space requirement to reach a given power capacity due to enhanced efficiency, energy payback time and cost per watt from the module of the solar cell.

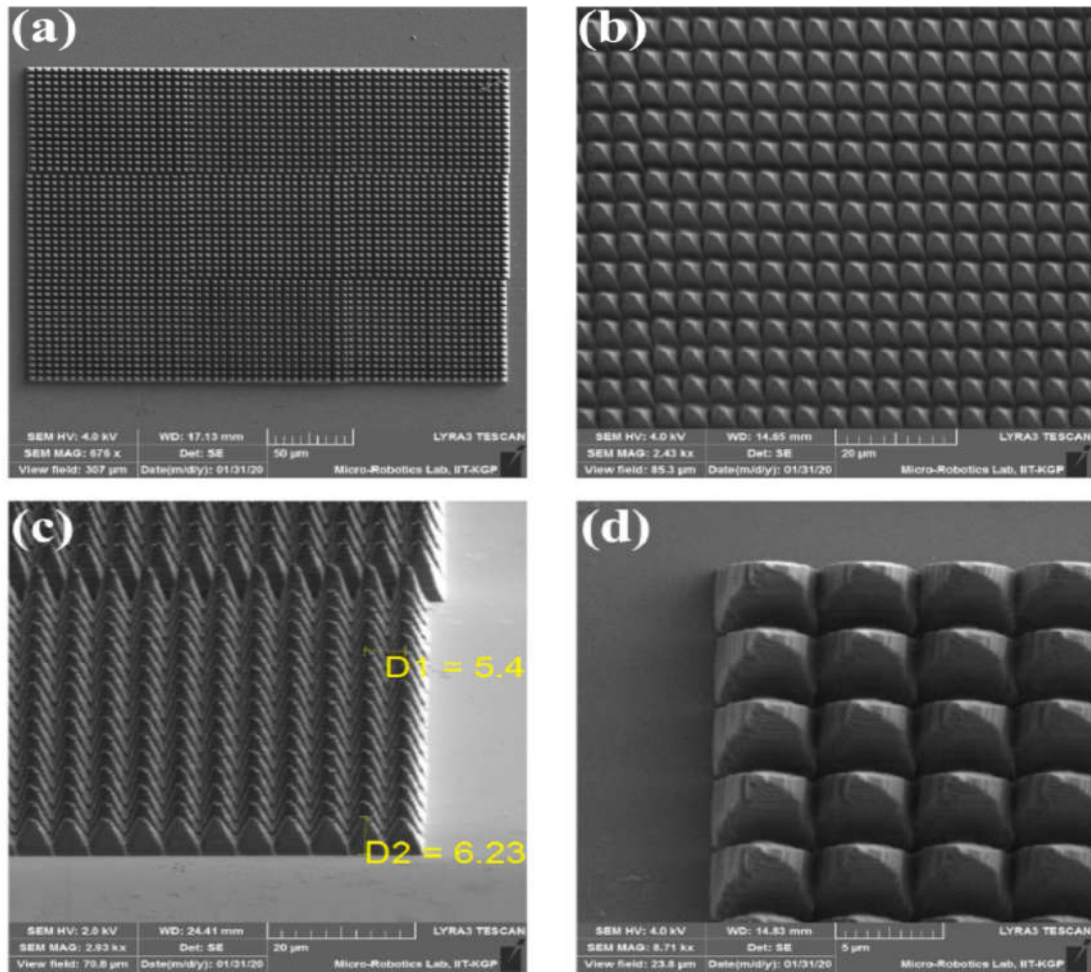


Figure 2: (a), (b), (c) and (d) show the Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) images of the additively manufactured positive textured template under different magnification condition.

Figure 3 illustrates the sequential steps involved in fabricating the textured PDMS substrate. The process begins with a PMMA template created using 3D printing, which acts as the initial mold. A pre-polymer mixture of Sylgrade 184 silicon elastomer and curing agent, prepared in a 10:1 ratio is spin-coated over this template to form a negative replica. Following thermal curing at 80 °C for 4 hours the negative template is separated and subsequently used to cast the final texture substrate. Ultrasonication ensures or uniform filling of the mold and a second curing cycle produces a flexible positive PDMS substrate. The substrate is finally peeled off and mounted on a glass plate displaying uniform texturing and structural fidelity [11].

Figure 4 demonstrates the proposed methodology for fabricating solar cells using the flexible and textured PDMS substrate as a base. The process involves sequential deposition of various functional layers, each tailored to optimize the performance of the solar cell. Initially a transparent conducting oxide layer is deposited on to the textured PDMS substrate to serve the electrode insuring both electrical conductivity and transparency. This is followed by the deposition of active layers comprising in organic or inorganic semiconducting materials are deposited to form the photovoltaic region, which is responsible for light absorption and charge generation. The deposition of these layers can be achieved using a variety of mythologist like spin coating, sputtering, evaporation or solution based process depending on the material and structural requirements. The textured surface of the PDMS substrate is instrumental in improving light trapping and enhancing the overall efficiency of the solar cell by reducing optical losses. This flexible fabrication approach highlights the potential of textured PDMS substrates in enabling advanced efficient and customizable solar cell design for diverse applications [12]–[14].

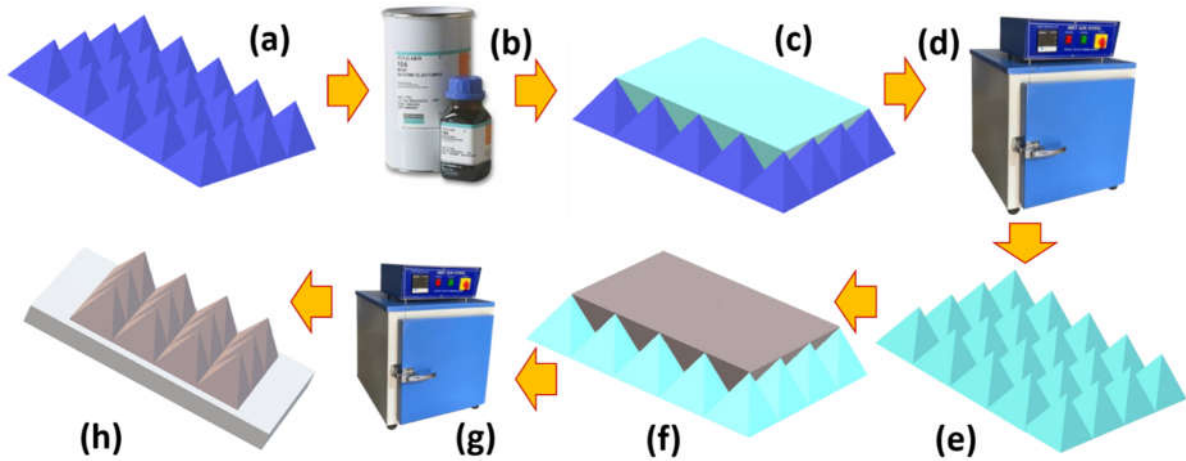


Figure 3: (a) PMMA template by 3D printing (b) Sylgrade 184 silicon elastomer and curing agent, mixed in 10:1 ratio (c) PDMS spin coated over PMMA template to make negative template (d) Heating at 80°C for 4 hr. (e) Separation of negative template (f) PDMS poured and ultrasonicated over the negative template (g) Heating at 80°C for 4 hr. (h) Positive flexible textured PDMS substrate peeled off and placed over glass plate.

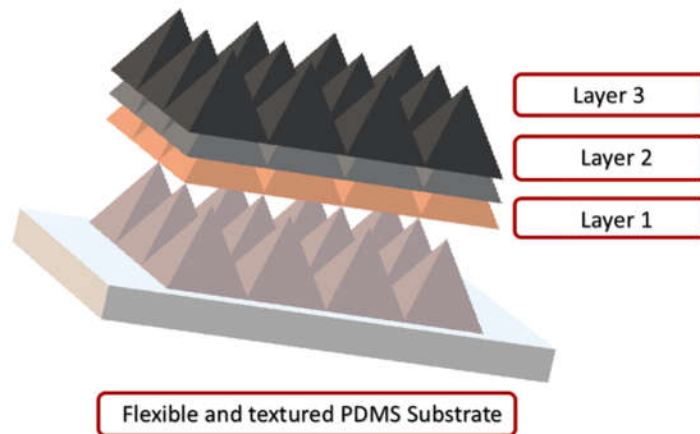


Figure 4: proposed cell structures can be formed by depositing various layers, including transparent conducting oxides, metals, and organic/ inorganic materials, using different deposition methodologies on a flexible and textured PDMS substrate

CONCLUSION

The method used in this work thus involves additive manufacturing of a reusable textured template, obtaining a positive textured flexible substrate and depositing thin films and nanomaterials on the positive textured flexible substrate to realize the textured flexible solar cells. The method disclosed in this work for fabricating textured flexible solar cells can be used in various solar-based product industries to achieve improved solar cells efficiency, reduced overall thickness of the device, lower material consumption, lightweight, require less space to reach a given power capacity due to higher efficiency, reduced energy payback time and a lower cost per watt from the module. Photovoltaic manufacturing industries, fabricating the large area solar cells are the potential buyers as it is the method that provides a low-cost way for producing textured solar cells by alleviating the need for specialized high-resolution techniques, expensive equipment and use of hazardous chemicals and its dispensing.

REFERENCES

- [1] L. C. Andreani, A. Bozzola, P. Kowalczewski, and M. Liscidini, "Photonic light trapping and electrical transport in thin-film silicon solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 135, pp. 78–92, 2015.
- [2] Y.-T. Huang, S. R. Kavanagh, D. O. Scanlon, A. Walsh, and R. L. Z. Hoyer, "Perovskite-inspired materials for photovoltaics and beyond—from design to devices," *Nanotechnology*, vol. 32, no. 13, p. 132004, 2021.
- [3] Y. Inomata, K. Fukui, and K. Shirasawa, "Surface texturing of large area multicrystalline silicon solar cells using reactive ion etching method," *Sol. energy Mater. Sol. cells*, vol. 48, no. 1–4, pp. 237–242, 1997.
- [4] K. Poorkazem, D. Liu, and T. L. Kelly, "Fatigue resistance of a flexible, efficient, and metal oxide-free perovskite solar cell," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 17, pp. 9241–9248, 2015.
- [5] R. D. Hussein and D. ISMAEL, "Review on Surface Texturing Method for Solar Cell Efficiency Enhancement," *J. Phys. Chem. Funct. Mater.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8.
- [6] S.-W. Lee *et al.*, "Perovskites fabricated on textured silicon surfaces for tandem solar cells," *Commun. Chem.*, vol. 3, no. 1, p. 37, 2020.
- [7] T. G. Pattison, S. Wang, R. D. Miller, G. Liu, and G. G. Qiao, "3D nanoprinting via spatially controlled assembly and polymerization," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, p. 1941, 2022.
- [8] U. Ali, K. J. B. A. Karim, and N. A. Buang, "A review of the properties and applications of poly (methyl methacrylate)(PMMA)," *Polym. Rev.*, vol. 55, no. 4, pp. 678–705, 2015.
- [9] A. R. Tripathy *et al.*, "Polymer matrix composite engineering for PDMS based capacitive sensors to achieve high-performance and broad-range pressure sensing," *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 3, p. 100062, 2021.
- [10] P. P. Pancham *et al.*, "Novel Graphene Transfer Method to Silicone and its Sensing Application on Porous PDMS," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 7, no. 5, 2023, doi: 10.1109/LSENS.2023.3265702.
- [11] Y. Xia *et al.*, "A glass–ultra-thin PDMS film–glass microfluidic device for digital PCR application based on flexible mold peel-off process," *Micromachines*, vol. 13, no. 10, p. 1667, 2022.
- [12] A. V. Shevlyagin *et al.*, "Textured stainless steel as a platform for black Mg₂Si/Si heterojunction solar cells with advanced photovoltaic performance," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 19, p. 6637, 2022.
- [13] K. S. Nalwa, J.-M. Park, K.-M. Ho, and S. Chaudhary, "On realizing higher efficiency polymer solar cells using a textured substrate platform," *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 112–116, 2011.
- [14] L. A. Dobrzański and A. Drygała, "Surface texturing of multicrystalline silicon solar cells," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 31, no. 1, pp. 77–82, 2008.

FEASIBILITY OF PV ALLOCATION OPTIONS**Mohamad Y. Mawlawi**

Research Assistant, American university of Beirut, Maroun Semaan Faculty of Engineering and Architecture,
Department of Mechanical Engineering, Beirut-Lebanon (Responsible Author)

Farid B. Chaaban

University Prof. Dr., American university of Beirut, Maroun Semaan Faculty of Engineering and Architecture,
Department of Electrical and Computer Engineering, Beirut- Lebanon

Abstract

The increasing global demand for energy, coupled with mounting concerns over the environmental and economic impacts of conventional fuel sources, has underscored the urgent need for more sustainable alternatives, notably solar energy. This study seeks to comprehensively examine various solar panel allocations taking into consideration the location and the sun's trajectory. The research delves into the optimal deployment methods of solar panels across residential, commercial, and utility-scale applications, taking into meticulous account factors such as geographical location, climate patterns, space availability, cost, and energy consumption profiles. The research mainly focuses on East-West panel layouts, comparing their environmental and economic effects to fixed south installations. Incorporating various tilt and azimuth angle settings further improves the study by illuminating how these modifications affect energy harvesting, cost-effectiveness, maintenance needs, and sustainability. Utilizing data gathered from solar atlases, accurate measurements of solar irradiance and other important parameters can be adopted. The study's conclusions provide a valuable comparative analysis of various allocation options. Through an analysis of the interactions between different types of panels, allocation algorithms, and sun trajectory modifications, this research seeks to improve the decision-making regarding the most effective use of solar energy resources in a variety of contexts.

Keywords: Solar energy, optimal panels deployment methods, allocation techniques, economic feasibility, solar atlas data, energy sustainability.

Introduction

Following the ongoing power outages and high energy prices, Lebanon urgently demands energy alternative and cleaner sources. Moreover, the reliance on privately- owned diesel generators has been straining the economy, aggravating pollution problems in residential areas, leading to overall environmental degradation. Hence, it is crucial to switch to sustainable and cleaner energy sources, such as solar, hydro and wind power, to lessen reliance on fuel markets, and patrially support Lebanon's fiscal and ecological stability.

The local industrial sector struggles to achieve output ambitions, and this negatively is affecting the job opportunities and leading to prices inflation. The percentage of electricity demand unmet by the power utility Électricité du Liban (EDL) has increased from 22% in 2008 to 37% in 2018, totalling around 8.1 TWh where the demand is expected to grow to 56% by 2025 [1,2].

Shortages of energy supply can be reduced by refocusing investments on upgrading and increasing generation capacity, including opportunities for renewable energy options. With this strategy, the nation's dependency on imported fossil fuels is reduced, power costs are stabilized, and GDP expansion is enhanced by the influx of jobs in the renewable energy industry, and the energy sector in general [1]. In addition, the strategy supports international initiatives to mitigate climate change and establishes Lebanon as an innovator in sustainable energy, luring foreign capital and boosting energy security.

Lebanon, a country that imports all types of fossil fuels, is progressively acknowledging the necessity of conserving the environment and saving energy through exploiting clean and renewable energy resources. PV panel installation on rooftops is one noteworthy initiative that makes the best use of the area in remote as well as highly populated urban areas.

The country is seeking more creative ways to promote renewable energy, such as solar farms in locations with abundant sunlight. For instance, the Beddawi Solar Farm in the North Governorate is a noteworthy project where enormous tracts of land are devoted to solar panels, considerably boosting the nation's potential for renewable energy [3].

The country is making great strides toward an improved and environmentally conscious energy landscape by improving the distribution and maximizing the output from renewable energy resources. Currently, distributed PV units mount to over 1000MW according to LCEC figures. It is also estimated that almost one third of residences in the country have installed rooftop PV panels.

Project Methodology

The project execution can be broken down into the following steps:

Step 1: Data collection

The first stage entails using web tools like solar atlases to collect information on how much sunshine hits different setups and how much electricity they pump off. The collected material is crucial to knowing how each arrangement could function in various conditions. The aim is to examine how much energy south-facing panels produce compared to East-West layouts, using data from these atlases.

Step 2: Construction analysis

The relevant information will be used to compare the south-facing panels against the East-West ones in greater detail. We'll examine how many panels each configuration may require and how they're placed, and we'll discover how these variations impact their output and efficiency. The objective is to determine the most efficient method of installing solar panels by integrating the sunlight data with a detailed examination of the panel positions and spacing.

Step 3: Economic feasibility

The last phase is to estimate the payback period and the financial benefits resulting from the deployment of these options. Considering the cost of land will enable us to determine whether which option will save on the cost. The corresponding payback periods are estimated using MATLAB.

Findings and Discussion

1- Project Specification and data:

Utilizing the solar atlas's capabilities, the sun data have been gathered at three azimuth angles: 90° for eastward direction, 180° for straight south, and 270° for westward orientation. We methodically modify the tilt angle within each azimuth angle to reveal subtle changes in solar collecting effectiveness. The investigation covers tilt angles from 2° to 35° in the southern direction and tilt angles from 2° to 20° in the eastern and western orientations, using 2-degree increments.

Taking a random location to be used in the software [4], Abdul Wahab Rifahi, AL JAAMEAH street in Beirut, which has the coordinates of 33.9018 latitude and 35.4834 longitude, has been selected as subject of our data-gathering activities. This site provides a typical case study to assess solar energy output in different scenarios. The use of solar atlas data considerably improves the accuracy and reliability of our solar energy studies. We may obtain precise solar energy metrics, such as sun trajectory information, solar radiation levels, and the best tilt angles for solar panel installations, by utilizing solar atlas data. Reputable institutions, including national meteorological agencies, research centers, and international organizations like the World Bank, generate solar atlases, which go through stringent validation procedures to guarantee their accuracy and reliability.

1.1-South Orientation Output:

After multiple runs of the solar atlas with a fixed azimuth angle of 180° and varying the tilt angle from 2° up to 35°, the monthly average kWh production of a (PV) system with a 1 kWp capacity was determined. With the use of this technique, we can determine the ideal tilt angle to maximize energy production all year round while accounting for seasonal fluctuations and patterns of solar irradiation.

After figuring out the average monthly energy output for a range of southern tilt angles, the average monthly data for each tilt angle has been used to show the entire amount of energy produced over a year and determine which tilt angle produced the most electricity, see the following Figure-1 where the tilt angle of 25° produces the highest output, which is around 1609.6 kWh for our desired location.

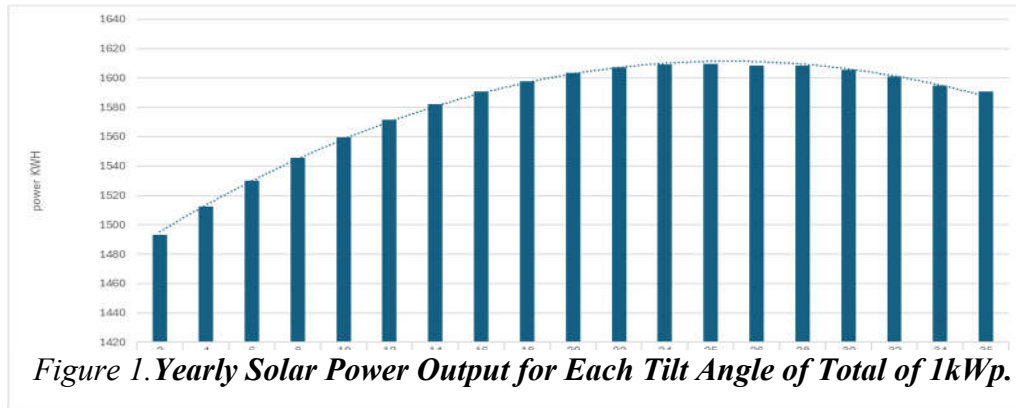


Figure 1. Yearly Solar Power Output for Each Tilt Angle of Total of 1kWp.

This result also aligns with the CEDRO report for Lebanon for solar panels which states that the optimal tilt angle for Lebanon differs from 25° to 30° [5] so 25° is in the right range to work on it.

1.2- East-West Output:

We examined the south-facing orientation first, then turned our attention to the east at a 90° azimuth angle. Then we turned to the west at a 270° azimuth angle.

Upon the examination of the data from the east and west orientations with varying tilt angle, we determined the values for each orientation corresponded to the same month and tilt angle. Using this method, we were able to combine the morning solar exposure from the east with the afternoon sun exposure from the west, thus simulating an East-West arrangement. To model and assess the potential for energy production from an East-West solar panel layout, we combined the data in this way.

The monthly data on energy production are combined for every tilt angle after examining in figure-2 the outcomes for the East-West arrangement to calculate the yearly output power. The results show that the output power consistently decreases with increasing tilt angle. Specifically, a yearly energy output of about 2944 kWh was obtained by commencing with a tilt angle of 2°. The annual energy production drops with the increased tilt angle; at 20°, the energy production was reduced to around 2820 kWh.

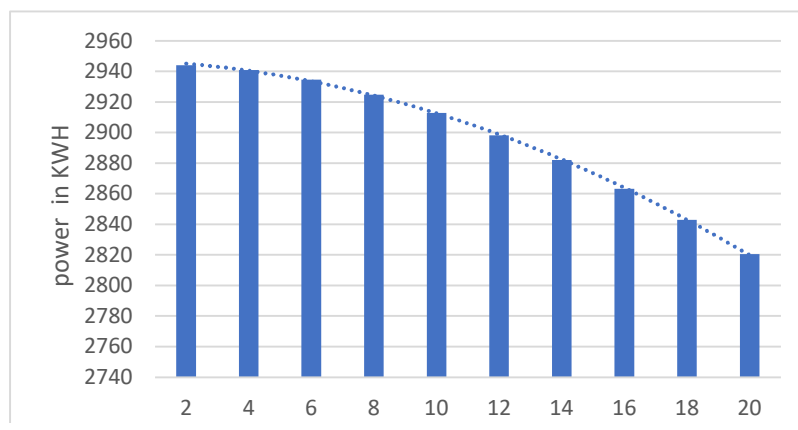


Figure 2. Monthly East-West summation for every tilt angle.

1.3- South VS East-West Setting:

The ideal tilt angle in the south orientation for optimum production was determined first, and then energy output at the South and East-West arrangement is deducted. We want to increase the kWp capacity in the south

calculations (using solar atlas) [4] while keeping the same tilt angle, deeming it optimal based on the previous comparison, to guarantee a fair comparison, particularly after merging the East-West orientations.

The energy generation varied significantly for the 2 alternative arrangements, based on the ideal tilt angle, the south-facing system had a larger area indicating that it generated more power per year, but the combined East-West showed a significant potential for energy production throughout the day.

In figure1, the optimum production in the south with the tilt angle of 25° has been considered, and with tilt angle of 2° for East-West in figure-2. With a Northern Hemisphere location, the solar panels are oriented 25° southerly for the best light exposure, and the system has a capacity of total of 2 kWp has the most of total output of 3219 kWh South, while the total of the East-West was 2944 kWh, as calculated in figure-3. The graph indicates a seasonal trend, with the highest power output occurring in June and July because of longer daylight hours and maybe more direct sunlight. On the other hand, December and January show a decrease in the amount of power generated, which is probably caused by fewer winter days and maybe fewer solar angles.

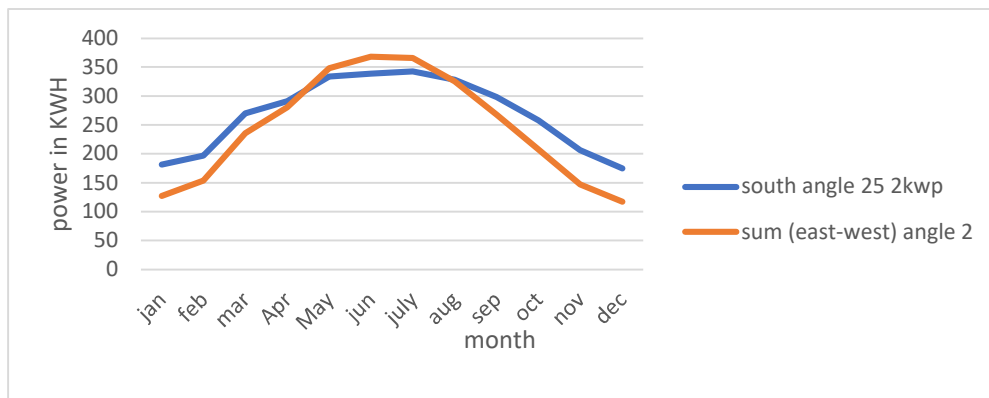


Figure 3. Comparison Between the Optimum East-West vs the Optimum South

A key factor in determining the total energy output and efficiency of the solar panel system is the physical positioning and arrangement of the solar panels which varies between the south-facing orientation and the combined East-West design, in addition to the system capacity and tilt angles. Maximizing energy output and guaranteeing the long-term performance and sustainability of solar energy systems require selecting the correct balance between system capacity, tilt angles, and panel arrangement.

The south configuration maximizes solar energy absorption while making effective use of the available space. But when the system capacity rises, more panels must be added this might result in panel crowding and shading problems. Alternatively, the panels are dispersed over both the eastern and western orientations in the combined East-West layout, thus resulting in a more balanced and dispersed energy capture throughout the day.

These construction aspects will be carefully examined to give complete insights since they are critical in evaluating the overall efficacy and efficiency of solar panel installations.

2- Construction analysis:

2.1-South Setting

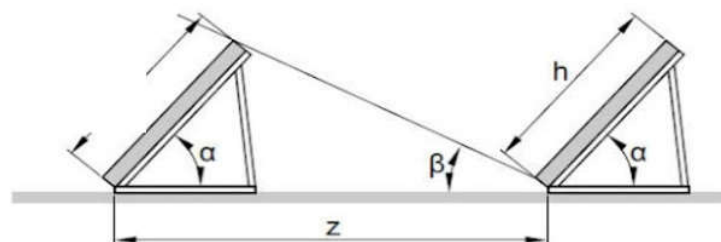


Figure 4. South- Orientation Panels Structure

All solar panels in both arrangements are assumed to be made of the same fundamental materials [6], and their location greatly affects how efficient they are. Figure 4 shows all the dimensions associated with the south model, [7], where: h is the panel height, α is the tilt angle, Φ is the latitude of the installation location north. β is the angle of incidence of the sunlight used to determine the shadow by north hemisphere formula between summer and winter (summer: $\beta=90-\Phi+23.27$, or winter: $\beta=90-\Phi-23.28$), and Z is the gap distance that should be taken between solar panels to avoid shading. Φ , the altitude location of Lebanon, is estimated at 33.9°.

$$1) \text{ winter: } \beta=90-\Phi-23.28 \quad \text{Eq. (1)}$$

$$2) \text{ summer } \beta=90-\Phi+23.27 \quad \text{Eq. (2)}$$

After finding Φ then β of the north hemisphere is determined, as shown in table 1:

Table 1. Angle of incidence beta during summer and winter for $\Phi=33.9^\circ$

	Winter	Summer
$\beta(\text{beta})$	32.829	79.369

Also taking in consideration the normal size of a 540 W panel $h=2.25$, $w=1.13$.

In reference to figure 4, the distance Z can be expressed as:

$$Z=h*\sin(180^\circ-(\alpha+\beta))/\sin(\beta) \quad \text{Eq. (3)}$$

This equation is used to find the optimum Z in order to minimize the shading factor while installing in the south-facing panels. In reference the results presented in table 2 and 3 the shadowing distance Z is consistently bigger during winter compared to summer. Therefore, the results of the winter are adapted to the summer since they can cater for the summer shading requirements. In reference to tables 2 and 3, as the height h is decreased, shading distance Z decreases significantly.

Table 2. Shadow Distance for the Panels of Height 2.25m

h	α	β (winter)	Z(dec)	β (summer)	Z(jun)
2.25	2	32.83	2.37	79.37	2.26
2.25	4	32.83	2.49	79.37	2.27
2.25	6	32.83	2.60	79.37	2.28
2.25	8	32.83	2.71	79.37	2.29
2.25	10	32.83	2.82	79.37	2.29
2.25	12	32.83	2.93	79.37	2.29
2.25	14	32.83	3.03	79.37	2.29
2.25	16	32.83	3.12	79.37	2.28
2.25	18	32.83	3.22	79.37	2.27
2.25	20	32.83	3.31	79.37	2.26
2.25	22	32.83	3.39	79.37	2.24
2.25	24	32.83	3.47	79.37	2.23
2.25	25	32.83	3.51	79.37	2.22
2.25	26	32.83	3.55	79.37	2.21
2.25	28	32.83	3.62	79.37	2.18
2.25	30	32.83	3.69	79.37	2.16
2.25	32	32.83	3.76	79.37	2.13
2.25	34	32.83	3.82	79.37	2.10
2.25	35	32.83	3.84	79.37	2.09

Table 3. Shadow Distance for the Panels were Turing Width to Height

h	α	β (winter)	Z(dec)	β (summer)	Z(jun)
1.13	2	32.83	1.19	79.37	1.14
1.13	4	32.83	1.25	79.37	1.14
1.13	6	32.83	1.31	79.37	1.15
1.13	8	32.83	1.36	79.37	1.15
1.13	10	32.83	1.42	79.37	1.15
1.13	12	32.83	1.47	79.37	1.15
1.13	14	32.83	1.52	79.37	1.15
1.13	16	32.83	1.57	79.37	1.14
1.13	18	32.83	1.62	79.37	1.14
1.13	20	32.83	1.66	79.37	1.13
1.13	22	32.83	1.70	79.37	1.13
1.13	24	32.83	1.74	79.37	1.12
1.13	25	32.83	1.76	79.37	1.11
1.13	26	32.83	1.78	79.37	1.11
1.13	28	32.83	1.82	79.37	1.10
1.13	30	32.83	1.85	79.37	1.08
1.13	32	32.83	1.89	79.37	1.07
1.13	34	32.83	1.92	79.37	1.06
1.13	35	32.83	1.93	79.37	1.05

2.2- East-West Setting

The term "East-West setting" refers to the arrangement of solar panels in a triangle form, see figure 5 [9], usually with panels facing both east and west orientations. This arrangement is common because it leads to more evenly distribute energy generation throughout the day when compared to south-facing orientation, which makes it a desirable choice for maximizing rooftop area usage and energy output. Taking in consideration the normal size of a 540 W Longi panel $h=2.25$, $w=1.13$ [6].

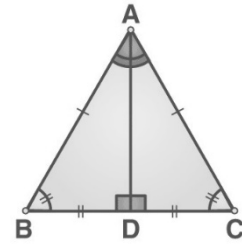


Figure 5. Structure for East-West

The attributes of a triangle are examined using the characteristics of the isosceles triangle ABC. Here, side AB remains constant at 2.25 m; where the increase in angle ABC causes a minor drop in inside lengths (BD and BC) and other angles (BAC and BAD). Focusing on length (BC) as we increase the tilt angle, the distance decreases, allowing practically for allocating more solar panels.

In what follows is the calculation procedure taking the optimal angle which is 2° in producing power by using the pervious formulas to calculate the length BC to find the area of the 2 solar panels located in an East-West configuration:

- 1) Assuming for square plot of 20m each side then the total area=400m²
- 2) Assuming the gap between the rows is 0.5m.
- 3) The total actual base for each East-West panel is: $B'=BC+0.5$ Eq.(4)
- 4) The corresponding area of each unit ($B' \times w$) is 5.6m², where w is the width of the panel.
- 5) Number of units that can be fitted = space area/area of 1 unit =71, and the total of panels is 142
- 6) Table-4 shows the number of panels for different base angle ABC.

Table 4. East-West number of panels for $h=2.25$

AB in m	angle (ABC)	angle (BAC)	angle (BAD)	length of BD	length BC	length of AD	Area of Triangle BAC in m ²	Area of Triangle with the gap by adding 0.5m	Area on the roof of panel $h=2.25, w=1.13$	total distance B'	panels
2.25	2	176	88	2.25	4.50	0.08	0.18	5.00	5.65		141.7
2.25	10	160	80	2.22	4.43	0.39	0.87	4.93	5.57		143.6
2.25	14	152	76	2.18	4.37	0.54	1.19	4.87	5.50		145.5

On the other hand, the same calculation is carried out, but instead the width of the panel became the new height having $h=1.13$, $w=2.25$, see Table 5..

Table 5. East-West Number of Panels for $h=1.13$

AB in m	angle (ABC)	angle (BAC)	angle (BAD)	length of BD	length BC	length of AD	Area of Triangle BAC in m ²	Area of Triangle with the gap by adding 0.5m	Area on the roof of panel $h=1.13, w=2.25$	total distance B'	panels
1.13	2	176	88	1.13	2.26	0.04	0.04	2.76	6.21		128.9
1.13	10	160	80	1.11	2.23	0.20	0.22	2.73	6.13		130.4
1.13	14	152	76	1.10	2.19	0.27	0.30	2.69	6.06		132.0

Also, as shown in table-4, the increase in the tilt angle will lead to a more space for more solar panels at 2°, such that, we have around 142 panels, and 146 panels for an angle of 14°. Table-5 shows the 2° tilt angle gave around 128 panels while increasing the tilt angle to 14° the panels increased having around 132 panels.

The south panel profile is shown in figure-4 with panels of height of 2.25 m and width 1.13 m at angle 25° which is the optimal tilt angle for our location.by first finding the rows and columns. The same procedure is followed to estimate the number of panels that can be fitted in the same plot area:

The corresponding number of rows is 5. Taking the panel width into consideration, the number of panels in each row is 17. Having 5 rows and each row having 17 panels gives a total of 102 panels, as shown in table-6

Table 6. South Setting- Number of Panels h=2.25

h	α	β (winter)	Z(dec)	panels
2.25	14	32.83	3.03	102
2.25	25	32.83	3.51	85
2.25	35	32.83	3.84	85

Taking the same formulas while exchanging h with w, (h=1.13, w=2.25) the results shown in table 7 show that increasing the tilt angle will lead to decrease in the number of the panels in the roof.

Both tables 6 and 7 show the number of panels that can be placed while increasing the tilt angle and also

Table 7. South Setting- Number of Panels h=1.13

h	α	β (winter)	Z(dec)	panels
1.13	14	32.83	1.52	104
1.13	25	32.83	1.76	88
1.13	35	32.83	1.93	80

changing the height of the solar panels from h=2.25 to h=1.13 has an effect on the number of panels. At the optimal tilt angle 25° table 7 when h was 1.13m shows to have around 88 panels more than when h was 2.25m at table 12 having around 85 panels. To optimize the optimal angle 25° at the south it should be taken h=1.13.

2.3 analysis of the results:

Compared to south-facing installations, cleaning, and maintenance are simpler in the East-West arrangement. East-West has simple access to every panel is made possible by the panel distribution Because they can move between rows more smoothly, and technicians can do maintenance with less time and effort compared to the South. The two optimized cases of the structure of the solar panels shows that the East-West configuration at angle 2° allowed to place more panels on the roof having around 142 panels. On the other hand, the South configuration at the optimal tilt angle 25° allowed to put around 88 panels.

3- Economic feasibility:

The final layout of the solar panels with an optimal angle for the South location of 25° and having dimensions of h=1.13m and w=2.25m. A total of 88 panels are fitted on the roof of 400 m² forming of total power expressed as the number of panels × power rating of each panel, and giving a value of 47.25kWp.

On the other hand, the East-West configuration managed to have 142 panels with an optimal tilt angle of 2° giving a total power of 76.68kWp.

An iterative computation to estimate the initial investment cost has been conducted for plot or land expenses per square meter ranging from \$1 to \$6000. The initial cost [11] for the south-facing arrangement is:

Table 8. Monthly Average Output of Different Orientations Solar Panels

Orientation	jan	feb	mar	Apr	May	jun	july	aug	sep	oct	nov	dec
South (output 47.52kWp)	4,362	4,709	6,441	6,941	7,952	8,055	8,171	7,750	7,121	6,136	4,939	4,194
East-West (76.68kWp)	4,918	5,931	9,068	10,800	13,385	14,138	14,062	12,420	10,327	7,978	5,690	4,543

$$C = \text{kWp of each panel} \times \text{The cost of 1kWp}$$

$$C_s = 81544\$ \quad \text{Eq.(5)}$$

where 47.52kWp was calculated above and 1716 is the cost of 1kWp. Similarly, total cost for the East-West orientation: $C_{ew} = 131582\$$ Eq.(6)

Table 9: Cost Input Parameters

Cost parameters	Units
Electricity Rate of EDL	0.27 cents
Private generator Rate	0.7 cents
Private generator Hours Per Day	15 hours
EDL Hours Per Day	4 hours
loan Interest Rate	5%
loan duration	20 years
Maintenance Cost South	2.5% of the total initial cost
Maintenance Cost EastWest	2% of the total initial cost
land cost	from 1\$ till 6000\$
price of 1 KWp (LCEC)	1716\$

Using the input data listed in tables 8 and 9, the analysis has been conducted using MATLAB to calculate the financial viability of South-facing and East-West solar panel configurations using several economic factors.. An average of 15 hrs per day was considered for private generators, and 4 hours from EDL. The loan interest rate is considered at 5% [13] taken over 20 years.

The total initial cost for the South-facing layout is $C_s=81544\$$. and the monthly energy production varies from 4193 kWh to 7951 kWh. Also, 2.5% of the entire initial cost is spent on maintenance each year.

The initial cost of the East-West configuration is 131582\$, with a monthly production ranging from 4542 kWh to 14138 kWh, and the maintenance cost is 2% of the entire original cost.

The annual energy production is calculated by summing the monthly values, yielding the annual private generator and EDL consumption, and savings.

Total annual savings are the sum of private generator and EDL savings.

The Capital Recovery Factor (CRF) is expressed as

$$i \times (1+i)^n / (1+i)^n - 1 \quad \text{Eq.(7)}$$

where i is the loan interest rate and n is the loan period. The annual loan payment is the product of the total Initial Cost and the CRF.

The payback period is determined from the total cost, including land cost (varying from 1 to 6000 \$/m² over 400m²), and the net annual savings for both configurations. Finally, the payback period is plotted against land costs and the results are displayed in figure 6.

Figure 6 presents the payback periods over a wide range of land cost. To have a clear view of the intersection point the cost axis has been scaled down from 6000 to 200.

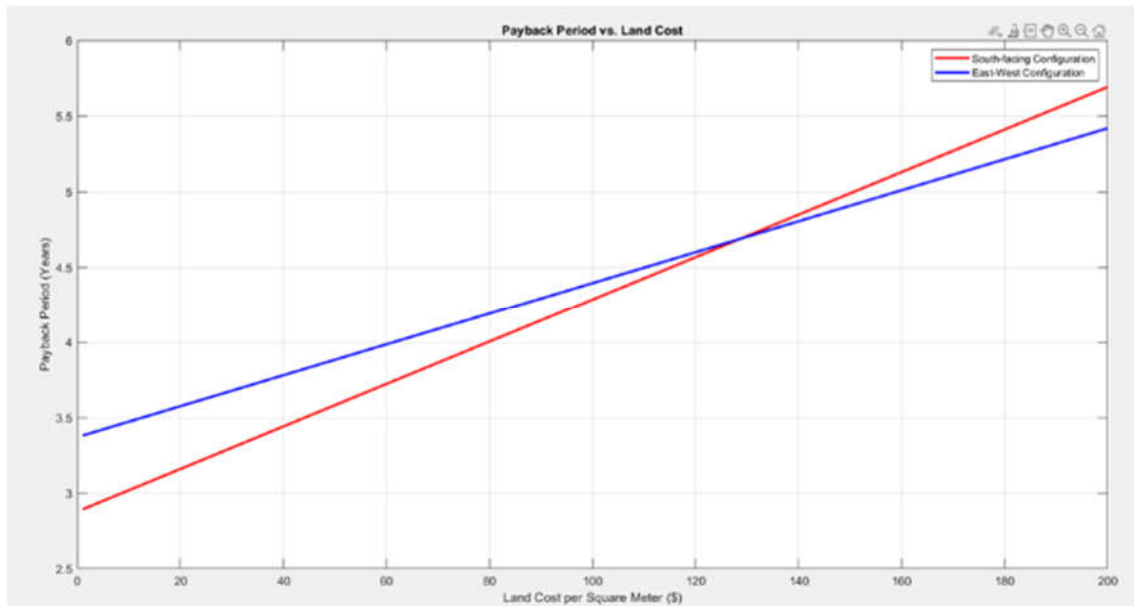


Figure 6. Payback period vs Land Cost, Zoomed-in Curve

The curves show that for a land price lower than around 130\$/m², the South setting is the more economic with shorter payback compared to the East-West. For a land cost above 130\$/m² the East-West becomes more economic with less payback period and more beneficial in consuming the area.

Conclusion

This paper has contrasted East-West and South-facing PV configurations, Location or PV settings play an important factor in terms of cost and cost savings. Economif feasibility of both options has been examined for a wide rane of estate prices. The results illustrate how both layouts' payback period are increased as land values increase. Initially, at relatively low land prices, the South configuration is more cost-effective, but as land prices rise up to levels above 128\$/m², the East-West option becomes more economic and with shorter payback period.

This work underscores the importance of detailed planning and analysis in the successful deployment of PV technologies, contributing to the broader efforts towards sustainable energy solutions. East-West

Thanks and Information Note

The authors are thankful to Dr. Nesreen Ghaddar and Dr. Mohammad Ahmad for their innovative ideas and insightful input in my research. The appreciation also goes out to Ms. Amal Assaad for the assistance in using MATLAB and in analyzing the obtained results.

References

- [1] World Bank. Distributed Power Generation for Lebanon Market Assessment and Policy Pathways. 20 May 2020.
- [2] Chaaban, Farid B, and Mohammad Akkawi. "National Capacity Self Assessment for Non-Annex I Nations: The Case of Lebanon." *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 3, no. 3, 2021, pp. 199–209, www.econjournals.com/index.php/ijeeep/article/view/472.
- [3] United Nations Relief and Works Agency for Palestine Refugees in the Near East (Lebanon). "Development Aid." *development Aid*, 20 Mar. 2023,

www.developmentaid.org/tenders/view/1081892/provision-and-installation-of-solar-system-off-grid-to-operate-1-well-in-beddawi-camp-quick-wins-pv.

- [4] Solargis. (n.d.). Global solar atlas. <https://globalsolaratlas.info/detail?c=33.901758%2C35.483453%2C19&s=33.901836%2C35.483458&m=site&pv=small%2C180%2C20%2C1>
- [5] UNDP. Solar Photovoltaic Systems for Residential Home Owners:A Guide to Selecting Your Solar System with Battery Storage. Sept. 2021
- [6] Solar panel - 540W -longi. Waked Electronics. (n.d.). https://wakedelectric.com/products/solar-panel-545w-longi?srsId=AfmBOopzjFmPUuG_xvWpqrC0_2LI0edeqvflfKoRUzwM27enhmadL_4
- [7] Shade Calculator. EasySolar. (2022, September 6). <https://easysolar.app/en/shade-calculator/>
- [8] Section 6.1 – law of sines objective: TSWBAT use the law of sines and areas of oblique triangles to solve real-life problems. Pa Common Core Standards: - ppt download. Slide Player. (n.d.). <https://slideplayer.com/slide/10749641/>
- [9] Admin. (2022, August 30). Isosceles triangle - definition, properties, angles, area, formula, examples. BYJUS. <https://byjus.com/maths/isosceles-triangle>
- [10] Avenston. (2023, August 7). East-West solar power plants. <https://avenston.com/en/articles/East-West-case/#:~:text=When%20using%20the%20east%2Dwest,using%20the%20east%2Dwest%20system>.
- [11] The 2020 - solar PV status report - LCEC. (n.d.). <https://www.lcec.org.lb/sites/default/files/2022-08/2020 Solar PV Status Report - Final.pdf>
- [12] Kanso, C. New EDL tariffs: A step towards the light or a shot in the dark?. Badil. <https://thebadil.com/analysis/new-edl-tariffs-a-step-towards-the-light-or-a-shot-in-the-dark/#:~:text=Then%20last%20November%20EDL%20approved,rate%20to%20begin%20in%20February>.
- [13] Forbes Magazine. Best solar panel loans of 2024. Forbes. <https://www.forbes.com/advisor/personal-loans/solar-panel-loans/>

**DETERMINATION OF OPTIMUM INSULATION THICKNESS FOR DIFFERENT WALL TYPES AND DIFFERENT FUEL TYPES****Dr. Öğr. Üyesi Alper Buğra ARSLAN**

Batman Üniversitesi, Türkiye, ORCID NO: 0000-0001-9964-2342

Doç. Dr. Hakan KARAKAYA

Batman Üniversitesi, Türkiye, ORCID NO: 0000-0001-9242-6233

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

Batman Üniversitesi, Türkiye, ORCID NO: 0000-0002-6874-1564

Abstract

Today, the importance of environmentally friendly applications and energy saving is increasing day by day. Insulation materials play an important role in reducing heat loss, increasing energy efficiency and reducing the emission of harmful gases such as CO₂ and SO₂ in buildings. Determining the thickness of the insulation material to be applied to a building at the optimum level is of great importance in terms of both economy and energy saving. The study aims to determine the optimum insulation thickness for different wall types, different insulation materials and fuel types. Thus, a scientific approach will be presented to increase energy efficiency, reduce economic costs and minimize environmental effects. The study was carried out by taking the 10-year heating day-degree (HDD) average of Aydın province. Bims block wall type and iso brick wall type were selected to be used in the building. EPS (expanded polystyrene rigid foam) and XPS (extruded polystyrene foam) materials were selected as insulation materials. The fuel types selected in the study are coal, natural gas and fuel-oil. In addition, the payback period was calculated depending on the optimum insulation thickness for two wall types, two insulation materials and three fuel types. As a result of this calculation, it was seen that the shortest payback period (1.71 years) was achieved when the bims block wall type and eps insulation material were used and fuel oil was used as fuel. The longest payback period was seen in the case of the insulated brick wall type, xps insulation material and natural gas as fuel (7.88 years).

Keywords: Optimum insulation thickness, CO₂ emissions, SO₂ emissions.**OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ FARKLI DUVAR TÜRLERİ VE FARKLI YAKIT TÜRLERİ İÇİN BELİRLENMESİ****ÖZET**

Günümüzde çevre dostu uygulamalar ve enerji tasarrufunun önemi her geçen gün artmaktadır. Bilhassa binalarda ısı kaybını düşürmek, enerji verimliliğini arttırmak ve CO₂, SO₂ gibi zararlı gazların salınımının azaltılması noktasında yalıtım malzemeleri önemli bir rol oynamaktadır. Bir binaya uygulanacak yalıtım malzemesinin kalınlığının optimum seviyede belirlenmesi hem ekonomik hem de enerji tasarrufu açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmada farklı duvar türleri, farklı yalıtım malzemeleri ve yakıt türleri için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesini amaçlamaktadır. Böylece, enerji verimliliğini artırmak, ekonomik maliyetleri düşürmek ve çevresel etkileri minimize etmek için bilimsel bir yaklaşım sunulacaktır. Çalışma Aydın ilinin 10 yıllık ısıtma gün-derecesinin (HDD) ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Binada kullanılmak üzere bims blok duvar tipi ve izo tuğla duvar tipi seçilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak ise eps (genleştirilmiş polistiren sert köpük) ve xps (ekstrüde polistiren köpük) malzemeleri seçilmiştir. Çalışmada seçilen yakıt türleri ise kömür, doğalgaz ve fuel-oil yakıtlarıdır. Ayrıca iki duvar tipi, iki yalıtım malzemesi ve üç yakıt türü için optimum yalıtım kalınlığına bağlı olarak geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Bu hesaplama neticesinde bims blok duvar tipi ve eps yalıtım malzemesi ve yakıt olarak fuel-oil kullanıldığında en kısa geri

ödeme süresine (1.71 yıl) ulaşıldığı görülmüştür. En uzun geri ödeme süresi ise izo tuğla duvar türü, xps yalıtım malzemesi ve yakıt olarak da doğalgazın kullanıldığı durumda (7.88 yıl) görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Optimum yalıtım kalınlığı, CO₂ emisyonu, SO₂ emisyonu.

GİRİŞ

Son yıllarda enerji verimliliği, artan enerji maliyetleri ve çevresel etkiler sebebiyle büyük önem kazanmıştır. Enerji tasarrufunun binalardaki uygulamasında en etkili yöntemlerden bir tanesi, doğru ve etkin yalıtım uygulaması olmaktadır. Yalıtım sayesinde ısı kayıpları minimize edilerek ısıtma ve soğutma giderleri de azaltılmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesindeki bu süreç BM'in 11. Maddesi ile doğrudan ilişkili olmakla beraber global karbon ayak izini düşürülmesine de katkı sunmaktadır. Fakat yalıtım kalınlığının gereğinden fazla ya da az seçilmesi ekonomik açıdan verimsiz ya da yetersiz olabilmektedir. Tüm bu sebeplerden ötürü, farklı duvar tipleri, farklı yalıtım malzemeleri ve farklı yakıt türleri göz önüne alınarak yalıtım kalınlığının optimum olarak belirlenmektedir. Bu durum, hem daha az emisyonla hem de daha az toplam maliyete doğrudan etki etmesinden dolayı 21. Yüzyılın ilk çeyreğinden bu yana giderek artan oranda önem taşımaktadır. Optimum yalıtım kalınlığı analizinde, yalıtım malzemesinin termal iletkenlik katsayısı, maliyeti, duvarın termal özellikleri, iklim koşulları ve kullanılan yakıt türü bu analizde ana faktörlerdir.

Rossi ve arkadaşları [1] çalışmalarında, 70'li yıllarda İtalya'da gerçekleştirilen ilk enerji düzenlemelerinden önce ülkede inşa edilen ofis binalarının ısıtma ve soğutma sistemi için artış gösteren enerji tüketimini incelemişlerdir. Dinamik enerji simülasyon yazılımını (Design Builder) kullanarak, mevcut bir ofis binasının dış cephesine uygulanan ısı yalıtımının enerji ve ekonomik etkilerine ilişkin bir analiz çalışması gerçekleştirmişlerdir. Jafri ve arkadaşı [2] konut binalarının duvarları için iki ısı yalıtım malzemesinin kombinasyonu için optimum kalınlığın, yaşam döngüsü maliyeti temelinde analiz edilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında optimum yalıtım kalınlığını belirlemek için iki farklı ısı yalıtım malzemesi EPS (Genişletilmiş polistiren) ve cam yünü'nün kombinasyonunu kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda iki ısı yalıtım malzemesi kombinasyonunun ekonomik açıdan daha faydalı olabileceğini görmüşlerdir. Akan [3], Türkiye'nin tüm şehir merkezlerindeki binaların ısı yalıtımı için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi ve modellenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Türkiye'de en çok kullanılan XPS, EPS, PUR ve taş yünü ısı yalıtım malzemelerini seçmiştir. Sadece ısıtma, sadece soğutma, ısıtma ve soğutmaya ihtiyaç duyan binaların Derece-Gün sayısına bağlı olarak optimum yalıtım kalınlığını belirleyen tüm şehir merkezleri için on iki farklı model geliştirmiştir. Böylece optimum yalıtım kalınlığını belirlemede pratik bir yaklaşım oluşturmuştur. Oluşturulan yaklaşımda regresyon analiz modellerinin uygunluğunu MATLAB R2019a programı kullanılarak gerçekleştirmiştir. Basrawi ve arkadaşları [4] çalışmalarını, yaşam döngüsü maliyet analizini kullanarak binalar için yalıtım malzemelerinin optimum kalınlığını açıklığa kavuşturmak amacıyla gerçekleştirmişlerdir. Malezya ikliminde kil tuğla, kum çimento tuğla ve beton gibi yaygın dış duvarları araştırmışlardır. Taş yünü, fiberglas ve ekstrüde polistiren yalıtım malzemelerini kullanarak optimum kalınlıkları incelenmişlerdir. Çalışılan tüm yalıtım malzemeleri arasında fiberglas üretiminin en uygun maliyetli olduğunu görmüşlerdir.

MATERYAL VE METOT

Çalışmada Aydın ilinin 10 yıllık ısıtma değerleri MGM'den [5] temin edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerin aylara göre dağılımı ve yıllık toplamı Tablo 1'de gösterilmektedir. Isıtma değerleri 2014 ile 2023 yılları arasında seçilmiş olup ortalama yıllık ısıtma derece gün sayısı 998 (hdd) olarak bulunmuştur. Hesaplamalar, $T \leq 15^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenen ısıtma derece-gün değeri esas alınarak yapılmıştır.

Tablo 1. Aydın ilinin 10 yıllık ısıtma (HDD) değerleri

Yıl	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara	Yıllık
2023	222	253	121	45	-	-	-	-	-	-	65	148	854
2022	326	224	283	25	-	-	-	-	-	-	77	167	1102
2021	236	170	205	51	-	-	-	-	-	-	55	224	941
2020	320	218	136	24	-	-	-	-	-	-	106	177	981
2019	294	208	131	58	-	-	-	-	-	-	29	228	948
2018	291	157	72	3	-	-	-	-	-	15	88	296	922
2017	360	219	133	34	-	-	-	-	-	4	157	209	1116
2016	304	121	137	3	3	-	-	-	-	4	122	363	1057
2015	306	242	176	73	-	-	-	-	-	6	72	301	1176
2014	218	187	140	25	-	-	-	-	-	3	122	189	884

Çalışmada Ege bölgesinde sıkça tercih edilen iki duvar tipi olan bims blok duvar ve izo tuğla duvar tipi seçilmiştir. Ele alınan iki duvar tipinin yapısal özellikleri [6] tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Gerçekleştirilen çalışmada ele alınan duvar yapısı

Duvar Tipi	Duvar Yapısı	Kalınlık (m)	k (W/m.K)	R (m ² K/W)	R duvar (m ² K/W)
Bims Blok Duvar	İç Sıva (Alçı)	0.02	0.51	0.0392	0.5246
	Bims Blok	0.15	0.60	0.2500	
	Dış Sıva (Çimento Harçlı)	0.02	0.87	0.0230	
	R _{iç}	-	-	0.1670	
	R _{dış}	-	-	0.0454	
İzo Tuğla Duvar	İç Sıva (Alçı)	0.02	0.51	0.0392	1.0663
	İzo Tuğla Duvar	0.19	0.24	0.7917	
	Dış Sıva (Çimento Harçlı)	0.02	0.87	0.0230	
	R _{iç}	-	-	0.1670	
	R _{dış}	-	-	0.0454	

Isı yalıtımı için dış duvarda sıkça kullanılıp piyasada bulunabilirliği yüksek olan iki malzeme eps (genleştirilmiş polistiren sert köpük) ve xps (ekstrüde polistiren köpük) yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemelere ait ısı yalıtım değeri (k-W/mK) ve birim maliyeti (TL/m³) özellikleri [7] tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3. Yalıtım malzemesi özellikleri

Yalıtım Malzemesinin Adı	k (W/mK)	Maliyeti (TL/m ³)
Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (eps)	0.03	2562
Ekstrüde Polistiren Köpük (xps)	0.04	2409

İki farklı duvar ve iki ısı yalıtım malzemesi için mevcut piyasadaki alternatif üç yakıt türü (kömür, doğalgaz ve fuel-oil) kullanılmıştır. Böylelikle 12 (2 x 2 x 3) farklı durum oluşturulmuş ve incelenmiştir. Kullanılan bu yakıtların özellikleri [6] tablo 4’te gösterilmektedir.

Tablo 4. İncelenen yakıtların özellikleri

Yakıt	C _f	H _u	η	Kimyasal Formülü
Kömür	4.5 TL/ kg	19.794 x 10 ⁶ J/kg	0.65	C _{5.85} H _{5.26} O _{1.13} S _{0.008} N _{0.077}
Doğalgaz	6.66 TL/m ³	34.526 x 10 ⁶ J/m ³	0.93	C _{1.05} H ₄ O _{0.034} N _{0.022}
Fuel-oil	27.19 TL/kg	41.317 x 10 ⁶ J/kg	0.8	C _{7.3125} H _{10.407} O _{0.04} S _{0.026} N _{0.02}

HESAPLAMALAR

Hesaplamlarda yaşam döngüsü maliyet analizinden (LLCA) faydalanılmıştır. Aydın ilinin 10 yıllık ısıtma değerlerinin ortalaması alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Gelecek Değer Faktörü (PWF): Yatırımın belirli bir faiz oranında ve süreçte nasıl büyüyeceğini ifade eden bir terimdir. Bu faktör ile yatırımın bugünkü değerden yola çıkarak gelecekte ne kadar olabileceğinin hesaplanmasında kullanılır. Çalışmada enerji maliyeti, ısıtma maliyeti, yalıtım maliyeti bu faktörden faydalanılarak ve belirlediğimiz 10 yıllık zaman periyoduna göre hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu faktörün hesaplanmasında ele alınan değerler; faiz değeri % 0.5, enflasyon değeri % 0.4938 ve gerçek faiz oranı % 0.00415 olarak belirlenmiş ve hesaplama bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Optimum yalıtım kalınlığı: Bir binanın veya yapının enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için gereken yalıtım malzemesi kalınlığıdır. Bu kalınlık, enerji tasarrufunu artırırken, yalıtım maliyetlerini ve enerji tüketimini minimize eder. Optimum yalıtım kalınlığı (x_{opt}) (1) numaralı denklemden faydalanılarak bulunmuştur.

$$x_{opt} = 293.94 \cdot \left(\frac{HDD \cdot C_f \cdot PWF \cdot k}{H_u \cdot C_i \cdot \eta} \right)^{\frac{1}{2}} - k \cdot R_{TD} \quad (1)$$

Bu denklemden kullanılan; *HDD* ısıtma derece gün sayısı, *C_f* yakıtın fiyatını (TL/m³, TL/kg), *PWF* gelecek değer faktörünü, *k* yalıtım malzemesi ısı iletim katsayısını, *H_u* yakıtın alt ısı değerini (J/kg, J/m³), *C_i* yalıtım malzemesinin birim fiyatını (TL/m³), *η* ise yakıtın verimini ifade etmektedir.

SAYISAL SONUÇLAR

Çalışma neticesinde tüm durumlar için tespit edilen optimum yalıtım kalınlığı değerleri tablo 5 ve tablo 6’te gösterilmektedir. Tablo 5 ve tablo 6’deki tüm durumlar göz önüne alındığında izo-tuğla duvar, xps yalıtım malzemesinin olduğu ve yakıt olarak doğalgazın kullanıldığı durumda, en düşük optimum yalıtım kalınlığına (0.011 m) ulaşıldığı görülmektedir. En yüksek optimum yalıtım kalınlığına ise bims blok duvar, xps yalıtım malzemesi ve Fuel-oil’in yakıt olarak kullanıldığı durumda (0.086 m) karşımıza çıktığı görülmektedir. Tablo 5 ve tablo 6 geri ödeme süreleri açısından incelendiğinde, en düşük geri ödeme süresinin bims blok duvar, eps yalıtım malzemesi ve Fuel-oil’in yakıt olarak kullanıldığı durumda (1.71 yıl) elde edildiği görülmüştür. En yüksek geri ödeme süresine bakıldığında ise, izo-tuğla duvar, xps yalıtım malzemesi ve doğalgaz yakıtının kullanıldığı durumda (7.88 yıl) ulaşıldığı görülmüştür.

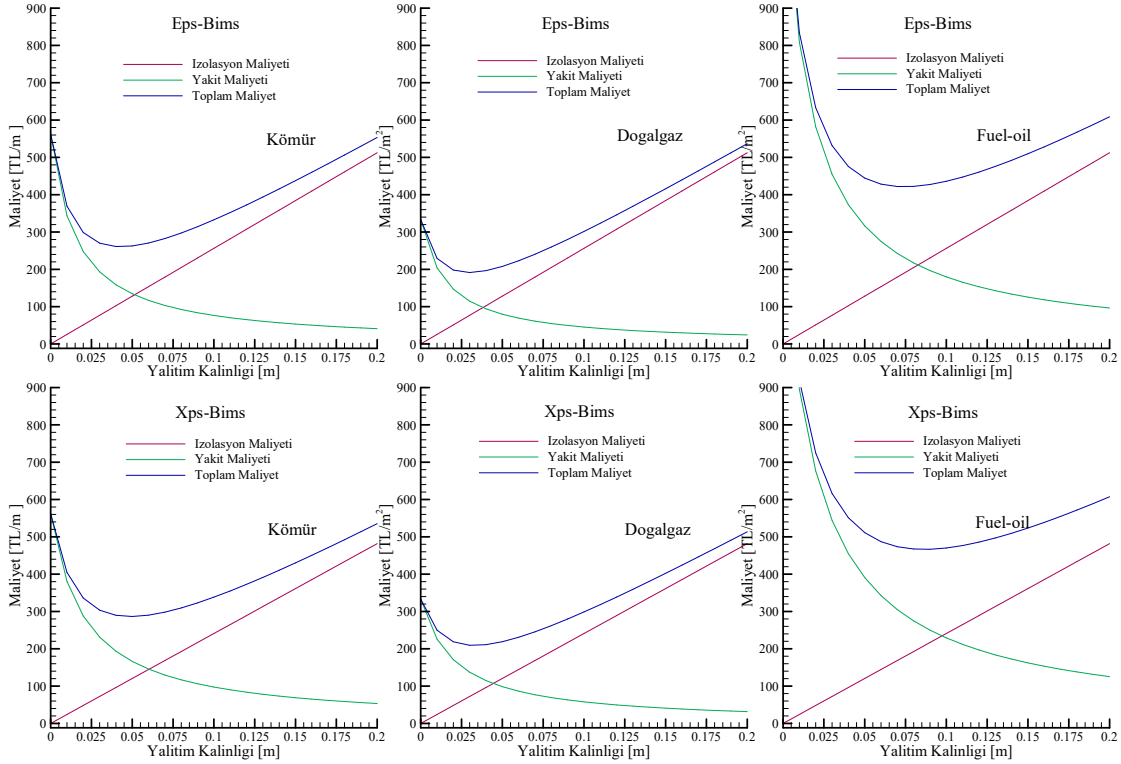
Tablo 5. Bims blok duvar için elde edilen sonuçlar

Malzeme	Ekstrüde Polistiren Köpük (xps)			Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (eps)		
	Isıtma			Isıtma		
Metot	Kömür	Doğalgaz	Fuel-oil	Kömür	Doğalgaz	Fuel-oil
Yakıt tipi	Kömür	Doğalgaz	Fuel-oil	Kömür	Doğalgaz	Fuel-oil
Optimum Yalıtım Kalınlığı (m)	0.048	0.032	0.086	0.043	0.029	0.074
Geri ödeme süresi (yıl)	2.95	3.84	1.92	2.63	3.43	1.71
Yıllık kazanç(TL/m ²)	275.433	124.23	855.314	301.238	141.750	900.347
Enerji tasarrufu (%)	50.988	62.724	35.288	46.396	57.46	31.88

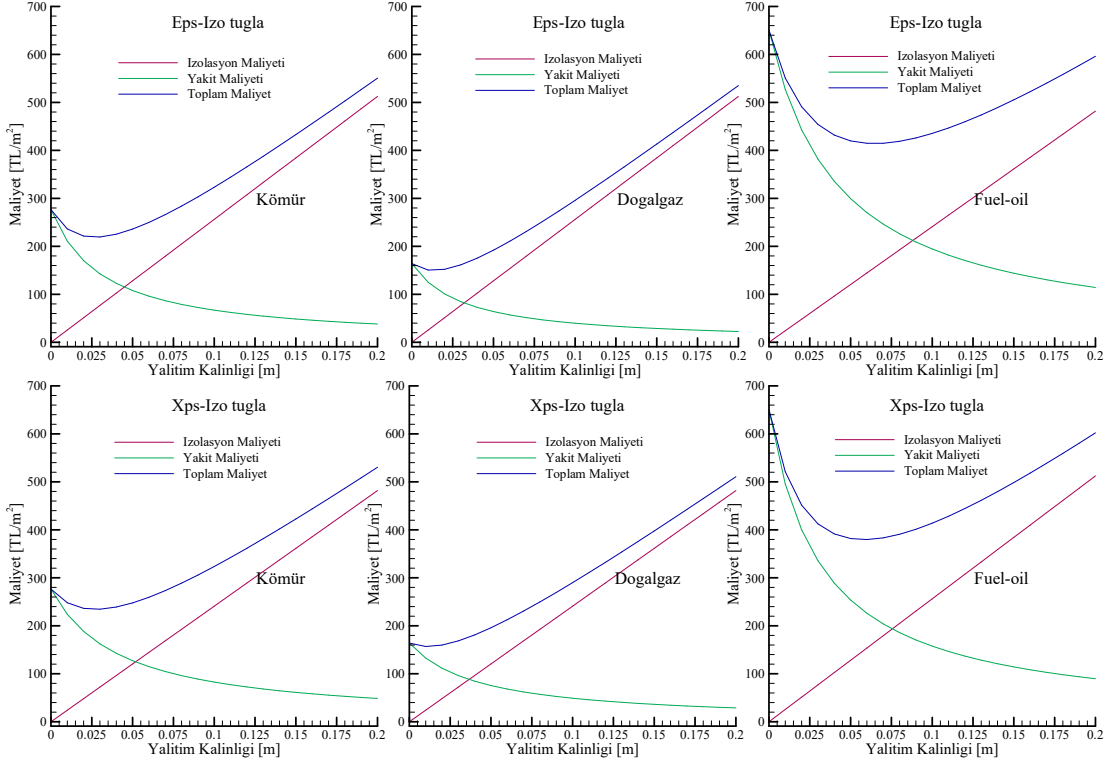
Tablo 6. İzo-tuğla duvar için elde edilen sonuçlar

Malzeme	Ekstrüde Polistiren Köpük (xps)			Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (eps)		
	Isıtma			Isıtma		
Metot						
Yakıt tipi	Kömür	Doğalgaz	Fuel-oil	Kömür	Doğalgaz	Fuel-oil
Optimum Yalıtım Kalınlığı (m)	0.027	0.011	0.064	0.026	0.013	0.058
Geri ödeme süresi (yıl)	6.04	7.88	3.92	5.39	7.02	3.50
Yıllık kazanç(TL/m ²)	42.136	7.119	236.048	57.377	14.0766	270.517
Enerji tasarrufu (%)	84.759	95.657	63.699	79.247	91.414	58.399

Çalışmada oluşturulan 12 durum bir araya getirilip şekil 1 ve şekil 2’de yalıtım kalınlığına bağlı olarak izolasyon maliyeti, yakıt maliyeti ve toplam maliyetinin grafikleri çizilmiştir. Bu tüm durumlar için grafikler incelendiğinde yalıtım kalınlığı arttıkça izolasyon maliyeti, yakıt maliyeti ve toplam maliyetin artış gösterdiği görülmektedir.

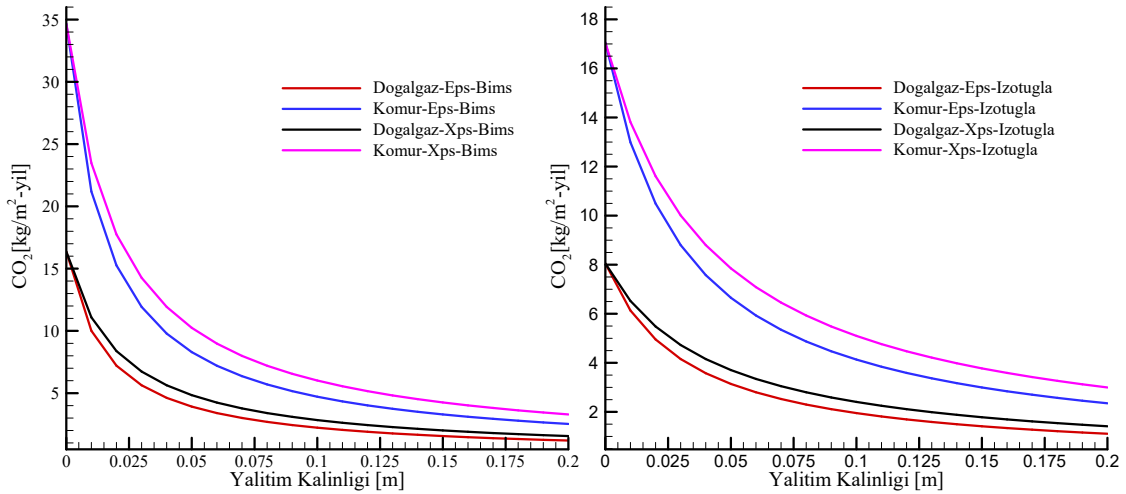


Şekil 1. Bims Blok Duvar Tipinde Farklı Yakıt Türleri için Yalıtım Kalınlığına Göre Maliyetin Değişimi

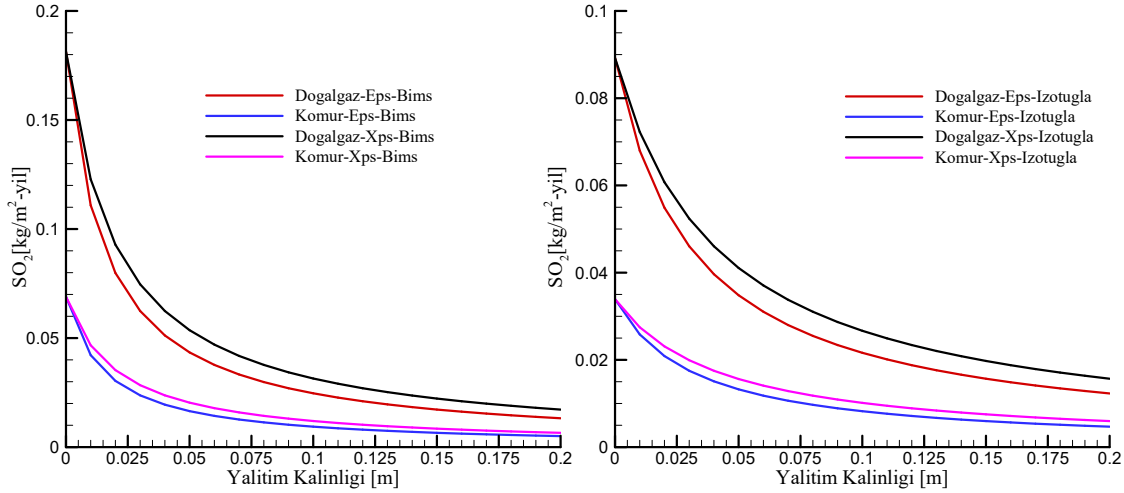


Şekil 2. İzo tuğla Duvar Tipinde Farklı Yakıt Türleri için Yalıtım Kalınlığına Göre Maliyetin Değişimi

Çalışma sonucunda yalıtım kalınlığına bağlı olarak CO₂ ve SO₂ emisyonunun değişimi şekil 3 ve şekil 4'de çizilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde yalıtım kalınlığı arttıkça CO₂ ve SO₂ emisyonunun azaldığını görülmüştür.



Şekil 3. Yalıtım kalınlığına göre CO₂ değişimi



Şekil 4. Yalıtım Kalınlığına göre SO₂ değişimi

SONUÇLAR

Aydın ilinin 10 yıllık ısıtma değerleri ele alınarak optimum yalıtım kalınlığının bulunması amaçlı gerçekleştirilen bu çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir;

- İzo-tuğla duvar, xps yalıtım malzemesinin olduğu ve yakıt olarak doğalgazın kullanıldığı durumda, en düşük optimum yalıtım kalınlığı olan 0.011 m değerine ulaşıldığı görülmektedir. En yüksek optimum yalıtım kalınlığına ise bims blok duvar, xps yalıtım malzemesi ve Fuel-oil'in yakıt olarak kullanıldığı durumda 0.086 m ile elde edildiği görülmüştür.
- Bims blok duvar, eps yalıtım malzemesi ve Fuel-oil'in yakıt olarak kullanıldığında, 1.71 yıl ile en düşük geri ödeme süresine eriştiği görülmüştür. En yüksek geri ödeme süresi açısından ise, izo-tuğla duvar, xps yalıtım malzemesi ve doğalgaz yakıtının kullanıldığı durumda 7.88 yıl ile ulaşıldığı görülmüştür.
- Çalışma neticesinde yalıtım kalınlığı arttıkça izolasyon maliyeti, yakıt maliyeti ve toplam maliyetin artış gösterdiği görülmektedir.
- Çalışmada yalıtım kalınlığı arttıkça CO₂ ve SO₂ emisyonunun azaldığını görülmüştür. Bu durum kullanılan yalıtım malzemesinin CO₂ ve SO₂ emisyonunun azalmasında önemli rol oynadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Rossi, F., Marigliano, M., Marino, C., Minichiello, F., A Technical and Economic Analysis on Optimal Thermal Insulation Thickness for Existing Office Building in Mediterranean Climates, International Journal of Heat and Technology, Vol. 34, Special Issue 2, pp. S561-S568, 2016.
- [2] S., A., H., Jafri, Bharti, P., K., Analyzing optimum thickness for combination of two thermal insulation materials for building walls, Materials Science and Engineering, 404, 2018.)
- [3] Akan, A., E., Determination and Modeling of Optimum Insulation Thickness for Thermal Insulation of Buildings in All City Centers of Turkey, International Journal of Thermophysics 42:49, 2021.)
- [4] Basrawi, F., Ibrahim, H., Taib, M.Y., Lee, G.C., Optimum Thickness of Wall Insulations and Their Thermal Performance for Buildings in Malaysian Climate, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, Volume 8, pp. 1207-1217, 2013.
- [5] <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx?g=merkez&m=09-00&y=2024&a=10>, Aydın ili ısıtma değerleri.

[6] Karakaya, H., Farklı Duvar ve Yakıt Tiplerinde Optimum Yalıtım Kalınlığının Isıtma ve Soğutmada Tespiti ve Çevresel Etkileri, Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ.,193-202, 2018.

[7] <http://www.izocam.com.tr>, Yalıtım Birim Fiyatları, 2024.

EVALUATION OF HYDROGEN ENERGY STORAGE RISKS: AN INTEGRATED FUZZY ENTROPY AND TOPSIS APPROACH FOR SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY**Assist. Prof. İbrahim YILMAZ¹**¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Science, Industrial Engineering Department, Ankara, Türkiye.¹ORCID ID: 0000-0002-5959-7353**Dr. Nihan CAGLAYAN²**²Kırşehir Ahi Evran University, Vacation School of Social Sciences, Department of Management and Organization, Kırşehir-Türkiye²ORCID ID: 0000-0002-4448-7338**Ahmet Süha HANCIOĞLU³**³Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Science, Industrial Engineering Department, Ankara, Türkiye.³ORCID ID: 0000-0001-6583-5488**Abstract**

The global change towards sustainable energy sources is critical in addressing the dual challenges of climate change and reducing reliance on fossil fuels, and lowering carbon footprints. As part of this transition, hydrogen energy storage emerges as a potential solution for mitigating the inherent intermittency of renewable energy sources. Nevertheless, implementing large scale hydrogen storage comes with multifaceted risks, ranging from technical and operational challenges to economic and environmental concerns. Effective risk evaluation is key to ensuring the long-term feasibility and safety of these systems. This paper proposes a novel integrated fuzzy multi-criteria decision-making (MCDM) method, combining fuzzy entropy and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), to evaluate and rank the risks associated with hydrogen energy storage. Fuzzy entropy is utilized to calculate the objective weights of risk factors by capturing the uncertainty and vagueness inherent in risk assessment processes. TOPSIS, on the other hand, is employed to prioritize the risks by comparing each alternative to an ideal solution, offering a robust ranking mechanism for decision-makers. This study aims to develop a comprehensive risk evaluation framework tailored specifically to hydrogen energy storage. In particular, this risk assessment addresses critical challenges such as the high-pressure and energy requirements for storage, the invisible flame during combustion, the potential for leakage due to hydrogen's small molecular size, and the need for regular monitoring of storage pressure depending on the method used. The integrated fuzzy MCDM approach introduced in this research offers a systematic and flexible tool for navigating the complexities of risk evaluation in hydrogen energy systems. By enhancing the decision-making processes in green energy systems, the proposed approach contributes to the development of safer, more resilient, and economically viable hydrogen storage solutions. The implications of the study underscore the potential for further advancements in hydrogen energy storage as a cornerstone of sustainable energy strategies.

Keywords: Hydrogen energy, risk evaluation, fuzzy logic, MCDM**Introduction**

Energy demand has increased in parallel with population growth and technological advancements in today's world. Factors such as geopolitical developments, regional conflicts, and trade wars threaten the security of limited energy supplies (Le et al., 2023; Davies et al., 2024; Matthes, 2017). Fossil fuels, which have been the primary energy source since the industrial revolution, are significant contributors to greenhouse gas emissions and a major source of intensive emissions. Their heavy usage has also led to their rapid depletion (Olabi et al., 2021; Koşar, 2021). Moreover, the effects of global warming are intensifying daily, raising serious concerns about environmental sustainability.

In light of these developments, renewable and clean energy sources are gaining prominence and emerging as secure alternatives in terms of sustainability. However, there are reliability issues associated with energy production from renewable sources. Energy consumption averages in certain regions show minimal fluctuations, necessitating a consistent energy supply. Yet, energy production from renewable sources is highly dependent on atmospheric conditions and seasonal natural phenomena. This dependency makes it challenging for renewable energy sources to be considered reliable for energy supply. As a result, renewable energy sources are generally preferred to support the main grid to ensure sustainability.

For renewable energy sources to become primary sources in energy supply, they need to provide sustainable and secure energy (Yan et al., 2023). This is only achievable through the storage of excess energy produced during favorable atmospheric conditions for energy generation (Olabi et al., 2021). While energy storage technologies are rapidly advancing, they are still neither cost-effective nor efficient enough.

Hydrogen, as an energy carrier, has advantages such as high energy density and the ability to be produced from renewable energy sources. These characteristics make hydrogen a key player in the transition to sustainable energy systems (Davies et al., 2024).

Hydrogen can be utilized in various fields, including industry, transportation, and electricity generation. It is a secondary energy source synthetically obtained from various primary energy sources, as it does not exist in its elemental form naturally. Instead, it is obtained in gas form through various processes by separating it from the compounds in which it is found. Despite this, its high energy content and the abundance of hydrogen sources in nature position it as a viable alternative among sustainable primary fuels.

Currently, numerous processes are used in hydrogen production, including steam reforming, waste gas purification, electrolysis, photochemical processes, and thermochemical processes (Koşar, 2021). Additionally, hydrogen can be directly delivered through pipelines or transported over long distances via maritime routes. The relatively minor issues associated with hydrogen transportation indicate the potential for its wider application in the future.

However, some challenges must be overcome for hydrogen to be effectively integrated into the global energy system, with storage being one of the most critical. In its natural state, hydrogen is a gas that occupies a large volume at standard temperature and pressure, making storage and transportation particularly difficult. Efficient and safe hydrogen storage technologies are crucial for evaluating hydrogen as a feasible energy solution.

Hydrogen storage technologies can be classified into compressed hydrogen, liquid hydrogen, and solid-state storage. Each method has advantages and limitations based on factors such as energy density, cost, and safety (Davies et al., 2024; Koşar, 2021). For instance, compressed hydrogen involves storing hydrogen gas at high pressure, requiring robust infrastructure for safety and efficiency. Liquid hydrogen, on the other hand, necessitates cryogenic temperatures for storage, bringing additional challenges such as insulation and energy consumption. Solid-state storage methods, including metal hydrides and chemical hydrogen storage, offer higher energy density and safer storage potential but require significant advancements in materials and engineering to achieve commercial viability.

Large-scale hydrogen storage remains limited, with existing methods primarily involving underground storage sites such as salt caverns in Texas and the UK. However, these methods are not universally applicable and come with specific disadvantages (Olabi et al., 2021). Hydrogen's small molecular structure poses additional challenges, including low density and a high risk of leakage, necessitating increased storage density, which introduces risks such as heat, pressure, or additional processing steps (Koşar, 2021).

The significance of hydrogen storage cannot be underestimated, as it is essential for the efficiency and sustainability of hydrogen-based energy systems. To ensure hydrogen's reliability as an energy source, the development of efficient storage systems that enable production, transportation, and usage is critical. Moreover, as the integration of hydrogen energy systems into national and global grids increases, particularly given the intermittent nature of renewable energy sources, the large-scale storage of hydrogen will become essential for balancing supply and demand.

While advancements in hydrogen storage technologies in recent years have shown promising results, significant challenges remain. Researchers are working on new materials and methods that can enhance energy density, safety, and cost-effectiveness. Innovations such as nanomaterials, carbon nanotubes, and metal-organic frameworks (MOFs) offer the potential to significantly increase storage capacities (Koşar, 2021). Additionally, developments in cryogenic and solid-state storage techniques are pushing the boundaries of what is possible.

However, these technologies are still experimental or in the early stages of commercialization, and widespread adoption will require further research and development, as well as improvements in production and infrastructure (Olabi et al., 2021).

As hydrogen gains importance as a sustainable energy alternative, evaluating the risks associated with hydrogen energy storage has become critical. These risks encompass a wide range of technical, operational, economic, and environmental factors. Technical risks include the potential for leakage, structural failures, and material degradation over time. Operational risks involve the complexities of managing large-scale hydrogen storage facilities and ensuring continuous availability of hydrogen. Economic risks relate to the high development and maintenance costs of hydrogen storage systems, which may hinder their widespread adoption. Environmental risks stem from potential negative impacts during the production, transportation, and storage of hydrogen, especially if non-renewable energy sources are used.

The assessment of risks related to hydrogen energy storage is of great importance both academically and industrially. The limited number of studies in the scientific literature on this subject highlight the need for a comprehensive risk assessment approach. Furthermore, accurate analysis and prioritization of risks are essential for investors and decision-makers aiming to promote the adoption of hydrogen in the energy sector. Such evaluations ensure the efficient allocation of resources and the development of long-term strategic plans. This assessment plays a critical role not only in terms of reliability and sustainability but also in accelerating technological advancements in the sector and encouraging innovative storage solutions.

This study evaluates the risks associated with hydrogen energy storage using a novel integrated fuzzy multi-criteria decision-making (MCDM) framework that combines fuzzy entropy and TOPSIS methods. Recent studies have introduced innovative approaches to risk assessment in hydrogen storage systems. Sharaf (2023) proposed the spherical fuzzy TOPSIS and VIKOR techniques to address vagueness in subjective judgments and uncertainties in objective data during hydrogen storage evaluation (Sharaf, 2023). Haktanır and Kahraman (2024) developed an integrated AHP and TOPSIS methodology based on intuitionistic Z-numbers, providing a robust decision-making framework for hydrogen storage technology selection (Haktanır & Kahraman, 2024). Similarly, İlbarar et al. (2022) utilized Z-fuzzy DEMATEL, cognitive mapping, and VIKOR methods to prioritize hydrogen storage technologies considering sustainability and interdependencies among evaluation criteria (İlbarar et al., 2022). Unlike these methods, this study employs fuzzy entropy to determine criteria weights and applies the TOPSIS technique under a fuzzy environment to systematically identify and rank risks (Yılmaz and Ecemis Yılmaz, 2024). The proposed methodology offers a comprehensive framework for guiding decision-makers in developing safer and more efficient hydrogen storage technologies.

Materials and Methods

In this study, a risk analysis of hydrogen storage methods was conducted using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methodologies. The entropy method is combined with the fuzzy TOPSIS approach to evaluate risks and rank alternatives. The entropy method provides a data-driven analysis by quantitatively assessing the variability of criteria, allowing for the objective determination of their weights. Meanwhile, the fuzzy TOPSIS method addresses uncertainties and ambiguities in expert evaluations and ranks alternatives based on their proximity to the ideal solution.

The integration of these methods was chosen due to their complementary strengths in managing uncertainties and providing comprehensive evaluations across multiple criteria. This approach offers a reliable framework for identifying the safest and most efficient hydrogen storage methods by addressing the complexity of risk assessments in energy systems.

Linguistic Fuzzy Numbers

Triangular fuzzy numbers (L, M, U) are used to represent linguistic terms numerically in decision-making processes. These numbers define a membership function that quantifies the degree of belonging of an element to a fuzzy set. Equation (1) is constructed to capture the gradual transitions in membership degrees, reflecting the inherent uncertainty of linguistic terms by defining a linear increase and decrease across the range of the triangular fuzzy number (Rajaprakash & Ponnusamy, 2013). The linguistic terms and their corresponding triangular fuzzy numbers are provided in Table 1.

$$\mu_A(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & \text{if } x \leq a \text{ or } x \geq b \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{if } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{if } m < x < b \end{array} \right\} \quad \text{Eq. (1)}$$

Table 1. Linguistic Terms and Corresponding Triangular Fuzzy Numbers

Linguistic Term	Triangular Fuzzy Numbers (<i>L, M, U</i>)
Very Low	(1, 1, 3)
Low	(1, 3, 5)
Medium	(3, 5, 7)
High	(5, 7, 9)
Very High	(7, 9, 9)

Entropy Method

The entropy method, derived from information theory, is widely used in decision-making processes to measure the uncertainty or information content within data. This method objectively determines the weights of criteria by evaluating the variability within a dataset. Offering a data-driven analysis, this approach is suitable for multi-criteria decision-making applications in complex systems. Equation (2) defines the normalization of fuzzy numbers for each criterion, ensuring comparability by standardizing values based on their type (benefit or cost) (Kumar et al., 2021).

$$\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j}, \frac{b_{ij}}{c_j}, \frac{c_{ij}}{c_j} \right), \quad c_j = \max c_{ij} \quad \text{benefit criterion,} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{c_j}{c_{ij}}, \frac{c_j}{b_{ij}}, \frac{c_j}{a_{ij}} \right), \quad c_j = \max c_{ij} \quad \text{cost criterion.}$$

Equation (3) defines the aggregated fuzzy value $D(\tilde{n}_{ij})$, which is used to summarize a triangular fuzzy number (a,b,c) into a single scalar value. This formula assigns a higher weight to the middle value b , reflecting its central tendency within the triangular fuzzy number. The process ensures the comparability of fuzzy values across different criteria by converting them into crisp values suitable for further analysis (Yang et al., 2018).

$$D(\tilde{n}_{ij}) = \frac{a + 4b + c}{6} \quad \text{Eq. (3)}$$

Equation (4) calculates the normalized proportion p_{ij} , representing the contribution of the i^{th} alternative to the j^{th} criterion.

$$p_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Equation (5) calculates the entropy value E_j for each criterion, which measures the level of uncertainty or diversity in the decision matrix. This value is derived by evaluating the distribution of normalized proportions p_{ij} across all alternatives for a given criterion.

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad \text{Eq. (5)}$$

Equation (6) calculates the weights of each criterion based on the entropy values derived in the previous step. The first step is to determine the degree of diversification d_{ij} for each criterion, which reflects how much a criterion contributes to the overall decision-making process.

$$d_{ij} = 1 - E_j, \quad w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad \text{Eq. (6)}$$

TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) is a widely used approach in multi-criteria decision-making processes, developed by Hwang and Yoon (Hwang & Yoon, 1981). It ranks alternatives based on their proximity to the ideal solution, which represents the best performance across all criteria. TOPSIS is preferred for its simplicity and effectiveness in balancing benefit and cost criteria. Equation (7) represents the normalized decision matrix. This step ensures that all criteria are comparable by converting raw data into a dimensionless format:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad \text{Eq. (7)}$$

Equation (8) calculates the weighted normalized decision matrix, where w_j is the weight of each criterion, emphasizing their relative importance.

$$v_{ij} = r_{ij} \cdot w_j \quad \text{Eq. (8)}$$

Equation (9) defines the ideal (A^+) and anti-ideal (A^-) solutions, where B and C denote benefit and cost criteria, respectively.

Eq. (9)

$$A^+ = \{ \max(v_{ij}) \mid j \in B; \min(v_{ij}) \mid j \in C \}$$

$$A^- = \{ \min(v_{ij}) \mid j \in B; \max(v_{ij}) \mid j \in C \}$$

Equation (10) calculates the Euclidean distance of each alternative from the ideal (S_i^+) and anti-ideal (S_i^-) solutions.

Eq. (10)

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^+)^2}, \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^-)^2}$$

Equation (11) computes the relative closeness (C_i) of each alternative to the ideal solution, which is used to rank the alternatives.

Eq. (11)

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

Application Steps

Expert evaluations were utilized to assess hydrogen storage methods across four key risk criteria: Technical Risk, Operational Risk, Economic Risk, and Environmental Risk. To facilitate a structured and quantitative analysis, the linguistic assessments provided by the experts were translated into triangular fuzzy numbers. This process ensures that subjective opinions are systematically incorporated into the decision-making framework, offering a robust foundation for comparative evaluation. Table 2 summarizes the hydrogen storage methods and their associated risk levels, as determined through expert input and expressed using fuzzy numbers.

Table 2. Expert-Assessed Risk Levels of Hydrogen Storage Methods

Storage Method	Technical Risk	Operational Risk	Economic Risk	Environmental Risk
Compressed Gas Storage	High (5, 7, 9)	Very High (7, 9, 9)	Medium (3, 5, 7)	Medium (3, 5, 7)
Liquid Phase Storage	Very High (7, 9, 9)	Very High (7, 9, 9)	Very High (7, 9, 9)	High (5, 7, 9)
Underground Storage	High (5, 7, 9)	High (5, 7, 9)	Medium (3, 5, 7)	High (5, 7, 9)
Chemical Storage	Very High (7, 9, 9)	Very High (7, 9, 9)	High (5, 7, 9)	Medium (3, 5, 7)

Table 3 presents the normalized decision matrix obtained using Eq. (2), where fuzzy values for each criterion are standardized to ensure comparability across alternatives.

Table 3. Normalized Decision Matrix

Storage Method	Technical Risk	Operational Risk	Economic Risk	Environmental Risk
Compressed Gas Storage	0,60 0,43 0,33	0,43 0,33 0,33	1,00 0,60 0,43	1,00 0,60 0,43
Liquid Phase Storage	0,71 0,56 0,56	0,71 0,56 0,56	0,71 0,56 0,56	1,00 0,71 0,56
Underground Storage	0,60 0,43 0,33	0,60 0,43 0,33	1,00 0,60 0,43	0,60 0,43 0,33
Chemical Storage	0,43 0,33 0,33	0,43 0,33 0,33	0,60 0,43 0,33	1,00 0,60 0,43

Table 4 shows the defuzzified decision matrix, obtained using Eq. (3), where the triangular fuzzy numbers are defuzzified into crisp values using the centroid method. This step converts qualitative evaluations into quantitative data, facilitating further analysis in the decision-making process.

Table 4. Defuzzified Decision Matrix

Storage Method	Technical Risk	Operational Risk	Economic Risk	Environmental Risk
Compressed Gas Storage	0,441269841	0,349206349	0,638095238	0,638095238
Liquid Phase Storage	0,582010582	0,582010582	0,582010582	0,735449735
Underground Storage	0,441269841	0,441269841	0,638095238	0,441269841
Chemical Storage	0,349206349	0,349206349	0,441269841	0,638095238
SUM	1,813756614	1,721693122	2,299470899	2,452910053

Table 5 presents the proportion matrix, where the defuzzified values from Table 4 are normalized using Eq. (4) to compute the relative contribution of each storage method to the corresponding criteria. This proportional representation ensures a fair comparison of alternatives by reflecting their relative importance for each risk category.

Table 5. Proportion Matrix

Storage Method	Technical Risk	Operational Risk	Economic Risk	Environmental Risk
Compressed Gas Storage	0,243290548	0,202827289	0,277496549	0,26013805
Liquid Phase Storage	0,320886814	0,338045482	0,253106305	0,299827437
Underground Storage	0,243290548	0,256299939	0,277496549	0,179896462
Chemical Storage	0,192532089	0,202827289	0,191900598	0,26013805

Table 6 presents the entropy values for each criterion, calculated using Eq. (5). These values quantify the degree of uncertainty or variability in the proportion matrix (Table 5) for each criterion, forming the foundation for determining criteria weights in subsequent steps.

Table 6. entropy values for each criterion

Technical Risk	Operational Risk	Economic Risk	Environmental Risk
0,988042965	0,983013175	0,992582249	0,988477167

Table 7 shows the criteria weights, calculated using Eq. (6), where the degree of diversification values are normalized to ensure that the sum of all weights equals 1. These weights represent the relative importance of each criterion in the decision-making process.

Table 7. Criteria Weights

Technical Risk	Operational Risk	Economic Risk	Environmental Risk	SUM
0,011957035	0,016986825	0,007417751	0,011522833	0,047884444
0,249706044	0,354746211	0,154909414	0,240638332	

The results from Table 2, representing the linguistic evaluations of storage methods, were processed using Eq. (7) for normalization and weighted with criteria weights to obtain the normalized weighted decision matrix shown in Table 8. This matrix enables the comparison of storage methods based on their normalized fuzzy values across all criteria.

Table 8. Normalized weighted decision matrix

	Technical Risk			Operational Risk			Economic Risk			Environmental Risk		
Compressed Gas Storage	0,139	0,178	0,250	0,197	0,197	0,253	0,066	0,093	0,155	0,103	0,144	0,241
Liquid Phase Storage	0,139	0,139	0,178	0,197	0,197	0,253	0,052	0,052	0,066	0,080	0,103	0,144
Underground Storage	0,139	0,178	0,250	0,197	0,253	0,355	0,066	0,093	0,155	0,080	0,103	0,144
Chemical Storage	0,139	0,139	0,178	0,197	0,197	0,253	0,052	0,066	0,093	0,103	0,144	0,241

The ideal (A^+) and anti-ideal (A^-) solutions, calculated using Eq. (9), are presented in **Table 9**. These values provide a benchmark for evaluating the proximity of each alternative to the optimal and worst-case scenarios.

Table 9. The ideal (A^+) and anti-ideal (A^-) solutions

A^+	0,249706044	0,354746211	0,154909414	0,240638332
A^-	0,13872558	0,197081228	0,051636471	0,080212777

Eq. (10) was used to calculate the Euclidean distance of each alternative from the ideal solution (S_i^+) and the anti-ideal solution (S_i^-). These distances measure how far each alternative is from the best and worst possible scenarios, serving as a basis for ranking and are presented in Table 10.

Table 10. best and worst possible scenarios

	s_i^+	s_i^-
Compressed Gas Storage	0,376873237	0,265958879
Liquid Phase Storage	0,473599662	0,103252169
Underground Storage	0,380823007	0,268818246
Chemical Storage	0,424149959	0,181349383

Eq. (11) was used to calculate the relative closeness (C_i) of each alternative to the ideal solution. Since all criteria in this study are cost-oriented, the ranking reflects the lowest risk as the most preferred option. The alternatives are ranked based on their C_i values, with higher values indicating closer proximity to the ideal solution. The results are presented in **Table 11**.

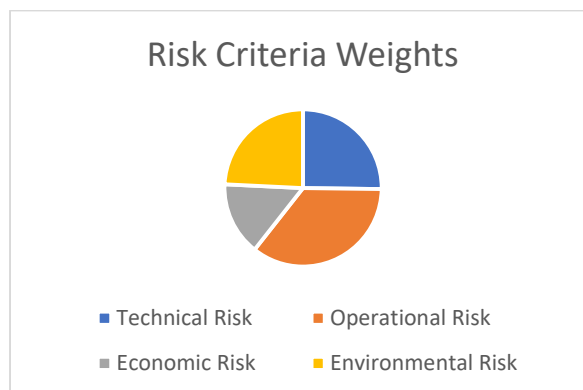
Table 11. Ranking Alternatives

	C_i	Normalized	Rank
Compressed Gas Storage	0,413729919	0,316786523	2
Liquid Phase Storage	0,178992531	0,200598765	4
Underground Storage	0,413794913	0,316836288	1
Chemical Storage	0,299503848	0,229325409	3

Findings and Discussion

This study presents a comprehensive framework that combines fuzzy entropy and TOPSIS methodologies to evaluate the risks associated with hydrogen storage methods. By integrating these multi-criteria decision-making tools, an objective and quantitative assessment of various storage methods is achieved. This approach not only addresses the challenges of hydrogen storage but also provides valuable insights for academia and industry. As a clean and sustainable energy carrier, hydrogen emerges as a key alternative for achieving global net-zero emissions targets. This study is one of the first to systematically assess the risks of hydrogen storage methods using a fuzzy MCDM framework. The results identify underground storage as the most suitable option due to its safety and efficiency. This finding contributes to hydrogen research while supporting policymakers and industry leaders in making informed decisions.

A significant aspect of this study is the calculation of criteria weights through the entropy method. The pie chart (Figure 1) displays the weights assigned to four risk criteria: Technical, Operational, Economic, and Environmental. Operational risk, with the highest weight of 35%, stands out as the most influential factor in the evaluation of hydrogen storage methods, emphasizing the importance of operational feasibility and reliability. In contrast, economic risk has the lowest weight at 15%, indicating its relatively lower impact compared to other criteria. These weights form the basis for prioritizing criteria in the decision-making process, ensuring a systematic and structured evaluation.

**Figure 1.** Risk Criteria Weights Derived from the Entropy Method

The findings demonstrate that underground storage ranks as the most optimal hydrogen storage method, given its high safety and operational feasibility. Compressed gas storage ranks second, followed by chemical storage in third place, and liquid-phase storage in fourth. These rankings offer a detailed perspective on the balance among technical, economic, and environmental factors, providing a comprehensive understanding of storage alternatives.

This study also paves the way for future research. Subsequent studies could incorporate machine learning models to predict storage risks under dynamic conditions or expand the criteria set to include social and geopolitical factors. Moreover, integrating life cycle analysis could enhance the environmental evaluation of storage methods.

In conclusion, the proposed methodology and findings address critical technical, operational, economic, and environmental challenges, fostering progress in hydrogen storage. By establishing a foundation for future technological and practical advancements, this study reinforces hydrogen's role as a cornerstone of the sustainable energy future.

References

- Davies, E., Ehrmann, A., & Schwenzfeier-Hellkamp, E. (2024). Safety of Hydrogen Storage Technologies. *Processes*, 12(10), 2182.
- Haktanır, E., & Kahraman, C. (2024). Integrated AHP & TOPSIS methodology using intuitionistic Z-numbers: An application on hydrogen storage technology selection. *Expert Systems with Applications*, 239, 122382.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications* Springer-Verlag. New York, NY, USA.
- İlbahar, E., Çolak, M., Karışan, A., & Kaya, İ. (2022). A combined methodology based on Z-fuzzy numbers for sustainability assessment of hydrogen energy storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(34), 15528-15546.
- Koşar, C. (2021). Hidrojen Depolama Yöntemleri. *Open Journal of Nano*, 6(1), 1-10.
- Kumar, R., Singh, S., Bilga, P. S., Singh, J., Singh, S., Scutaru, M. L., & Pruncu, C. I. (2021). Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: A critical review. *Journal of materials research and technology*, 10, 1471-1492.
- Le, S. T., Nguyen, T. N., Linforth, S., & Ngo, T. D. (2023). Safety investigation of hydrogen energy storage systems using quantitative risk assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(7), 2861-2875.
- Matthes, F. C. (2017). Energy transition in Germany: a case study on a policy-driven structural change of the energy system. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 14(1), 141-169.
- Olabi, A. G., Abdelghafar, A. A., Baroutaji, A., Sayed, E. T., Alami, A. H., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A. (2021). Large-vs-scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45), 23498-23528.
- Rajaprakash, S., & Ponnusamy, R. (2013, December). Determining students expectation in present education system using fuzzy analytic hierarchy process. In *Mining Intelligence and Knowledge Exploration: First International Conference, MIKE 2013, Tamil Nadu, India, December 18-20, 2013. Proceedings* (pp. 553-566). Cham: Springer International Publishing.
- Sharaf, I. M. (2023). A new approach for spherical fuzzy TOPSIS and spherical fuzzy VIKOR applied to the evaluation of hydrogen storage systems. *Soft Computing*, 27(8), 4403-4423.
- Yan, H., Zhang, W., Kang, J., & Yuan, T. (2023). The necessity and feasibility of hydrogen storage for large-scale, long-term energy storage in the new power system in china. *Energies*, 16(13), 4837.
- Yang, W., Xu, K., Lian, J., Ma, C., & Bin, L. (2018). Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods. *Ecological Indicators*, 89, 269-280.

Yilmaz, I., & Ecemis Yilmaz, H. K. (2024). A Consensus Framework for Evaluating Dispute Resolution Alternatives in International Law Using an Interval-Valued Type-2 Fuzzy TOPSIS Approach. *Applied Sciences*, 14(23), 11046.

SELECTION OF THE HYDROGEN ENERGY STORAGE METHOD USING THE HYBRID FUZZY MCDM APPROACH: A PATHWAY TO SUSTAINABLE ENERGY SOLUTIONS**Dr. Nihan CAĞLAYAN¹**¹Kırşehir Ahi Evran University, Vacation School of Social Sciences, Department of Management and Organization, Kırşehir-Türkiye¹ORCID ID: 0000-0002-4448-7338**Assist. Prof. İbrahim YILMAZ²**²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Science, Industrial Engineering Department, Ankara, Türkiye.²ORCID ID: 0000-0002-5959-7353**Ahmet Süha HANCIOĞLU³**³Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Science, Industrial Engineering Department, Ankara, Türkiye.³ORCID ID: 0000-0001-6583-5488**Abstract**

The demand for renewable energy sources is increasing rapidly each day, driven by the growing global energy needs and the rise of economic and environmental challenges. Hydrogen energy is a valuable non-carbon energy source that can replace fossil fuels, making it a more environmentally friendly and clean choice for energy storage given the variety of renewable energy sources available. However, storage of hydrogen is one of the most important factors in the development of sustainable hydrogen energy for the prosperity of the world economy in the future. In order to effectively utilize hydrogen energy, advancements in storage technologies are crucial. These innovations play a key role in ensuring the widespread adoption of hydrogen energy as a viable solution for our energy needs. Therefore, the evaluation of the hydrogen energy storage options is the main topic of this study. The primary aim of this study is to select the most suitable storage alternatives for hydrogen energy, and for this purpose, the fuzzy MCDM method is proposed. The fuzzy MCDM method help in evaluating various storage options based on multiple criteria, such as efficiency, cost, and environmental impact. By selecting the most suitable storage alternatives, this study aims to contribute to the advancement of hydrogen energy technology and its widespread adoption in the future energy landscape.

Keywords: Hydrogen Energy Storage, MCDM, Fuzzy Logic, VIKOR.**Introduction**

A significant portion of the energy required for daily life is supplied by fossil fuels. As the global economy grows, technology advances, and industries expand, energy has become indispensable. However, due to these increases, fossil fuels are rapidly depleting. The consumption of these fuels leads to greenhouse gas effects, ozone layer depletion, and air pollution. These problems seriously threaten the living environment on our planet. Therefore, the efficient use of energy resources worldwide is an important issue. The growing share of renewable energy sources in electricity generation also promotes the utilization of diverse energy resources.

Hydrogen, like other renewable energy sources such as solar and wind, holds a significant role in electricity production. Its unique versatility allows it to be produced not only from renewable resources but also from fossil fuels, making it an asset in the transition to cleaner energy. In recent years, hydrogen energy has gained prominence in energy production due to this dual capability. Many experts advocate for hydrogen energy to replace fossil fuels, viewing it as a critical solution to combat global warming and address pressing environmental challenges. This growing preference underscores hydrogen's potential to transform the global energy landscape by reducing reliance on traditional energy sources while supporting sustainable development. As renewable energy sources become more widely adopted, the amount of electricity generated also increases. Hydrogen, one of the most useful elements on Earth, has significant advantages due to its high energy-carrying

potential and the fact that it produces no pollution during electricity generation. Plans have emerged to focus on storing the generated energy instead of continually transferring it. Numerous studies have demonstrated that hydrogen is regarded as a promising and ideal sustainable energy carrier for the future, owing to its significant advantages (Ren et al., 2017; Sahaym & Norton, 2008; Zhang et al., 2015). The numerous advantages of using hydrogen, including enhancing sustainability through the increased adoption of renewable energy sources, achieving near-zero carbon emissions, reducing pollution from greenhouse gases, and contributing to the global economy, make it an increasingly preferred choice for sustainable energy solutions (De Jongh & Adelhelm, 2010; Sadhasivam et al., 2017). The use of hydrogen as an energy carrier became even more important with the global energy crisis in the 1970s and subsequent technological developments in the 1980s (Mazloomi & Gomes, 2012; Niaz et al., 2015).

With the above-mentioned benefits and increasing energy needs, hydrogen energy storage has become an important issue. Like other products, the supply process of hydrogen has processes such as production, packaging, transportation and storage, but storing hydrogen has many risks. Moreover, challenges in the supply of generated energy, its safe storage, and usage are major concerns.

This study focuses on evaluating four key storage alternatives associated with selecting hydrogen energy storage alternatives, using a framework of five distinct criteria. Such challenges involved in accurately determining the weights of the criteria and rating the storage alternatives against each criterion, the VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) method is employed. This approach enables a structured and systematic evaluation, addressing the complexity of the decision-making process while ensuring that the interplay between various factors is considered to identify the most balanced and effective solutions.

Due to the challenges decision-makers face when evaluating conflicting elements, the VIKOR method, proposed by Opricovic (Opricovic & Tzeng, 2004), stands out as a more effective approach for multi-criteria decision-making problems. This method focuses on the selection and ranking of a set of alternatives. Thus, it defines a compromise solution for problems involving disparate criteria. The VIKOR algorithm is designed to determine the stability intervals of the weights for the compromise solution, which is derived from the input weights provided by experts. This feature ensures that the solution remains robust under varying conditions within the specified intervals. By assuming that each alternative is assessed based on its performance against each criterion function, the algorithm calculates proximity measures to the ideal solution. These proximity measures are then compared, allowing for a compromise ranking that reflects the relative closeness of each alternative to the optimal choice. This systematic approach ensures a balanced and reliable decision-making process, accommodating diverse perspectives and priorities. However, fuzzy logic is utilized for evaluations involving uncertain data. Since problems can be better described using fuzzy data, this study proposes a solution using the Intuitionistic Fuzzy VIKOR (IF-VIKOR) method.

Literature Review

Hydrogen energy is widely recognized as a reliable and sustainable source of energy, holding significant promise in meeting the increasing demand for environmentally friendly energy solutions. As the world seeks to reduce its reliance on fossil fuels and address the environmental challenges posed by traditional energy sources, hydrogen has emerged as a viable and efficient alternative. Among the various renewable energy options available today, hydrogen energy stands out due to its unique potential to not only reduce carbon emissions but also provide a clean and renewable energy source that can be harnessed across a wide range of applications. Its ability to store and transport energy makes it a key player in the transition toward a more sustainable and low-carbon energy future (Juangsa et al., 2021; Tarhan & Çil, 2021). Nonetheless, storing hydrogen presents unique challenges due to its gaseous state at room temperature and atmospheric pressure. Hydrogen storage technologies offer a mix of benefits and limitations. For example, liquid hydrogen storage boasts high efficiency with increased liquid density, while gas storage provides mature and efficient technology with ease of use. However, both methods come with drawbacks: liquid hydrogen storage involves high cylinder costs and prolonged refueling times, while gas storage shares similar issues, including expensive storage cylinders and extended refueling durations. There are studies in the literature on the advantages and disadvantages of hydrogen energy storage. (Mulky et al., 2024). The literature contains numerous studies focusing on the currently available hydrogen storage alternatives and comparisons between various hydrogen

storage techniques (Usman, 2022; Li et al., 2022; Moradi & Groth, 2019; Rivard et al., 2019; Barthelemy et al., 2017; Zhou et al., 2004).

MCDM methods are used for various purposes in literature. Numerous studies have focused on evaluating storage alternatives for hydrogen energy (Karatas, 2020; Özkan et al., 2015, Ren et al., 2017). Hydrogen storage is one of the critical issues influencing the future of hydrogen production (Zhang et al., 2016). Hydrogen energy storage systems include physical storage alternatives, like compression or cooling systems, as well as material-based storage options like chemical storage (Zhang et al., 2016). The decision regarding which storage alternatives to use is influenced by parameters such as energy efficiency, safety, and cost for each alternative.

Among the existing energy alternatives, hydrogen energy is a cleaner energy source for transportation and storage, due to the variety of production sources and resource abundance. Since hydrogen storage and transportation involve risks that need to be carefully considered, studies in this area are numerous. Research related to hydrogen production and storage, considering economic, environmental, and social impacts, has also been conducted, and multi-criteria decision-making methods have been used in these studies.

To investigate the most common hydrogen production technologies, Olabi et al. proposed the use of multi-criteria decision-making (MCDM) methods, including WASPAS, WSMWPM, and TOPSIS. Additionally, the CRITIC and Entropy methods were employed to enhance the reliability of the results and evaluate different criterion weights (Olabi et al., 2024).

The study proposed a quantitative risk assessment of a mobile hydrogen refueling station, examining the risks associated with two refueling locations and the transportation between these points (Kim et al., 2022). A study by Moradi and Groth has been conducted to ensure the safety and reliability of the hydrogen infrastructure in order to prevent potential accidents and to make it acceptable for the public under suitable conditions (Moradi & Groth, 2019). The two key topics of the hydrogen economy, storage and transportation technologies, have been examined in this study. Risk and reliability analyses were conducted for both hydrogen storage and transportation. Based on these analyses, recommendations were made to identify potential challenges and gaps.

The MCDM methods used in decision-making are featured in many studies addressing problem solutions in hydrogen energy technologies. Like some other countries, Qatar does not have a policy supporting the development of renewable energy, and being one of the highest CO₂ emitters, it is in a situation where research into renewable energy sources is of utmost importance. Therefore, a study was aimed at assessing the economic, technical, and environmental perspective of solar and wind energy potential for hydrogen and electricity production. The research focused on evaluating how these renewable sources could contribute to sustainable energy solutions. As a result, the study recommended using the HOMER software for this analysis to optimize energy production and storage (Jahangiri et al., 2020).

Materials and Methods

This study combines the concepts and calculations of Intuitionistic Fuzzy Sets (IFS) VIKOR (Opricovic & Tzeng, 2004). The storage options alternative could be collected in four groups Gas Phase Storage (A_1), Liquid Phase Storage (A_2), Underground Storage (A_3), and Chemical Storage (A_4), and the evaluation criteria are (C_1) refueling time, (C_2) hydrogen loss rate, (C_3) system volume, (C_4) system mass, and (C_5) conformability (Haktanir & Kahraman, 2024). In Table 1 the linguistic terms for criteria and alternatives are shown. In this study, it is assumed that 4 alternatives ($A_i, i = 1, \dots, 4$) and 5 evaluation criteria ($C_j, j = 1, \dots, 5$). In the evaluation of criteria, specified a weight $\lambda_k \in (0,1]$ and $\sum_{k=1}^K v_i=1$ assigned to each DMs to show the relative importance when ranking alternatives. Therefore, the IF-VIKOR method steps are shown as follows (Yilmaz and Caliskan, 2023):

Table 1. Linguistic terms for rating

Linguistic Terms for Alternatives Factors	IFN		Linguistic Terms for Criteria	IFN	
Very Poor (VP)	0.10	0.90	Very Low (VL)	0.15	0.80
Poor (P)	0.20	0.65	Low (L)	0.25	0.65
Moderately Poor (MP)	0.35	0.55	Medium Low (ML)	0.40	0.50
Fair (F)	0.50	0.50	Medium (M)	0.50	0.50
Moderately Good (MG)	0.65	0.25	Medium High (MH)	0.60	0.30
Good (G)	0.80	0.05	High (H)	0.75	0.15
Very Good (VG)	0.90	0.10	Very High (VH)	0.90	0.05

Step 1. SIFWA operator defined in Eq. 1.

$$r_{ij} = SIFWA(r_{ij}^1, r_{ij}^2, \dots, r_{ij}^K) = \sum_{k=1}^K \lambda_k r_{ij}^k$$

$$= \left(\frac{\prod_{k=1}^K (\mu_{ij}^k)^{\lambda_k}}{\prod_{k=1}^K (\mu_{ij}^k)^{\lambda_k} + \prod_{k=1}^K (1 - \mu_{ij}^k)^{\lambda_k}}, \frac{\prod_{k=1}^K (v_{ij}^k)^{\lambda_k}}{\prod_{k=1}^K (v_{ij}^k)^{\lambda_k} + \prod_{k=1}^K (1 - v_{ij}^k)^{\lambda_k}} \right) \quad (1)$$

Each R_i is evaluated under C_j , a group hydrogen energy storage selection problem in matrix R is created as in Eq. 2.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Step 2. Assign the subjective weights for each criterion. The fuzzy weight of each C_j is defines as $\omega_j^k = (\mu_j^k, v_j^k)$ by DM_k . Then, the importance weight of the jth criterion $\omega_j = (\mu_j, v_j)$ is calculated as follows:

$$\omega_j = SIFWA(\omega_j^1, \omega_j^2, \dots, \omega_j^K) = \sum_{k=1}^K \lambda_k \omega_j^k$$

$$= \left(\frac{\prod_{k=1}^K (\mu_j^k)^{\lambda_k}}{\prod_{k=1}^K (\mu_j^k)^{\lambda_k} + \prod_{k=1}^K (1 - \mu_j^k)^{\lambda_k}}, \frac{\prod_{k=1}^K (v_j^k)^{\lambda_k}}{\prod_{k=1}^K (v_j^k)^{\lambda_k} + \prod_{k=1}^K (1 - v_j^k)^{\lambda_k}} \right) \quad (3)$$

According to calculated ω_j , normalized subjective weight of each criterion, ω_j^s , is provided by Eq. 4.

$$\omega_j^s = \left(\frac{\mu_j + \pi_j \frac{\mu_j}{\mu_j + v_j}}{\sum_{j=1}^J \left(\mu_j + \pi_j \frac{\mu_j}{\mu_j + v_j} \right)} \right) \quad (4)$$

where π_j denotes the hesitation degree, $\pi_j = 1 - \mu_j - \nu_j$.

Step 3. Find the IF positive ideal solutions, $f_j^* = (\mu_j^*, \nu_j^*)$, and negative ideal solutions, $f_j^- = (\mu_j^-, \nu_j^-)$, for every criteria rating, $j = 1, 2, \dots, n$. Decision criteria are categorized into benefit criteria set, denoted as G_1 , and cost criteria set, denoted as G_2 . Ideal solutions are defined for each of these sets.

$$\begin{aligned} f_j^* &= \{ \max r_{ij} \text{ for } G_1, \min r_{ij} \text{ for } G_2 \} \\ f_j^- &= \{ \min r_{ij} \text{ for } G_1, \max r_{ij} \text{ for } G_2 \} \end{aligned} \quad (5)$$

Step 4. Calculate the normalized intuitionistic fuzzy distances, \widehat{d}_{ij}

$$\widehat{d}_{ij} = \frac{d(f_j^*, r_{ij})}{d(f_j^-, r_{ij})} \quad (6)$$

where

$$\begin{aligned} d(f_j^*, r_{ij}) &= \frac{|\mu_j^* - \mu_{ij}| + |\nu_j^* - \nu_{ij}|}{4} + \frac{\max(|\mu_j^* - \mu_{ij}| + |\nu_j^* - \nu_{ij}|)}{2} \\ d(f_j^-, r_{ij}) &= \frac{|\mu_j^- - \mu_{ij}| + |\nu_j^- - \nu_{ij}|}{4} + \frac{\max(|\mu_j^- - \mu_{ij}| + |\nu_j^- - \nu_{ij}|)}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

Step 5. Calculate τ_i and φ_i values as in Eqs. 8 and 9.

$$\tau_i = \sum_{j=1}^J \omega_j^s \widehat{d}_{ij} \quad (8)$$

$$\xi_i = \max(\omega_j^s, \widehat{d}_{ij}) \quad (9)$$

Step 6. Calculate VIKOR index Q_i as in Eq. 10.

$$Q_i = v \frac{\tau_i - \tau^*}{\tau_i - \tau^-} - (1 - v) \frac{\xi_i - \xi^*}{\xi_i - \xi^-} \quad (10)$$

where $\tau^* = \{ \min_{1 \leq j \leq m} \tau_j \}$, $\tau^- = \{ \max_{1 \leq j \leq m} \tau_j \}$, $\xi^* = \{ \min_{1 \leq j \leq m} \xi_j \}$, $\xi^- = \{ \max_{1 \leq j \leq m} \xi_j \}$ and v is introduced as weight of strategy of the majority of criteria.

Step 7. Rank the decision alternatives in ascending order based on Q_i , τ_i , and, φ_i .

Step 8. Recommend a compromise solution based on the Acceptable Advantage and Acceptable Stability rules which are defined as follows:

The advantage of the nominated alternative: $Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{m-1}$ where $A^{(2)}$ demonstrate the 2nd location in the increasing order of Q_i . The proposed alternative: $A^{(1)}$ must be the 1st location in the increasing order of φ_i or τ_i . If the first criterion is not satisfied, it can be argued that the alternatives $A^{(1)}$ and $A^{(2)}$ are similar solutions. In this case, $A^{(2)}$ do not have an advantage over $A^{(1)}$. When the second rule is not fulfilled, decision-making lacks stability. Consequently, the positions of $A^{(1)}$ and $A^{(2)}$ remain the same in the ascending order of alternatives (Yilmaz and Caliskan, 2023).

Numerical analysis and results

Hydrogen energy is an important resource for addressing environmental concerns such as the global energy crisis and climate change. The key to a sustainable energy system lies in the increasing implementation and use of renewable energies, which is why hydrogen storage is crucial for the efficient use of this energy.

Currently, hydrogen storage techniques vary depending on specific requirements. With ongoing advancements and research into materials, significant improvements are expected in the future. The key to a sustainable energy system lies in the growing adoption and use of renewable energies. However, different hydrogen storing methods are risky.

In this study, the weights of the decision makers (DMs) are assumed to be $\lambda_1 = 0.20$, $\lambda_2 = 0.20$, $\lambda_3 = 0.30$, and $\lambda_4 = 0.30$. The decision maker has carried out the linguistic terms provided in Table 3. The assessments of the alternatives and the criteria weights, are detailed in Table 3 and Table 4, respectively.

Table 3. DMs' opinions on alternatives

Criteria	Decision Makers	Alternatives			
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
C ₁	DM1	MP	VG	MP	MG
	DM2	MG	VG	MP	MP
	DM3	MP	MP	MP	MP
	DM4	MMP	VG	F	MP
C ₂	DM1	VG	MP	MG	MG
	DM2	VG	MP	MP	VG
	DM3	MG	VG	MP	MP
	DM4	MG	MG	MP	MG
C ₃	DM1	MP	MP	MP	VG
	DM2	VG	MP	MG	MG
	DM3	MP	VG	MP	VG
	DM4	MG	MP	MP	MP
C ₄	DM1	MP	MG	VG	MG
	DM2	MP	MP	VG	MP
	DM3	MP	MP	MP	MP
	DM4	MP	MG	VG	MP
C ₅	DM1	MG	MG	VG	MP
	DM2	VG	VG	VG	MG
	DM3	MP	MG	MP	MP
	DM4	MG	VG	VG	MP

Table 4. Decision maker's perspective on the criteria weights

Criteria	Decision Makers			
	DM ₁	DM ₂	DM ₃	DM ₄
C ₁	MH	MH	M	VH
C ₂	VH	VH	VH	M
C ₃	MH	MH	M	M
C ₄	VH	MH	M	MH
C ₅	VH	VH	MH	ML

The proposed IF-VIKOR method is used to evaluate the hydrogen energy storage alternatives. The evaluation process is carried out as follows:

Step 1: The decision matrix is calculated by using Eq. 1 and the criteria weights (ω_j) are computed by Eq. 3, demonstrated in Table 5.

Table 5. Fuzzy decision matrix and assessment of criteria weight

	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅	
A ₁	(0,3933	0,5351)	(0,4082	0,4852)	(0,4082	0,4852)	(0,7945	0,1858)	(0,7945	0,18:
A ₂	(0,7945	0,1858)	(0,6450	0,2873)	(0,5562	0,3732)	(0,5000	0,3896)	(0,8035	0,16:
A ₃	(0,4082	0,4852)	(0,6372	0,2832)	(0,7382	0,2213)	(0,4082	0,4852)	(0,4082	0,48:
A ₄	(0,4082	0,4852)	(0,7774	0,1768)	(0,5783	0,3388)	(0,3500	0,5500)	(0,6372	0,28:
w _j	(0,5505	0,3956)	(0,8529	0,0866)	(0,6273	0,3190)	(0,6552	0,2665)	(0,7575	0,15:

Step2: Normalized fuzzy decision matrix and weight of criteria are computed by using Eq. 4, demonstrated in Table 6.

Table 6. Normalized fuzzy decision matrix and weight of criteria

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
A ₁	0	0	0	1	0,03393919
A ₂	1	0,64158565	0,44349226	0,35952361	0
A ₃	0,06082171	0,62789501	1	0,14099733	1
A ₄	0,06082171	1	0,52362643	0	0,41110969
w _j	0,1920479	0,29963811	0,2187983	0,23464254	0,05487316

Step 3: The positive and negative ideal solutions are computed by using Eq. 5 regarding criteria (C₁-C₅).

Table 7. The positive and negative ideal solutions

	Min		Min		Min		Min		Min	
	C_1		C_2		C_3		C_4		C_5	
f_j^*	0,79451	0,18575	0,77735	0,17682	0,73821	0,22130	0,79451	0,18575	0,40820	0,48521
f_j^-	0,39333	0,53506	0,40820	0,48521	0,40820	0,48521	0,35000	0,55000	0,80347	0,16139

Step 4: Calculate the normalized fuzzy differences \tilde{d}_{ij} by using Eqs. 6 and 7.

Table 8. Normalized fuzzy decision matrix and weight of criteria

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1	1	1	1	0	0,96606081
A_2	0	0,35841435	0,55650774	0,64047639	1
A_3	0,93917829	0,37210499	0	0,85900267	0
A_4	0,93917829	0	0,47637357	1	0,58889031

Step 5: τ_i and ξ_i are calculated by using Eq. 8 and 9 as demonstrated in Table 9.

Table 9. τ_i and ξ_i values

	A_1	A_2	A_3	A_4
τ_i	0.7635	0.4343	0.4934	0.5516
ξ_i	0.2996	0.1503	0.2016	0.2346

Step 6: VIKOR index Q_i is calculated by using Eq. 10 as demonstrated in Table 10.

Table 10. VIKOR index Q_i values

	A_1	A_2	A_3	A_4
Q_i	1.0000	0.0000	0.2287	0.4188

Step 7 and 8: Hydrogen energy storage alternatives sorted τ_i , ξ_i , and Q_i .

Table 11. Rank of storage alternatives in wind power plants based on Q_i values

	A_1	A_2	A_3	A_4
τ_i	1	4	3	2
ξ_i	1	4	3	2
Q_i	1	4	3	2

The results of τ_i , ξ_i , and Q_i are thoroughly analyzed using the acceptable advantage and acceptable stability rules. Based on these analyses, the key barrier identified in the study is Gas Phase Storage (A_1). This method is determined to be the most significant challenge in the context of hydrogen energy storage. The storage alternatives in hydrogen energy storage are ranked as $A_1 > A_4 > A_3 > A_2$ under the five criteria ($C_1 - C_5$).

Conclusion and Recommendations

This research is focused on presenting a fuzzy decision-making model specifically designed to evaluate the various storage alternatives involved in hydrogen energy storage alternatives. Hydrogen energy, which is increasingly seen as a promising solution to the global energy crisis and the growing concerns about climate change, offers a variety of significant benefits. These include its high energy density, high calorific value, and the abundance of natural resources available for its production. Additionally, hydrogen energy stands out because it produces no pollution or carbon emissions, making it an environmentally friendly and sustainable option for the future of energy. Energy storage is a vital component in the transition to renewable energy systems, serving as a key enabler for ensuring the reliable and efficient use of renewable energy sources. Hydrogen energy, with its impressive conversion efficiency and exceptional capacity for energy storage, is increasingly seen as a promising solution for a wide range of industrial applications. The main objective of this chapter is to create a robust decision-making model that can effectively rank hydrogen energy storage alternatives. In the proposed model, four key are assessed through a combination of both numerical data and verbal descriptions, taking into account five established assessment criteria. To enhance the accuracy and thoroughness of the evaluation process, a fuzzy multi-criteria decision-making methodology is utilized. This approach ensures that all relevant factors are considered, providing a comprehensive and reliable framework for determining the different hydrogen storage alternatives. By applying this method, the chapter aims to identify the most and least hydrogen storage alternatives, providing valuable insights for decision-makers in the energy sector. In this study, the IF-VIKOR approach is proposed as a method to evaluate and rank the hydrogen energy storage alternatives. The proposed approach is applied to a numerical example that incorporates four storage alternatives and five criteria.

For future research, it is suggested that different weights be applied to the criteria to analyze the sensitivity of the proposed model. Additionally, an optimization model could be employed to determine the optimal restrictions for the criteria weights, improving the accuracy and applicability of the model. The IF-VIKOR method proposed in this study could also be integrated with other multi-criteria decision-making (MCDM) models to calculate the subjective weights of the criteria, providing a more nuanced evaluation. Furthermore, various types of fuzzy logic could be explored to expand the capabilities and robustness of the proposed IF-VIKOR method, potentially enhancing its effectiveness in diverse contexts. To thoroughly assess the model's effectiveness, it should be compared with other MCDM methods, particularly those based on different fuzzy logic concepts, in order to identify any potential advantages or limitations.

References

- Barthelemy, H., Weber, M., & Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254–7262. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>
- De Jongh, P. E., & Adelhelm, P. (2010). Nanosizing and nanoconfinement: New strategies towards meeting hydrogen storage goals. *ChemSusChem*, 3(12), 1332–1348. <https://doi.org/10.1002/cssc.201000248>
- Haktanır, E., & Kahraman, C. (2024). Integrated AHP & TOPSIS methodology using intuitionistic Z-numbers: An application on hydrogen storage technology selection. *Expert Systems with Applications*, 239(October 2023), 122382. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122382>
- Jahangiri, M., Shamsabadi, A. A., Mostafaeipour, A., Rezaei, M., Yousefi, Y., & Pomares, L. M. (2020). Using fuzzy MCDM technique to find the best location in Qatar for exploiting wind and solar energy to generate hydrogen and electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 13862–13875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.101>
- Juangsa, F. B., Irhamna, A. R., & Aziz, M. (2021). Production of ammonia as potential hydrogen carrier: Review on thermochemical and electrochemical processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14455–14477. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.214>
- Karatas, M. (2020). Hydrogen energy storage alternatives selection using fuzzy axiomatic design and analytic hierarchy process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(32), 16227–16238. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.130>
- Kim, D. H., Lim, J. Y., Park, W. Il, & Joe, C. H. (2022). Quantitative risk assessment of a mobile hydrogen

- refueling station in Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(78), 33541–33549. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.194>
- Li, H., Cao, X., Liu, Y., Shao, Y., Nan, Z., Teng, L., ... Bian, J. (2022). Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges. *Energy Reports*, 8, 6258–6269. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.067>
- Mazloomi, K., & Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024–3033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.028>
- Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Mulky, L., Srivastava, S., Lakshmi, T., Sandadi, E. R., Gour, S., Thomas, N. A., ... Sudhakar, K. (2024). An overview of hydrogen storage technologies – Key challenges and opportunities. *Materials Chemistry and Physics*, 325(July), 129710. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129710>
- Niaz, S., Manzoor, T., & Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>
- Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M., Mahmoud, M. S., Elsaid, K., Obaideen, K., ... Sayed, E. T. (2024). Multiple-criteria decision-making for hydrogen production approaches based on economic, social, and environmental impacts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52(PA), 854–868. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.293>
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Özkan, B., Kaya, İ., Cebeci, U., & Başlıgil, H. (2015). A Hybrid Multicriteria Decision Making Methodology Based on Type-2 Fuzzy Sets For Selection Among Energy Storage Alternatives. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(5), 914–927. <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1084715>
- Ren, J., Musyoka, N. M., Langmi, H. W., Mathe, M., & Liao, S. (2017). Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 289–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.195>
- Rivard, E., Trudeau, M., & Zaghbi, K. (2019). Hydrogen storage for mobility: A review. *Materials*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/ma12121973>
- Sadhasivam, T., Kim, H. T., Jung, S., Roh, S. H., Park, J. H., & Jung, H. Y. (2017). Dimensional effects of nanostructured Mg/MgH₂ for hydrogen storage applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(January), 523–534. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.107>
- Sahaym, U., & Norton, M. G. (2008). Advances in the application of nanotechnology in enabling a “hydrogen economy.” *Journal of Materials Science*, 43(16), 5395–5429. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2749-0>
- Tarhan, C., & Çil, M. A. (2021). A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage alternatives. *Journal of Energy Storage*, 40(May), 102676. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102676>
- Usman, M. R. (2022). Hydrogen storage alternatives: Review and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167(July 2020), 112743. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112743>
- Yilmaz, I., & Caliskan, E. (2023). Qualitative Analysis Method for Evaluation of Risk and Failures in Wind Power Plants: A Case Study of Turkey. In *Advances in Reliability, Failure and Risk Analysis* (pp. 285-302). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Zhang, F., Zhao, P., Niu, M., & Maddy, J. (2016). The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 14535–14552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>
- Zhang, Y., Jia, Z., Yuan, Z., Yang, T., Qi, Y., & Zhao, D. (2015). Development and Application of Hydrogen Storage Dong-liang ZHA0 2 0. Key Laboratory of Integrated Inner Mongolia Exploitation of Baiyuanabon Multi-metal Resources. *Journal of Iron and Steel Research*, 22(9), 757–770. Retrieved from

www.sciencedirect.com

Zhou, L., Zhou, Y., & Sun, Y. (2004). Enhanced storage of hydrogen at the temperature of liquid nitrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(3), 319–322. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00155-1)

**COST-EFFECTIVE AND SUSTAINABLE OFF-GRID HYBRID ENERGY SYSTEMS:
OPTIMIZING HYDROGEN INTEGRATION IN MICROGRIDS USING HOMER PRO****Aykut Fatih GÜVEN**Asst. Prof. Dr., Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering,
Yalova-Türkiye

(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-1071-9700

Abstract

This study provides a comprehensive analysis of a hybrid renewable energy system tailored for a remote, off-grid hotel, emphasizing the economic and operational optimization through hydrogen storage integration. In HOMER Pro software, the configuration encompasses solar photovoltaic (PV) panels, wind turbines, a gasifier, an electrolyzer, and hydrogen storage to establish a resilient and sustainable energy solution. Key performance indicators, such as net present cost (NPC), levelized cost of energy (LCOE), and emissions, were evaluated across multiple scenarios. Results indicate that the hydrogen-integrated hybrid system achieves a renewable energy penetration rate of 100%, significantly reduces operating costs, and minimizes environmental impact, with an LCOE of \$1.68/kWh. Notably, the gasifier and PV components constituted the largest cost allocations, while the fuel cell and electrolyzer demonstrated effective energy storage and conversion, enhancing system resilience during periods of low renewable output. These findings underscore the suitability of hydrogen-enhanced hybrid microgrids for isolated, off-grid applications and offer insights into optimizing component configurations for sustainability and cost-effectiveness.

Keywords: Hybrid renewable energy system, Off-Grid microgrid, Hydrogen storage, Economic optimization, Sustainable energy solutions.

Introduction

As global energy demand continues to rise, the transition from fossil fuels to renewable energy sources has become crucial to addressing climate change and achieving long-term sustainability (Güven, 2024a). This shift toward cleaner energy has led to an increasing focus on microgrids—localized energy systems capable of integrating various renewable sources, such as solar, wind, and hydrogen (Güven & Mengi, 2023). Microgrids are particularly valuable in both urban and remote settings, offering resilience, flexibility, and autonomy by balancing local generation and demand. However, the inherent intermittency of renewable sources poses significant challenges in maintaining the stability and reliability of microgrids, especially in off-grid systems designed for remote applications, such as isolated hotels or other facilities located far from centralized grids, where backup from the main grid is unavailable (Güven & Yücel, 2023).

Hydrogen has emerged as a promising energy carrier for addressing these challenges because of its high energy density, long-term storage capability, and potential for emissions-free energy conversion when used in fuel cells (FCs) (Güven & Hatipoğlu, 2022). By storing surplus energy produced by renewables in the form of hydrogen, microgrids can achieve extended energy autonomy, reducing the need for conventional fuel-based generators and providing a sustainable backup option. When integrated with FCs, hydrogen storage systems can convert stored hydrogen back to electricity during periods of low renewable generation, enhancing the load-following capability and reliability of the microgrid. The combined use of hydrogen storage and battery storage represents a strategic advancement in microgrid technology, balancing short-term fluctuations with batteries and longer-term storage with hydrogen (Güven & Mete, 2021).

In recent years, significant research has been conducted on renewable integrated microgrids with battery storage. However, studies incorporating hydrogen storage and FC technology are relatively limited, particularly for off-grid microgrids where hydrogen integration could significantly enhance resilience and reduce dependence on fossil fuels in remote areas. The few existing studies highlight the potential of hydrogen for improving system resilience and lowering operational costs; however, there remains a gap in understanding its effectiveness, specifically in off-grid microgrid applications. A comprehensive analysis of hydrogen

storage's impact on cost, reliability, and environmental impacts in remote off-grid settings is needed to guide future implementations and policy development (Güven & Yücel, 2024).

This study contributes to the field in several key ways. First, this study evaluates hydrogen-based off-grid microgrids, focusing on the operational and economic advantages of hydrogen integration for remote, standalone applications. Second, this study examines the synergistic effects of combining hydrogen storage with traditional battery storage, quantifying the benefits in terms of load management, energy independence, and renewable penetration. Lastly, this study offers insights into the role of electrolyzers and FCs in supporting microgrid flexibility, with implications for reducing greenhouse gas emissions and enhancing sustainability in energy systems.

In summary, this research aims to advance the understanding of hydrogen storage applications in renewable-integrated off-grid microgrids by demonstrating how these systems can support energy resilience and environmental goals. By presenting a detailed analysis of hydrogen-based microgrid configurations tailored for remote locations, this study provides a foundation for the development of more sustainable and adaptable energy solutions to address growing energy challenges in isolated settings.

Literature Review

Extensive research has focused on enhancing the efficiency and performance of hybrid energy systems. Researchers have employed various optimization techniques to enhance the efficiency and feasibility of hybrid microgrids powered by renewable energy sources. Babatunde et al. (2022) used HOMER software to explore diverse system configurations for meeting residential energy demands and found that multi-criteria decision-making is essential for viable hydrogen-based hybrid systems. Gu et al. (2022) focused on green methanol production in China by integrating CO₂ hydrogenation units as loads. Their findings indicate that oxygen sales and CO₂ sourcing significantly impact methanol production costs. In another study, Nasrabadi and Korpeh (2023) applied genetic algorithms to optimize a solar-wind-driven multi-generation system, achieving a 20.7% improvement in energy efficiency and a 2% reduction in total system cost. To improve the reliability of hybrid energy systems, GAMS-MILP was utilized by Wang et al. (2023) to investigate the effects of PV (Photovoltaic)/Wind turbine (WT) curtailment penalties, revealing a substantial impact on system efficiency, particularly within hydrogen energy systems. Sultan et al. (2021) employed an improved artificial ecosystem optimization algorithm that outperformed conventional methods by reducing both costs and emissions more effectively. Additionally, Li et al. (2023) showed that incorporating source-load interactions in their optimization reduced the total annualized cost by 7.3% and the levelized cost of energy by 10.3%. Samy et al. (2021) applied the hybrid search optimization technique to a PV-WT-FC system and demonstrated that this configuration could economically supply electricity to commercial users in Egypt at a competitive cost of \$0.0628/kWh, lower than grid-purchased electricity. Bahri et al. (2023) used a mixed-integer linear programming approach to assess the potential of hydrogen storage for electric vehicle charging stations, reporting a 17.7% reduction in emissions and lower costs. These studies collectively underscore the critical role of hybrid energy systems in enhancing renewable energy integration, improving system reliability, and achieving cost and emission reductions.

Materials and Methods

Modeling and optimization

HOMER Pro is a robust software tool for simulating and optimizing hybrid energy systems that leverage renewable resources. Developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in the United States, HOMER Pro facilitates essential analyses in hybrid system design, such as selecting suitable components, determining optimal quantities, estimating system costs, and assessing anticipated operational expenses (Güven & Poyraz, 2021).

In this study, HOMER Pro licensed software was used to design an energy solution for a remote rural hotel located far from urban infrastructure. The software offers extensive options for inputting data related to loads, resources, components, and other project-specific parameters. During the initial design phase, essential energy load information, including options for electrical, thermal, and hydrogen loads, was entered. HOMER Pro

distinguished between primary and secondary loads, prioritizing the primary load to ensure consistent system performance.

Within HOMER Pro's components section, users can select various energy sources, such as generators, PV systems, WTs, storage units, converters, and hydro systems. The component selection is guided by data available in HOMER Pro's library, supporting the development of a tailored hybrid energy solution for a specific site (Güven et al., 2023). The software's Resources section provides options for energy sources like solar, wind, thermal, fuels, hydro, and biomass. HOMER Pro can automatically retrieve site-specific environmental data (e.g., sunlight hours, temperature, wind speeds) from the NASA database while also allowing manual data entry when user-specific information is available (Güven & Yörükeren, 2022).

For the simulation and optimization of HOMER Pro, users input hourly load requirements and economic parameters for each system component (Güven & Yörükeren, 2024). The optimization process in HOMER Pro identifies the most cost-effective configuration by calculating the net present cost (NPC) for a range of feasible systems that can meet the projected load requirements, ensuring an efficient energy solution for the rural hotel's unique needs.

In this study, a hybrid energy system comprising solar panels and WTs was designed to meet the energy requirements of a hotel located in a remote, rural area. The project lifetime was set to 20 years, and the system was optimized for continuous operation in an off-grid setting. Using HOMER Pro software, we performed simulations to determine the ideal configuration of renewable components to ensure a reliable supply of power over the long term, despite the variability of solar and wind resources.

The hybrid system integrates PV panels, WTs, an electrolyzer, and a hydrogen FC, with hydrogen storage serving as the primary energy buffer instead of a battery. The absence of battery storage in the design directs the system to rely on hydrogen as the key medium for energy storage, thereby allowing surplus energy from renewable sources to be converted into hydrogen. This hydrogen is stored and later converted back into electricity via the FC during periods when renewable generation is insufficient to meet the demand (Güven, 2024b).

Key economic parameters, including NPC and levelized cost of energy (LCOE), were analyzed within the HOMER Pro environment to achieve cost-effective and sustainable energy production. The optimization focused on minimizing operational costs over the project's 20-year lifespan while maintaining uninterrupted power supply. This configuration supports high renewable energy penetration, reduces reliance on conventional generators, and provides a resilient energy solution tailored to the unique needs of isolated locations (Güven, 2017).

System Design and Configuration

The system is designed to support a rural hotel in a remote area by employing a hybrid renewable energy setup to ensure reliable and sustainable energy supply. The configuration combines PV panels, a wind turbine (G1), a hydrogen FC, an electrolyzer, a hydrogen storage tank (HTank), and a generator (Gen50), integrated to supply both AC and DC power to meet the hotel's daily electrical load of approximately 4088.10 kWh, with a peak demand of 512.49 kW (Figure 1).

In this design, the PV panels and WT serve as primary renewable energy sources, supplying electricity directly to the AC load through a converter and contributing to the DC system when needed. Excess renewable energy generated during low-demand periods is stored via the electrolyzer in the hydrogen tank as hydrogen gas, which can later be converted back to electricity by the FC to meet the demand during periods of low solar or wind availability. The generator acts as a backup source, ensuring system resilience and continuous power supply during prolonged periods of insufficient renewable energy or high demand.

This hybrid configuration is optimized to balance renewable energy generation, storage, and backup to provide an autonomous and eco-friendly energy solution tailored to the specific needs of an off-grid hotel.

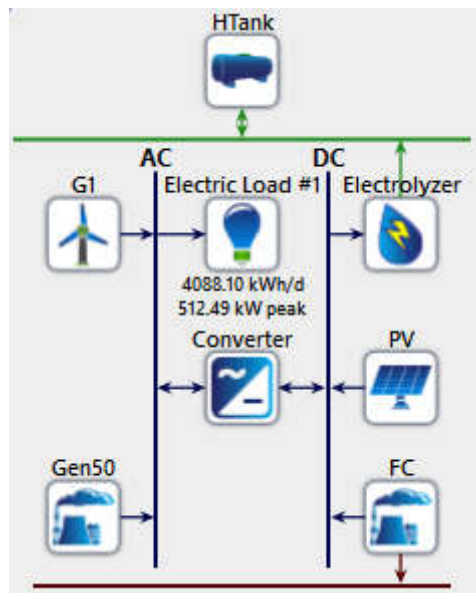


Figure 1. General scenario system configuration

Optimization results

In this hybrid energy system configuration, a PV array of 3,500 kW serves as the primary renewable energy source, generating 6,648,160 kWh annually. With a capital cost of \$4,550,000, it operates without any associated fuel or maintenance costs, demonstrating its economic viability for long-term, stable energy production. The WT (G1), also rated at 500 kW, produces an additional 38,895 kWh per year, with an operational and maintenance (O&M) cost of \$33,300 and a capital cost of \$333,500. Together, these renewable components support the system's goal of maintaining a high renewable fraction and reaching 100% renewable penetration.

A key component of energy stabilization is the FC, which is rated at 500 kW and converts hydrogen stored into electricity as needed. The FC produces 16,864 kWh annually and consumes 5,902 kg of hydrogen fuel, incurring an O&M cost of \$6,110 per year. This hydrogen fuel is supplied by an electrolyzer, which is also rated at 100 kW, and is designed to produce and store hydrogen during periods of excess renewable energy production. The hydrogen tank (HTank) has a storage capacity of 100 kg, allowing it to maintain a steady fuel supply for the FC.

To integrate these AC and DC components seamlessly, a 2,000-kW converter was utilized to balance and convert the power between the AC and DC buses. In the first configuration scenario, the converter operates with a mean rectifier output of 0.211 kW and an inverter mean output of 78.5 kW. In the second scenario, these outputs shift to 0.974 kW and 69.2 kW, respectively, reflecting adjustments based on the system demand. The capital cost of the converter is approximately \$150,000.

In terms of financial performance, the system's NPC varies between \$40.8 million and \$46.3 million, with LCOE ranging from \$1.68 to \$1.91 per kWh. Operating costs are projected at \$2.05M in the first configuration, rising to \$2.40M in the second. Initial capital investments also differ slightly between configurations, estimated at \$7.47 million and \$7.24 million, respectively.

The system operates for a total of 5,157 hours in one configuration and 5,751 hours in the other, with total annual energy production reaching 768,965 kWh and 860,862 kWh. The fuel consumption of the generator (Gen50), which serves as a backup generator, was 5,144 tons in the first scenario and 6,567 tons in the second scenario, with fuel costs of \$771,585 and \$985,120, respectively. The generator's O&M costs also vary, being \$618,840 in the first configuration and \$862,650 in the second.

Overall, this hybrid system, which combines solar PVs, WTs, FCs, and hydrogen storage with a converter, provides a robust solution for reliable energy in remote areas. The detailed cost analysis underscores the system's economic feasibility and highlights the efficiency achieved by integrating multiple renewable sources with hydrogen-based storage, which enables sustained power availability even under off-grid conditions.

Findings and Discussion

In this section, a detailed analysis of the cost structure and operational performance metrics of the hybrid energy system. Figure 2 illustrates the total costs associated with each component, including the capital, replacement, operational, and salvage costs. This analysis provides insights into financial distribution across key elements of the system.

As depicted in Figure 2, the hybrid system incurs a total NPC of approximately \$40.84 million, with an LCOE of \$1.68 per kWh and an annual operating cost of \$2.05 million. The Gasifier represents the largest share of the NPC, with a total cost of \$24.88 million. This substantial expenditure, largely due to high initial capital and replacement costs, underscores the financial commitment required for gasification technology, which is essential for maintaining energy stability, particularly during periods of low renewable energy production.

The PV system also represents a significant portion of the total cost, amounting to \$10.24 million. Although the PV system has a high initial capital cost (approximately \$4.55 million), it entails minimal ongoing costs because it requires neither fuel nor frequent replacements. This characteristic aligns with the long-term economic advantages of solar technology, reaffirming its viability as a sustainable and cost-effective energy source in the hybrid system.

The FC component accounted for a total moderate cost of \$3.09 million, primarily due to replacement expenses (around \$1.95 million) and ongoing fuel costs. As a critical component for energy storage and conversion, the FC allows hydrogen, produced during periods of excess renewable generation, to be converted back to electricity, thereby enhancing the system's operational flexibility.

The System Converter and WT components exhibit relatively lower costs compared to gasifier and PV systems. The system converter, which is essential for AC-DC energy conversion, contributes \$775,867 to the total NPC, whereas the WT incurs a total cost of \$874,924. Both components support primary generation and storage technologies, thereby augmenting the system's capacity to meet varying load demands with efficiency.

The Generic Electrolyzer and Hydrogen Tank play vital roles in hydrogen production and storage although they represent a smaller share of the total cost. The electrolyzer had a total cost of \$539,380, while the hydrogen tank accounted for \$194,220. Together, these components enable hydrogen production and storage, thus supporting the FC in mitigating renewable energy intermittency.

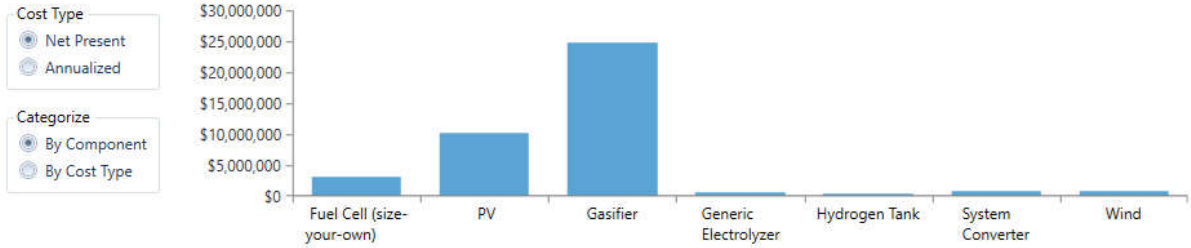
In summary, the cost distribution presented in Figure 2 reflects a strategically balanced allocation across diverse technologies, with the gasifier and PV systems dominating the overall financial structure. This configuration highlights the role of hybrid systems in delivering resilient and sustainable power, especially in off-grid applications where independence from conventional grids is critical.

Simulation Results

System Architecture: Gasifier (400 kW) Generic Electrolyzer (100 kW)
 PV (3,500 kW) Fuel Cell (size-your-own) (500 kW) Hydrogen Tank (100 kg)
 Wind (500) System Converter (2,000 kW) HOMER Load Following

Total NPC: \$40,844,540.00
 Levelized COE: \$1.68
 Operating Cost: \$2,052,830.00

System Converter Generic Electrolyzer Hydrogen Tank Emissions
 Cost Summary Cash Flow Compare Economics Electrical Hydrogen Fuel Summary Gasifier Fuel Cell (size-your-own) Renewable Penetration PV Wind



Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Fuel Cell (size-your-own)	\$1,500,000.00	\$1,953,474.95	\$99,342.43	\$0.00	-\$462,352.97	\$3,090,464.41
PV	\$4,550,000.00	\$0.00	\$5,690,646.83	\$0.00	\$0.00	\$10,240,646.83
Gasifier	\$49,600.00	\$2,231,977.59	\$10,061,713.96	\$12,545,191.86	-\$6,386.46	\$24,882,096.96
Generic Electrolyzer	\$196,000.00	\$336,877.15	\$6,503.60	\$0.00	\$0.00	\$539,380.74
Hydrogen Tank	\$238,500.00	\$194,528.31	\$8,129.50	\$0.00	\$0.00	\$441,157.80
System Converter	\$600,000.00	\$441,970.09	\$0.00	\$0.00	-\$266,102.43	\$775,867.67
Wind	\$333,500.00	\$0.00	\$541,424.40	\$0.00	\$0.00	\$874,924.40
System	\$7,467,600.00	\$5,158,828.09	\$16,407,760.72	\$12,545,191.86	-\$734,841.85	\$40,844,538.81

Figure 2. Cost breakdown of system components in hybrid energy model

In Figure 3, the cash flow distribution over the 20-year project lifetime provides a detailed view of the financial structure for the hybrid energy system. The green bar at year 0 represents the substantial initial capital investment (approximately \$8 million) necessary to set up the essential system components. Then, the chart illustrates annual expenditures dominated by operating, fuel, and maintenance costs.

Replacement costs, highlighted in orange, occur periodically and represent planned equipment updates essential for maintaining system efficiency and reliability. Significant replacement expenditures are noted around years 9, 13, and 17, corresponding to the lifespan limits of critical components such as the FC and gasifier. These scheduled replacements ensure optimal system functionality and prevent costly downtime.

The fuel costs (in yellow) are consistent across the years, reflecting the fuel demand of the gasifier and FC. Operating costs, in a lighter shade of orange, contribute a steady annual expense, representing the routine maintenance and operational requirements necessary to sustain a system’s performance.

Finally, the positive cash flow in year 20 reflects the system’s salvage value, which partially offsets the final year’s operating expenses. This salvage income underscores the residual worth of certain components, adding value at the project's conclusion. Figure 3 illustrates a financially sustainable model with substantial initial costs balanced by steady operational efficiencies and planned component replacements, thus supporting the project’s long-term viability.

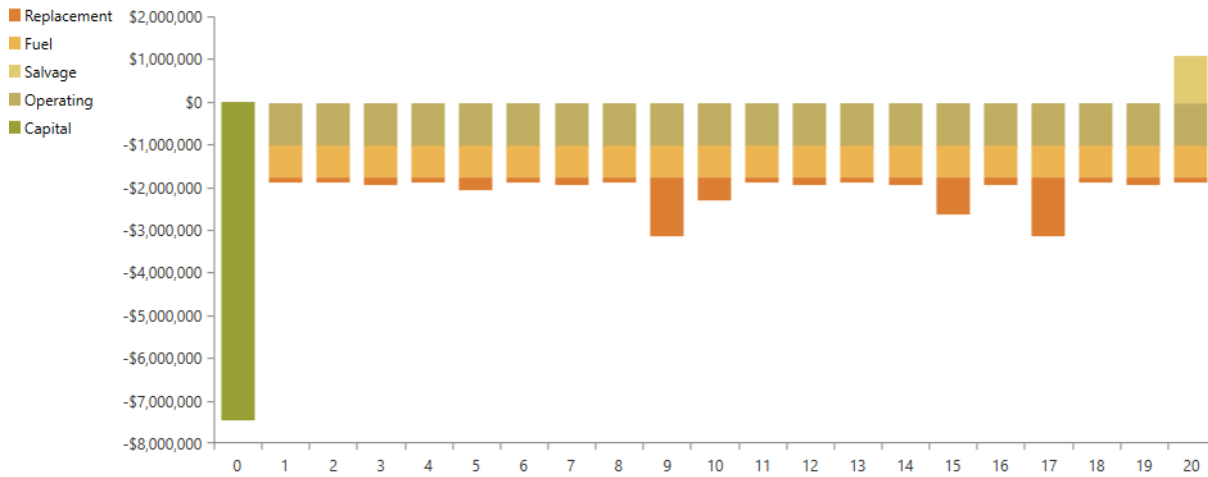


Figure 3. Annual cash flow distribution by cost type over the project lifetime

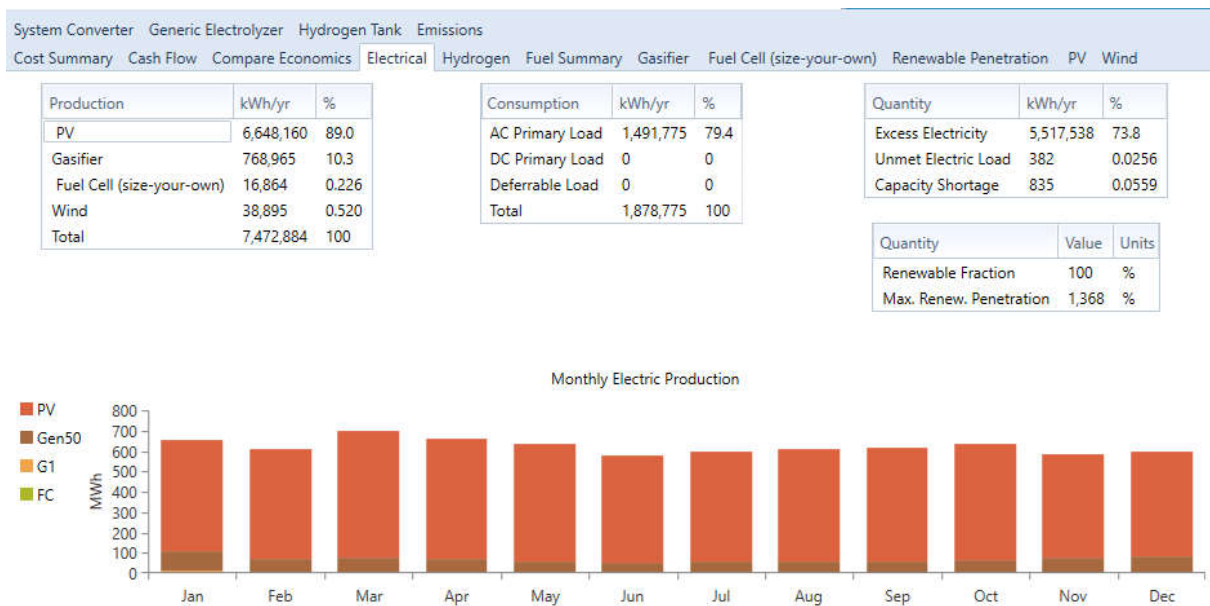


Figure 4. Monthly and annual energy production and consumption overviews

In Figure 4, the monthly breakdown of electric production reveals the dominance of PV power generation, which accounts for approximately 89% of the total annual energy output at 6,648,160 kWh/year. This high percentage underscores the primary role of solar energy in meeting the demands of hybrid systems. The gasifier contributes 10.3% (768,965 kWh/year), while the WT and FC add marginal contributions of 0.52% (38,895 kWh/year) and 0.226% (16,864 kWh/year), respectively. This distribution emphasizes the PV system’s capacity to satisfy both peak and base load demands, thus reducing the dependency on fuel-based components and further contributing to system sustainability.

The table on the right shows that the total consumption is 1,878,775 kWh/year, with the AC primary load consuming 79.4% of the production, leaving an excess generation of 5,517,538 kWh/year, equating to 73.8% of the total energy produced. This surplus reflects the potential for energy storage, export, and other applications, demonstrating the system’s robustness in meeting and exceeding local demand. Notably, the system maintains a renewable fraction of 100%, with the maximum renewable penetration reaching 1,368% during certain periods, thereby minimizing reliance on external or non-renewable energy sources.

The monthly production pattern remained fairly consistent throughout the year, with slightly higher output during the peak sunlight months. This stable production profile indicates the system’s reliability in sustaining a hotel’s energy needs in a rural, off-grid location. The marginal unmet load and capacity shortage values of

0.0256% and 0.0559%, respectively, reflect the system’s high resilience and capacity to handle seasonal or demand fluctuations, ensuring minimal disruptions in power availability.

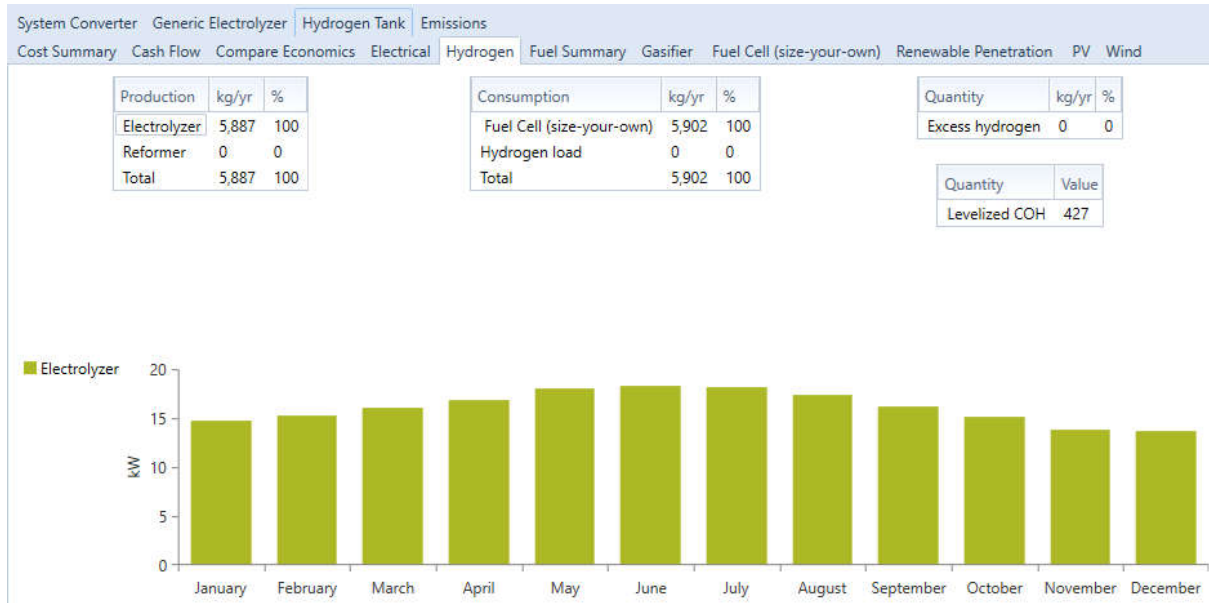


Figure 5. Monthly hydrogen production by electrolyzer and system consumption

The monthly performance of the electrolyzer is illustrated in Figure 5, showing a relatively steady hydrogen production rate throughout the year, averaging approximately 15 kW per month, with minor seasonal variations. The electrolyzer produces 5,887 kg/year of hydrogen, which constitutes 100% of the system’s hydrogen output. This steady production is essential for ensuring a reliable hydrogen supply to support the system’s energy storage and FC requirements, highlighting the electrolyzer’s role in buffering against renewable intermittency.

The hydrogen consumption closely aligns with the production levels, primarily utilized by the FC at a rate of 5,902 kg/year, which accounts for 100% of the system’s hydrogen usage. This close match between production and consumption underscores an efficient balance in the hydrogen subsystem, with no excess hydrogen generated over the year, thus optimizing resource use within the isolated microgrid framework. Furthermore, the levelized cost of hydrogen (LCOH) was calculated to be \$427/kg, indicating the economic viability of hydrogen integration in the overall hybrid energy system.

This balance between hydrogen production and utilization supports the sustainability and operational stability of microgrids under remote conditions, enabling consistent renewable energy storage and reliable energy supply, as evident from the absence of hydrogen excess. This configuration minimizes the reliance on nonrenewable sources while maintaining robust off-grid energy autonomy.



Figure 6. Biogas feedstock consumption patterns in microgrid systems

Figure 6 presents a comprehensive analysis of biogas feedstock consumption within a microgrid system, highlighting both daily and seasonal variations in usage. The total feedstock consumed over the year reaches 5,144 tons, with an average daily consumption of 14.1 tons/day and an hourly average of 0.587 tons/hour. The data illustrate a relatively steady consumption pattern although minor fluctuations are visible. These fluctuations are likely influenced by seasonal energy demand variations and renewable generation intermittency.

The bar chart on the left in Figure 6 displays the monthly average feedstock consumption rates, with peaks observed during the colder months (e.g., January and February), where demand is higher due to increased heating needs. Additionally, the heatmap on the right shows the daily variation across the year, where darker regions indicate lower consumption and lighter regions represent peak consumption. This pattern suggests efficient feedstock utilization aligned with energy needs, ensuring resource adequacy without excessive waste.

The bottom-line chart further details the continuous consumption pattern at hourly resolution, reinforcing the system's capability to maintain stable fuel utilization. This balance is essential for ensuring uninterrupted fuel supply for energy generation, especially in isolated settings where supply chain disruptions can impact resource availability. Consistent biogas feedstock usage contributes to the overall efficiency and reliability of the hybrid system, supporting sustainable off-grid operations and reducing reliance on external fuel sources.

Figure 7 provides an in-depth view of the gasifier's operational metrics and power output characteristics within the microgrid system over a one-year period. The gasifier operates for a total of 5,157 hours per year, with 433 starts, indicating moderate utilization and responsiveness to fluctuating load demands. The unit maintains an operational life of 0.291 years and a capacity factor of 21.9%, suggesting that it serves primarily as a supplementary power source to complement renewable inputs like PV and wind.

The gasifier's electrical production for the year was 768,965 kWh, with an average electrical output of 149 kW and a maximum output capability of 400 kW. This output range ensures flexibility when addressing different levels of demand. The specific fuel consumption was calculated as 4.68 kg/kWh, with a total fuel consumption of 5,144 tons/year, demonstrating the system's capability for efficient fuel-to-electricity conversion. The overall mean electrical efficiency was 14.0%, reflecting the system's energy conversion performance under hybrid operating conditions.

The heatmap in Figure 7 visually represents the gasifier's power output distribution throughout the year. The darkest regions indicate periods of minimal or no operation, while lighter areas represent peak operation, reaching up to 400 kW. These visual data suggest that the gasifier operates primarily during peak demand periods or when renewable sources are insufficient. The operational strategy, combined with the gasifier's

robust output, reinforces the microgrid’s resilience, especially in meeting critical loads during times of low renewable energy generation.

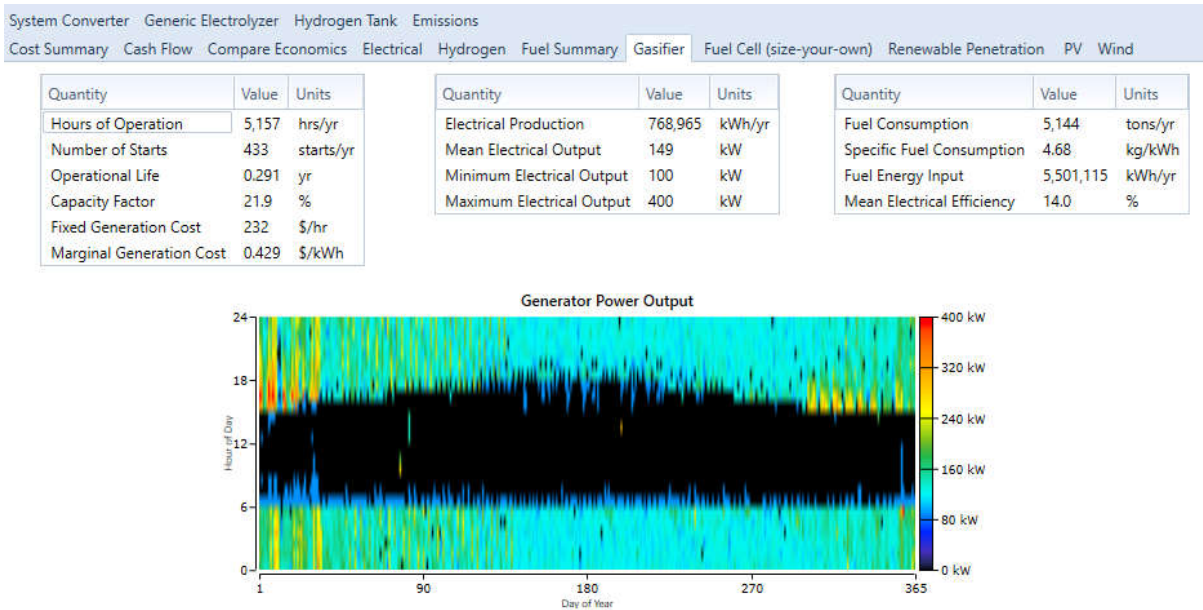


Figure 7. Annual performance and power output of the gasifier in a microgrid system

Figure 8 illustrates the performance metrics and power output characteristics of the FC component in a microgrid system over a one-year period. With 611 operational hours per year and 483 starts, the FC primarily functions as a supplementary power source, providing additional support during periods of high demand or low renewable availability. The FC demonstrated an operational lifespan of 8.18 years, indicating robust longevity under current load conditions.

The total electrical production from the FC is 16,864 kWh per year, with an average output of 27.6 kW and a peak output capability of 193 kW. The minimum output remains at zero, suggesting that standby periods are not required for FCs. The fuel consumption for the year was 5,902 kg, with a specific fuel consumption of 0.350 kg/kWh, indicating the FC’s efficiency in converting hydrogen to electrical energy. Additionally, the FC produces 107,931 kWh of thermal energy, highlighting its role in providing both electrical and thermal support for microgrids. The mean electrical efficiency is 8.57%, which is consistent with the FC’s operational strategy of providing targeted, peak support rather than continuous base-load power.

The heatmap in Figure 8 depicts the hourly power output distribution of the FC for each year. The data visualization shows intermittent high-intensity operation at specific times, which is likely aligned with peak demand or renewable shortfalls. This pattern highlights the FC’s responsive role within the microgrid, providing flexible, on-demand power to maintain grid stability and resilience.

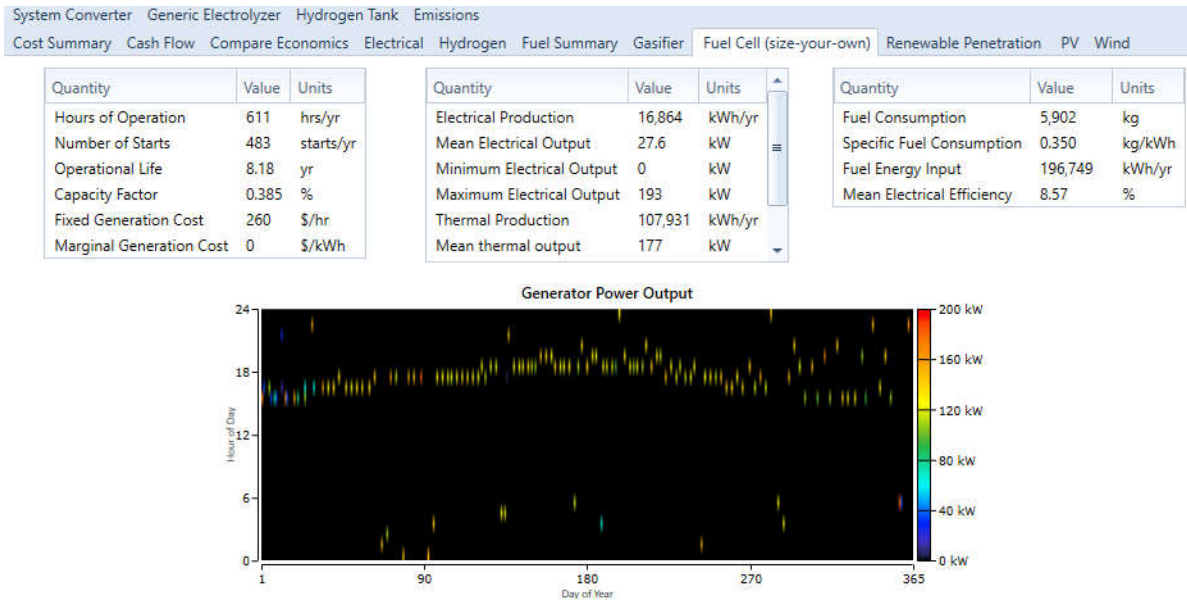


Figure 8. The operational profile and power output of fuel cells in microgrid systems

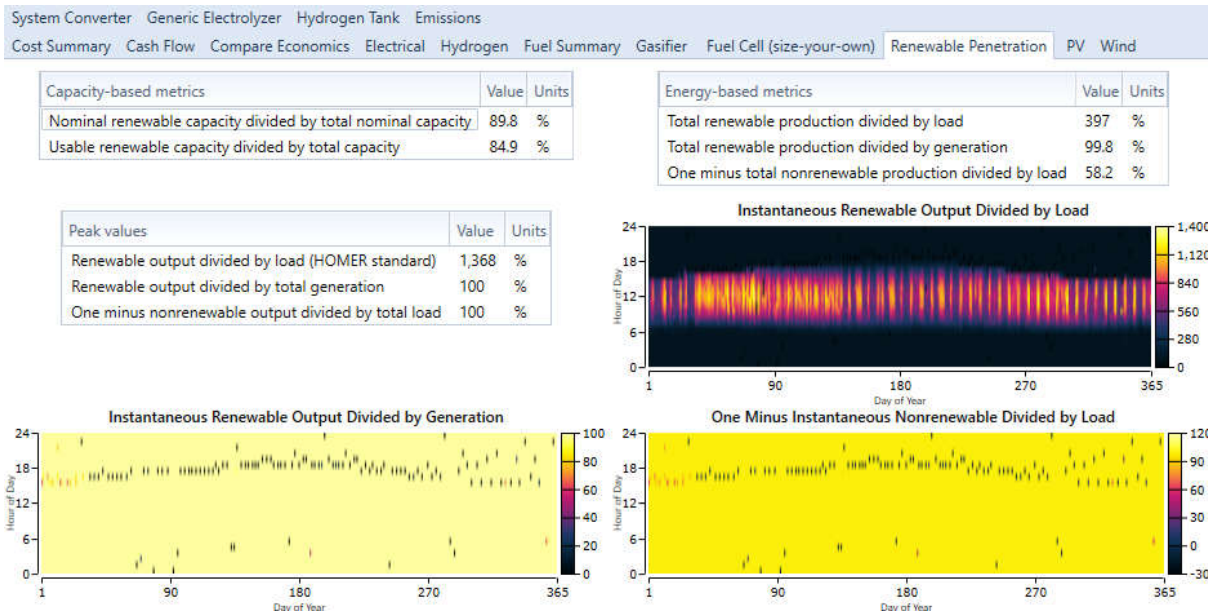


Figure 9. Renewable energy penetration metrics and capacity utilization in microgrid systems

Figure 9 provides an in-depth analysis of renewable energy penetration and capacity-based metrics for microgrid systems. The upper-left section of the figure highlights the capacity metrics, showing that 89.8% of the total nominal capacity is derived from renewable sources, while 84.9% of the usable capacity is effectively utilized. These high values indicate that the system is predominantly reliant on renewable resources, maximizing renewable input to meet energy demand efficiently.

The figure also presents energy-based metrics, with total renewable production accounting for 397% of the load, a clear indication of substantial excess capacity designed to meet peak demands and possibly charge storage units. Moreover, renewable energy represents 99.8% of total energy generation, underscoring the system's commitment to minimizing dependence on nonrenewable sources.

In the visual heatmaps, the “Instantaneous Renewable Output Divided by Load” graph displays the renewable energy output relative to the load across each hour of the year, with a consistently high renewable contribution. The “One Minus Instantaneous Nonrenewable Output Divided by Load” graph illustrates that nonrenewable generation remains below 20% of load demand, emphasizing the microgrid’s minimal reliance on fossil fuels.

The peak values section indicates that renewable energy output can exceed the load by up to 1,368%, underscoring the system's capacity to handle demand fluctuations and prioritize renewable integration.

These results validate the microgrid design for high renewable penetration, which aligns with sustainability goals and demonstrates resilience in balancing load with renewable sources, making the system well-suited for a sustainable, low-emission energy profile.

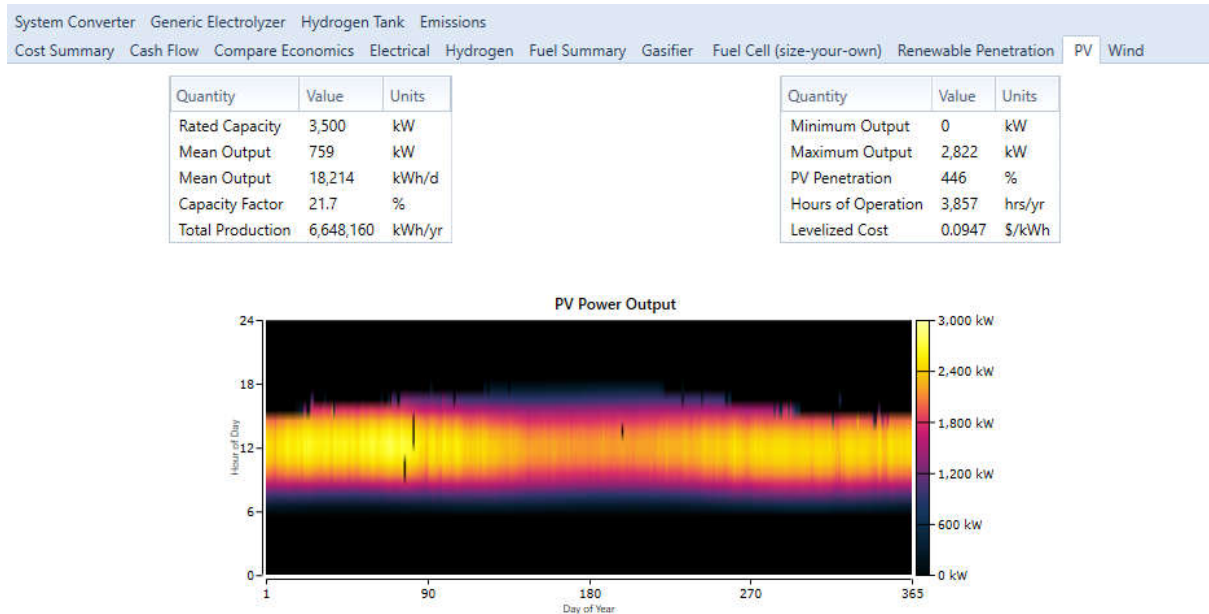


Figure 10. Annual PV power output profile and operational metrics

Figure 10 illustrates the performance and output profile of the PV system within the hybrid microgrid over the course of one year. The upper table provides critical metrics for PV operation, indicating a rated capacity of 3,500 kW and a mean output of 759 kW, which results in an average daily energy generation of 18,214 kWh/day. The system achieved a total annual production of 6,648,160 kWh, with a capacity factor of 21.7%. These values demonstrate the PV system's substantial contribution to the microgrid's energy requirements, confirming the effective integration of solar power as a core renewable resource.

The heatmap below shows the temporal distribution of PV power output throughout the year, revealing seasonal and daily variations. Notably, the maximum observed output reached 2,822 kW, with periods of high solar irradiance depicted in brighter colors, especially during the peak summer months. PV penetration, defined as the proportion of total solar generation, stands at 446%, highlighting the significant reliance on solar energy for meeting the demand during daylight hours.

The system operates for a total of 3,857 hours per year, with a levelized cost of energy from the PV system of \$0.0947 per kWh, indicating cost-effectiveness in renewable energy production. This PV output profile, characterized by seasonal variability and high penetration levels, underscores the PV system's role in bolstering the microgrid's renewable energy fraction, reducing the reliance on non-renewable backup sources. These metrics validate the design and operational parameters of a PV system for sustainable and cost-efficient energy generation within a hybrid microgrid setup.

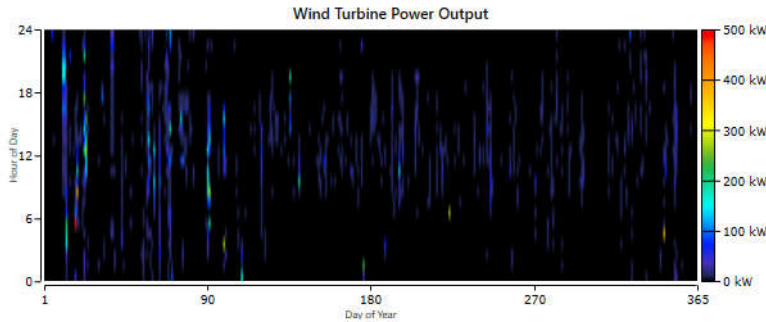
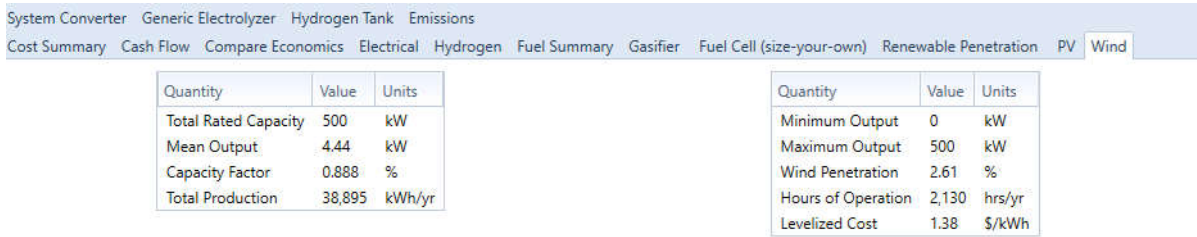


Figure 11. Wind turbine power output and performance metrics

Figure 11 illustrates the operational performance of the WT system within the microgrid, which has a total rated capacity of 500 kW. The WT contributed to the energy mix with an annual output of 38,895 kWh, achieving a low capacity factor of 0.888%, reflecting the limited availability of wind resources in this location. The mean power output was 4.44 kW, with production levels fluctuating significantly throughout the year, as indicated in the power output heatmap.

The heatmap shows the WT's output on an hourly basis across the year, with intermittent power generation peaking at 500 kW during periods of high wind speed, although there are substantial periods with minimal to no generation. This variability is characteristic of wind energy and underscores the importance of integrating complementary sources, such as solar and storage, to ensure consistent energy availability in microgrids.

Operating for 2,130 hours annually, the wind system's penetration into the overall energy contribution is relatively modest at 2.61%. This performance aligns with a levelized cost of electricity (LCOE) of \$1.38/kWh, which, while higher than other renewable sources in this system, is justifiable given the support it provides during high-demand periods.

Overall, the WT component enhances system resilience by providing additional renewable capacity, albeit intermittently. This analysis highlights the need for an optimized hybrid approach in which wind, solar, and hydrogen storage complement each other to balance the intermittency inherent in wind generation.

Figure 12 presents the operational performance of the system's inverter and rectifier components, highlighting their respective capacities, outputs, and efficiency metrics. The inverter, with a rated capacity of 2,000 kW, achieved a mean output of 78.5 kW, while the rectifier, also rated at 2,000 kW, operated with a mean output of only 0.211 kW. The maximum recorded outputs for the inverter and rectifier are 512 and 100 kW, respectively, indicating significant variability in the load conditions and energy conversion needs throughout the year.

The heatmaps of both the inverter and rectifier output profiles demonstrate daily and seasonal fluctuations in the energy demand and supply. The inverter operates for approximately 3,973 hours per year, producing 687,293 kWh annually, while the rectifier operates much less frequently, with 102 hours per year and an output of 1,848 kWh. This discrepancy reflects the system's load-following configuration, where the inverter supports the AC load demand more consistently, whereas the rectifier sees limited utilization due to lower DC charging needs or alternative storage availability.

Energy losses are also detailed in this analysis, with the inverter experiencing 76,366 kWh of losses annually, primarily due to conversion inefficiencies, while the rectifier's losses are comparatively low at 205 kWh. These losses contribute to an overall capacity factor of 3.92% for the inverter and 0.0105% for the rectifier, underscoring the significant impact of variable loads and renewable inputs on the system's performance.

The analysis indicates that while the inverter serves as a critical component for maintaining system stability by efficiently meeting AC loads, the rectifier’s role is supplementary, supporting occasional DC charging needs in the hybrid microgrid configuration. This output characterization emphasizes the importance of component optimization to enhance energy efficiency and system resilience in hybrid renewable systems.

Cost Summary Cash Flow Compare Economics Electrical Hydrogen Fuel Summary Gasifier Fuel Cell (size-your-own) Renewable Penetration PV Wind
System Converter Generic Electrolyzer Hydrogen Tank Emissions

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	2,000	2,000	kW
Mean Output	78.5	0.211	kW
Minimum Output	0	0	kW
Maximum Output	512	100	kW
Capacity Factor	3.92	0.0105	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of Operation	3,973	102	hrs/yr
Energy Out	687,293	1,848	kWh/yr
Energy In	763,659	2,053	kWh/yr
Losses	76,366	205	kWh/yr

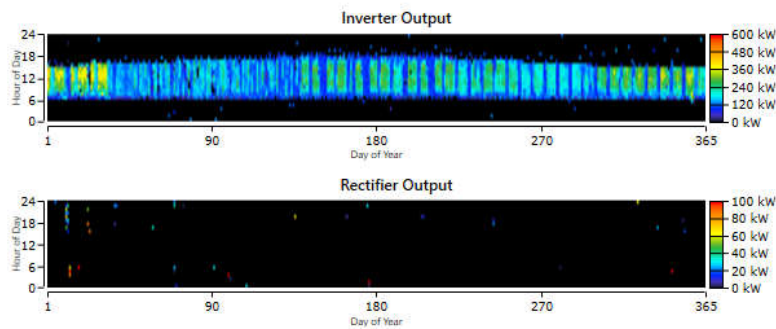


Figure 12. Inverter and rectifier output analysis of the microgrid system

Figure 13 illustrates the operational characteristics of the electrolyzer within the microgrid, focusing on the annual input power and hydrogen production performance. The electrolyzer is designed with a rated capacity of 100 kW and operates with a mean input of 44.2 kW, reflecting a capacity factor of 44.2%. The input power varied between 0 and 100 kW, with seasonal and daily fluctuations being visually represented in the heatmap. This variability is driven by the intermittency of renewable sources, which dictates the availability of surplus energy for hydrogen production.

In terms of hydrogen output, the electrolyzer achieved a mean production rate of 0.672 kg/hr, with the maximum output reaching 1.52 kg/hr during the peak operational period. Over the course of the year, the electrolyzer produces a total of 5,887 kg of hydrogen, with a specific energy consumption of 65.7 kWh/kg. This metric is critical for assessing the efficiency of the electrolyzer because it reflects the energy required to produce each kilogram of hydrogen.

The heatmap below the data table shows consistent operation during periods of high renewable availability, which contributes to effective hydrogen energy storage. This production pattern aligns with the hybrid system’s design to balance the energy supply and demand, thus enhancing the overall system’s flexibility and resilience. The insights in Figure 13 emphasize the electrolyzer’s role in optimizing renewable energy utilization by storing excess energy as hydrogen, which can be reconverted during periods of low renewable generation.

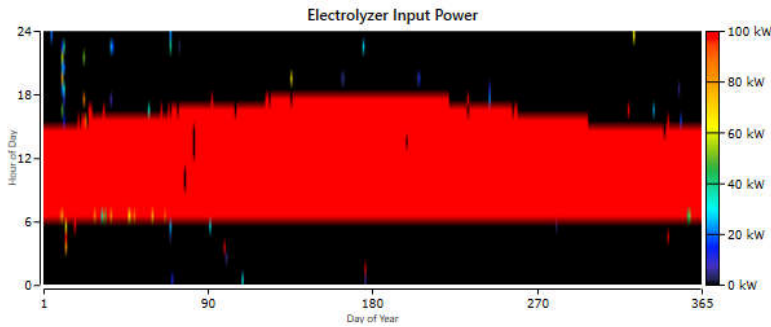


Figure 13. Electrolyzer input power and hydrogen production



Figure 14. Hydrogen storage tank performance and utilization

Figure 14 presents an in-depth analysis of the hydrogen storage tank’s performance throughout the year. The tank, which has a maximum storage capacity of 100 kg, serves as a critical component for buffering excess energy generated by renewable sources. This storage system has an energy storage capacity of 3,333 kWh, enabling a tank autonomy of 19.6 hours, which represents the duration for which the system can maintain the energy supply solely from the stored hydrogen during periods of insufficient renewable energy generation.

The hydrogen content fluctuates significantly over time, as illustrated by the tank-level distribution graph. The beginning-of-year hydrogen content was 50 kg, which decreased to 34.3 kg by year-end, highlighting net consumption due to system demand fluctuations. The daily frequency distribution indicates the tank's utilization range, with most operational levels occurring between 20 kg and 60 kg, as seen in the histogram.

The heatmap and monthly box plot below the main data provide further insights into seasonal variations in tank levels. The heatmap shows daily tank level changes, with a pronounced cycling pattern driven by renewable availability and system load requirements. During peak renewable production, excess energy is

stored in the form of hydrogen, which raises tank levels, while lower production periods experience increased hydrogen consumption.

This utilization pattern ensures that the system maintains flexibility and effectively manages the intermittency of renewable energy sources while minimizing reliance on external energy supplies. Figure 14 underscores the hydrogen tank's role in providing energy resilience and stabilizing the system's energy balance under variable operating conditions.

Table 1. Annual emission quantities by pollutant type

Pollutant	Emissions (kg/year)
Carbon Dioxide	808.0
Carbon Monoxide	85.2
Unburned Hydrocarbons	3.70
Particulate Matter	0.504
Sulfur Dioxide	0.0
Nitrogen Oxides	79.1

The data in Table 1 outline the annual emission quantities of various pollutants, including carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbons (UHC), particulate matter (PM), sulfur dioxide (SO₂), and nitrogen oxides (NO_x). Carbon dioxide exhibits its highest emission at 808 kg per year, reflecting the substantial environmental impact of fossil fuel consumption. Carbon monoxide (85.2 kg/year) and nitrogen oxides (79.1 kg/year) also contribute significantly to total emissions, both recognized for their harmful effects on human health and atmospheric stability. Sulfur dioxide emissions are recorded as zero, demonstrating the use of low-sulfur fuels or effective emission control systems. These results identified priority pollutants for air quality management and emphasized the necessity of focused strategies to mitigate environmental impacts.

Figure 15 illustrates the cumulative nominal cash flow trajectory for both the proposed hybrid system and base case over a 20-year project lifespan. The chart reveals that the hybrid system (indicated by the blue line) consistently outperforms the base case in terms of cumulative savings, with a visibly steeper reduction in costs over time. By leveraging a combination of renewable resources and energy storage, the hybrid system yields a lower NPC of \$40.8 million, compared to the base-case value of \$46.3 million, reflecting significant financial efficiency. Notably, the hybrid system's LCOE is also lower, at \$1.68/kWh, as compared to the base case's \$1.91/kWh. This comparison underscores the hybrid system's economic advantage driven by reduced reliance on fossil fuels and optimized energy management strategies, which contribute to a lower operating cost of \$2.05 M/year versus \$2.40 M/year for the base case.

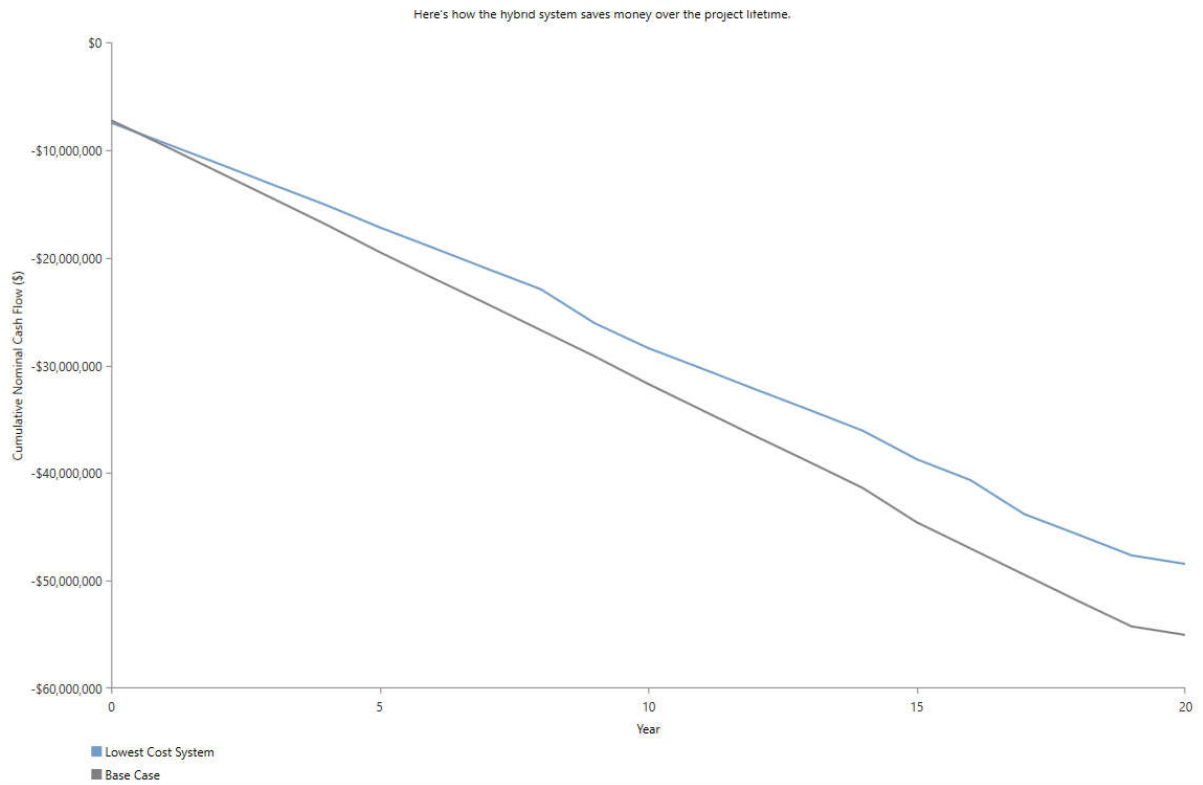


Figure 15. Comparison of the cumulative nominal cash flows of hybrid and base-case systems over the project lifetime

Conclusion and Recommendations

In this study, a hybrid energy system model was developed and evaluated for an off-grid hotel located in a remote area. By integrating renewable resources such as solar PV and wind energy with a gasifier, electrolyzer, and hydrogen storage, the model achieved a reliable and cost-effective solution to meet the energy demands of the facility. The system optimization using HOMER Pro significantly reduced both the operational costs and emissions compared to conventional energy sources. Specifically, the hybrid system achieved an NPC reduction of approximately 12% relative to the base-case scenario and a lower LCOE, reflecting enhanced economic sustainability. Additionally, renewable energy penetration has reached 100%, effectively minimizing carbon emissions and aligning with global objectives for sustainable and clean energy deployment.

The financial and environmental analyses underscore the viability of hybrid systems as sustainable alternatives for remote, off-grid applications. The gasifier and FC components significantly contributed to consistent power supply, with the electrolyzer facilitating effective hydrogen storage, thus enhancing system reliability during periods of low renewable generation. This configuration not only mitigates fuel costs but also reduces the dependence on conventional diesel generators, further lowering the greenhouse gas emissions. The system's design is adaptable to varying load demands, ensuring operational resilience and optimizing energy use throughout the project's 20-year lifespan.

The following recommendations for future work are suggested:

1. **Enhanced System Components:** Further investigation into advanced battery technologies and hydrogen storage solutions can enhance system efficiency and reduce costs. Integrating high-efficiency, long-life batteries may improve load matching, especially during peak demand periods.
2. **Resource Assessment and Site-Specific Modeling:** Because resource availability can significantly affect system performance, conducting comprehensive resource assessments (e.g., solar insolation, wind patterns) tailored to specific locations is recommended. This refines the model's predictive accuracy and improves system sizing.

3. Advanced Control and Management Algorithms: Implementing advanced energy management algorithms and artificial intelligence-driven controllers can enhance real-time operational efficiency. Such algorithms can dynamically adjust component usage based on demand forecasts, resource availability, and real-time system performance metrics.
4. Economic Incentives and Policy Support: To further encourage adoption, exploring financial models that incorporate incentives for renewable energy projects, such as subsidies or tax benefits, could offset initial capital expenditures and accelerate deployment in similar remote locations.
5. Extended Environmental Impact Analysis: Future studies should conduct a more detailed lifecycle analysis to quantify the environmental benefits of hybrid systems over traditional energy sources. This will provide a comprehensive understanding of the system's overall sustainability footprint.

In conclusion, the hybrid energy system evaluated in this study presents a viable solution for sustainable energy generation in remote, off-grid areas. With appropriate optimizations and support mechanisms, such systems could play a critical role in advancing energy access, reducing carbon emissions, and promoting environmental sustainability. The results of this study provide valuable insights into the design and operation of hybrid renewable energy systems, offering a robust framework for future research and practical applications in similar contexts.

References

- Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2022). Hybridized off-grid fuel cell/wind/solar PV/battery for energy generation in a small household: A multi-criteria perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(10), 6437–6452.
- Bahri, R., et al. (2023). Economic-environmental energy supply of mobile base stations in isolated nanogrids with smart plug-in electric vehicles and hydrogen energy storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(10), 3725–3739.
- Gu, Y., et al. (2022). Techno-economic analysis of green methanol plant with optimal design of renewable hydrogen production: A case study in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(8), 5085–5100.
- Güven, A. F. & Mete M. (2021). Balıkesir İli Erdek İlçesi İçin Bağımsız Hibrit Enerji Sisteminin Fizibilite Çalışması Ve Ekonomik Analizi. *KONJES*, c. 9, sy. 4, ss. 1063–1076, 2021, doi: 10.36306/konjes.978002.
- Güven, A. F. & Yörükeren N. (2024). A comparative study on hybrid GA-PSO performance for stand-alone hybrid energy systems optimization. 42:1410–1438. <https://doi.org/10.14744/sigma.2024.00>
- Güven, A. F. & Yücel E. (2024). Sustainable energy integration and optimization in microgrids: enhancing efficiency with electric vehicle charging solutions. *Electr Eng*. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02619-x>
- Güven, A. F. (2017). Bahçelievler Belediye Başkanlık Binasının Enerji İhtiyacının Güneş ve Rüzgar Sistemi ile Karşlanması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 24–36. Retrieved from <http://dergipark.gov.tr/sinopfbd/issue/28364/255023>.
- Güven, A. F. (2024a). Integrating electric vehicles into hybrid microgrids: A stochastic approach to future-ready renewable energy solutions and management. *Energy* 303:131968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131968>
- Güven, A. F. (2024b). Heuristic techniques and evolutionary algorithms in microgrid optimization problems, in: *Microgrid*, CRC Press.
- Güven, A. F., & Hatipoğlu, C. (2022). Şebekeden Bağımsız Güneş/Rüzgâr/Biyogaz/Yakıt Hücreleri/Batarya Tabanlı Hibrit Enerji Sisteminin Tekno-Ekonomik Analizi: Muğla Zaferler Köyü Vaka Çalışması. *EMO Bilimsel Dergi*, 12(1), 53-65.
- Güven, A. F., & Mengi, O. Ö. (2023). Assessing metaheuristic algorithms in determining dimensions of hybrid energy systems for isolated rural environments: Exploring renewable energy systems with hydrogen storage features. *Journal of Cleaner Production*, 428(September). doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139339

- Güven, A. F., & Poyraz, E. (2021). Feasibility Study and Techno-Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Muğla Province Köyceğiz. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 70–85. doi: 10.31466/kfbd.880437.
- Güven, A. F., & Yörükeren, N. (2022). Bir Hibrit Enerji Sisteminin Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması- Genetik Algoritma ve Gri Kurt Optimizasyon Algoritma Tekniği ile Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu: Yalova Üniversitesi için bir vaka çalışması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 853–879. doi: 10.31466/kfbd.1169643
- Güven, A. F., & Yücel, E. (2023). Application of HOMER in assessing and controlling renewable energy-based hybrid EV charging stations across major Turkish cities. *International Journal of Energy Studies*, 8(4), 747–780. doi: 10.58559/ijes.1324236.
- Güven, A. F., Türkmen, Ş., Aşıklı, E., & Örnek, G. (2023). Investigating the Effects of Different Types of Battery Impacts in Energy Storage Systems on Standalone Hybrid Renewable Energy Systems. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 943–964. doi: 10.31466/kfbd.1275823.
- Li, J., et al. (2023). Optimal sizing for a wind-photovoltaic-hydrogen hybrid system considering leveled cost of storage and source-load interaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(11), 4129–4142.
- Nasrabadi, A. M., & Korpeh, M. (2023). Techno-economic analysis and optimization of a proposed solar-wind-driven multigeneration system; case study of Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(36), 13343–13361.
- Samy, M. M., Mosaad, M. I., & Barakat, S. (2021). Optimal economic study of hybrid PV-wind-fuel cell system integrated to unreliable electric utility using hybrid search optimization technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(20), 11217–11231.
- Sultan, H. M., et al. (2021). An improved artificial ecosystem optimization algorithm for optimal configuration of a hybrid PV/WT/FC energy system. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1001–1025.
- Wang, J., et al. (2023). Risk-averse based optimal operational strategy of grid-connected photovoltaic/wind/battery/diesel hybrid energy system in the electricity/hydrogen markets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4631–4648.



ENERGY EFFICIENCY AND EMISSION IMPACTS OF HYBRID ENERGY SYSTEMS FOR PUBLIC BUILDINGS: ANALYZING THE ROLE OF BOILERS, NATURAL GAS, AND GASOLINE GENERATORS

Aykut Fatih GÜVEN¹

¹Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Yalova-Türkiye
¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1071-9700>

Necat UZUNER²

²Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye
²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0815-2580>

Yusuf KAYA³

³Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye
³ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1949-7501>

Sümeyra İBİŞ⁴

⁴Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye
⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3268-5863>

Abstract

The growing global energy demand and the need for a transition to sustainable energy, combined with the environmental impacts and limited resources of traditional fossil fuels, have significantly increased interest in renewable energy sources. In this context, hybrid energy systems offer environmentally and economically efficient solutions. This study aims to simulate and optimize on-grid and off-grid hybrid energy systems using HOMER software to meet the energy consumption of a public building in 2024. By analyzing energy production and storage components such as photovoltaic panels, wind turbines, hydrogen tanks, batteries, thermal boilers, and generators under three different scenarios, the most efficient and cost-effective system designs were identified. In the grid-connected system, Scenario 1 was determined as the optimal solution with a net present cost (NPC) of \$10.8 million and a levelized cost of energy (LCOE) of \$0.0764/kWh, generating 51.2% of the energy from renewable sources. For those prioritizing energy independence, Off-grid Scenario 1 emerged as a viable alternative with a NPC of \$25.3 million and an LCOE of \$0.304/kWh. In off-grid scenarios, the use of fossil fuel generators, such as natural gas, reduces renewable energy integration while improving energy security.

This study emphasizes the necessity of conducting comprehensive feasibility assessments when implementing hybrid energy systems and ensuring that system configurations are optimized based on regional energy potential and load demands. Furthermore, integrating additional components, such as electric vehicle charging stations and thermal loads, enhances both system efficiency and flexibility. The findings demonstrate that utilizing renewable energy sources not only increases economic efficiency but also significantly reduces carbon emissions, thus contributing to environmental sustainability.

Keywords: Electrical vehicle charging stations, Hybrid energy systems, Energy efficiency, Cost optimization, Carbon emissions.

Introduction

In the 21st century, the energy sector is undergoing a profound transformation, with sustainability at the forefront of global efforts to mitigate the adverse effects of climate change. The finite nature of fossil fuel reserves, combined with their significant environmental impacts, has intensified the global shift toward renewable energy solutions (Al-Sahlawi et al., 2024). The rising global energy demand, coupled with the urgent need to reduce carbon emissions, underscores the critical importance of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) in addressing these challenges. HRES, which integrate multiple renewable energy sources

and advanced storage technologies, offer a reliable and resilient energy supply, overcoming the intermittent nature of solar and wind power (Belkhier et al., 2024).

Hybrid systems enhance energy efficiency by combining diverse renewable sources, such as solar photovoltaics, wind, and biomass, thereby reducing reliance on a single energy source and mitigating fluctuations in power generation (Güven & Yücel, 2024). Additionally, the integration of energy storage technologies, such as batteries and hydrogen storage systems, further strengthens the stability and reliability of these systems. As a result, HRES are increasingly being regarded as a key solution for improving energy security while minimizing environmental impacts and operational costs.

The design and optimization of HRES is a multifaceted challenge that requires advanced computational tools to simulate and optimize system configurations. One of the most widely used tools in this context is HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), which enables the simulation of complex energy systems by incorporating various renewable energy sources, storage technologies, and system constraints (Güven & Yörükeren, 2024). Numerous studies have demonstrated that optimizing hybrid energy systems using HOMER Pro can significantly reduce operational costs while enhancing overall system performance (Güven & Yörükeren, 2022).

This study aims to design and optimize HRESs for public buildings with the goal of enhancing energy security and promoting sustainable practices. By using HOMER Pro to simulate scenarios that incorporate photovoltaic panels (PVPs), wind turbines (WTs), hydrogen storage systems, electrolyzers, and batteries, this study aims to identify the most cost effective and efficient configurations for public infrastructure. The primary focus is to optimize energy efficiency and economic feasibility while ensuring that public facilities benefit from stable and sustainable energy sources.

Previous research has demonstrated the notable economic and environmental benefits of hybrid energy systems for public infrastructure. For instance, the impacts of different types of battery impacts on energy storage systems in standalone hybrid renewable energy systems have significantly improved energy reliability and cost efficiency (Güven et al., 2023). Similarly, an optimization and cost analysis of meeting the energy needs of Bahçelievler municipal office using solar and wind systems revealed substantial reductions in operational costs while promoting renewable energy integration (Güven, 2017). These findings underscore the potential of hybrid renewable energy systems to support both economic and environmental sustainability in public infrastructure.

This study expands on the existing literature by assessing the techno-economic viability of hybrid energy systems for public buildings under various scenarios. The results are expected to provide actionable insights into the design and implementation of sustainable energy solutions for public infrastructure, contributing to the broader goals of energy security and environmental stewardship.

Materials and Methods

Selected Location

This study will be conducted at a new public building located 5.5 km from the center of Yalova, a city in Turkey's Marmara Region (40° 63' 28" N, 29° 26' 62" E). The building, situated on a 200-acre plot of land, features a total indoor area of 105,000 square meters and includes a parking lot with a capacity for 800 vehicles.

Solar Energy Potential

The energy produced by PVPs is directly related to the meteorological data of the region. In this study, the solar energy data for the study area were obtained from the Yalova Meteorological General Directorate database. As shown in Figure 1, the solar energy potential of the region peaks in summer and decreases significantly in winter. The annual average daily solar energy potential was determined as 4205.01 kWh/m²/day. These data are crucial for accurately calculating the efficiency and energy production capacity of PVPs (Güven & Yücel, 2023).

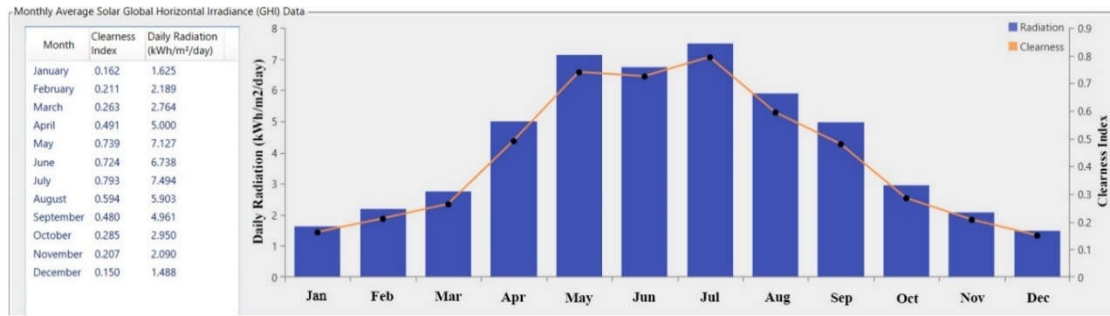


Figure 1. Monthly average solar radiation (kWh/m²/day) profile data for the region

Wind Speed

Due to the high investment costs of WTs, the wind speed profile of the region must be considered. The wind speed profile for this study was obtained from the Yalova Meteorological General Directorate, with an average wind speed of 1.99 m/s. Wind energy is considered a complementary source, especially during winter when solar energy is insufficient. Solar and wind energy are the most common sources of energy in hybrid energy systems. Figure 2 shows the region's detailed wind speed profile, which is vital for evaluating the efficiency and potential energy production of WTs (Güven & Poyraz, 2021).

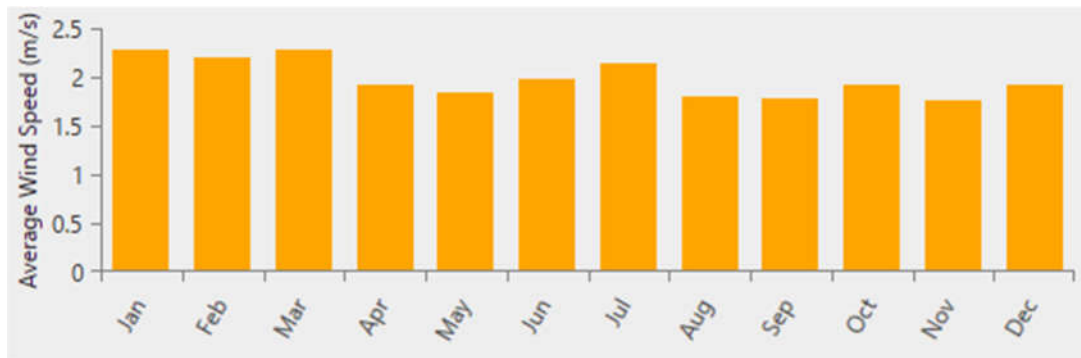


Figure 2. Monthly average wind speed (m/s) profiles of the region

Temperature

The daily temperature values shown in Figure 3 reflect the changes in the climate throughout the year. The data show significant seasonal variations, with temperatures averaging around 5°C in January and rising gradually through summer to peak above 25°C in July and August. The temperature then declines in autumn, dropping to around 10°C in December. These temperature data provide valuable information for evaluating energy system performance and managing energy demand, as the effectiveness of solar and wind energy systems can vary throughout the year due to temperature changes (Güven & Hatipoğlu, 2022).



Figure 3. Annual average temperature data

Electricity Load Profile

The consumption values of the public buildings were obtained from a comprehensive analysis conducted by a research team at the end of 2023. This report examines public buildings' energy consumption patterns, water usage, and other critical resources. It also provided recommendations for improving the building's operational efficiency and achieving sustainability goals. The report highlights potential energy-saving and cost-reduction opportunities during a building's daily operations. The daily load profile exhibited a peak of 974.26 kW at 10:00-AM and a minimum of 421.39 kW at 12:00-AM.

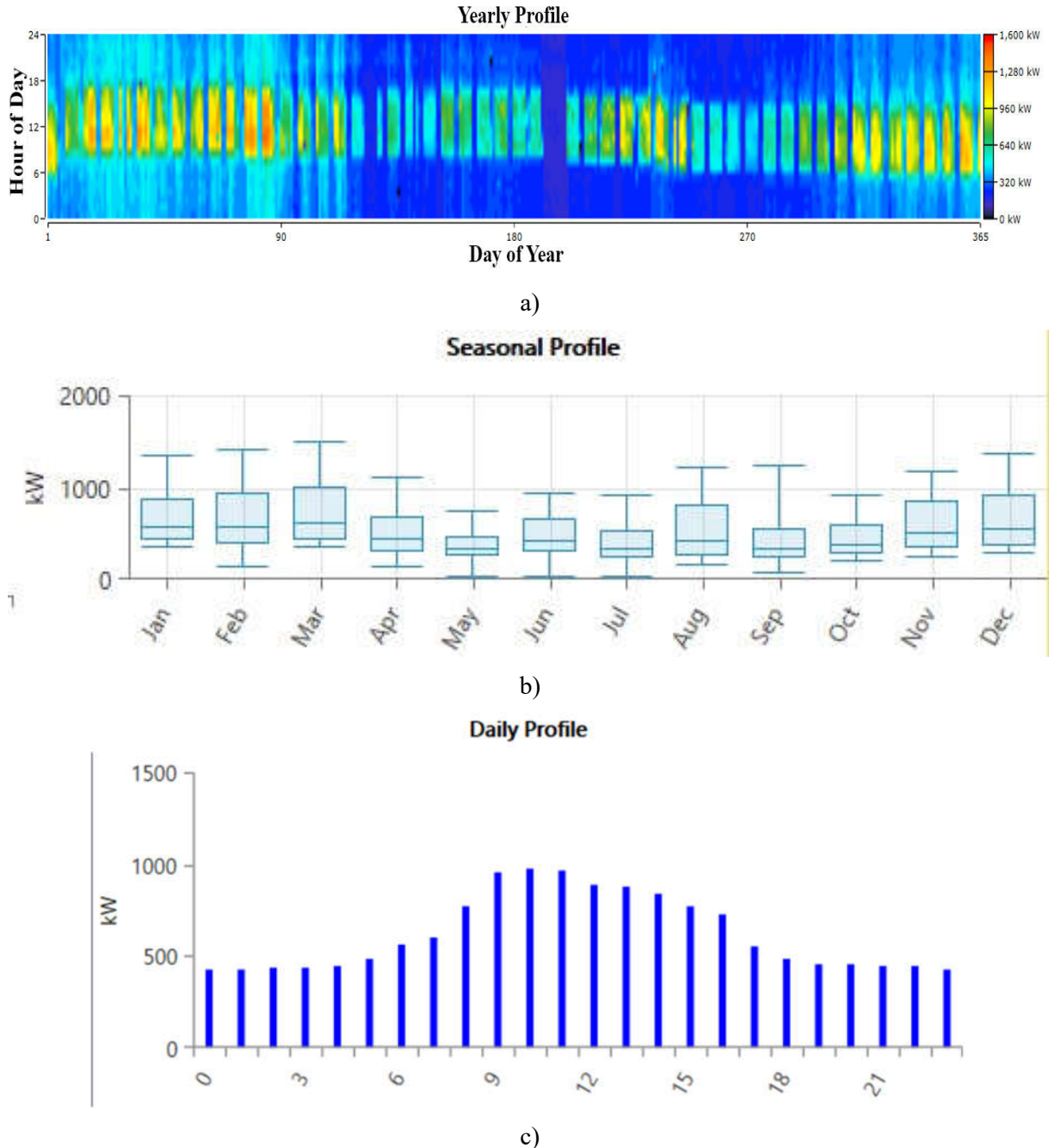


Figure 4. Electricity load profiles (a) annually, (b) seasonal, and (c) daily

Thermal Load Profile

The thermal load profile of the public building in Yalova was examined in detail. The hourly load data for January vary from 429.01 to 659.99 kW. The average daily thermal load consumption was calculated as

6,858.8 kWh/day, with an hourly average of 285.79 kW. These data highlight the thermal load required to meet the building's energy needs. The highest thermal load recorded was 889.89 kW, mainly during winter. The seasonal profiles exhibit fluctuations in thermal load consumption throughout the year, with higher loads in winter and lower loads in summer.

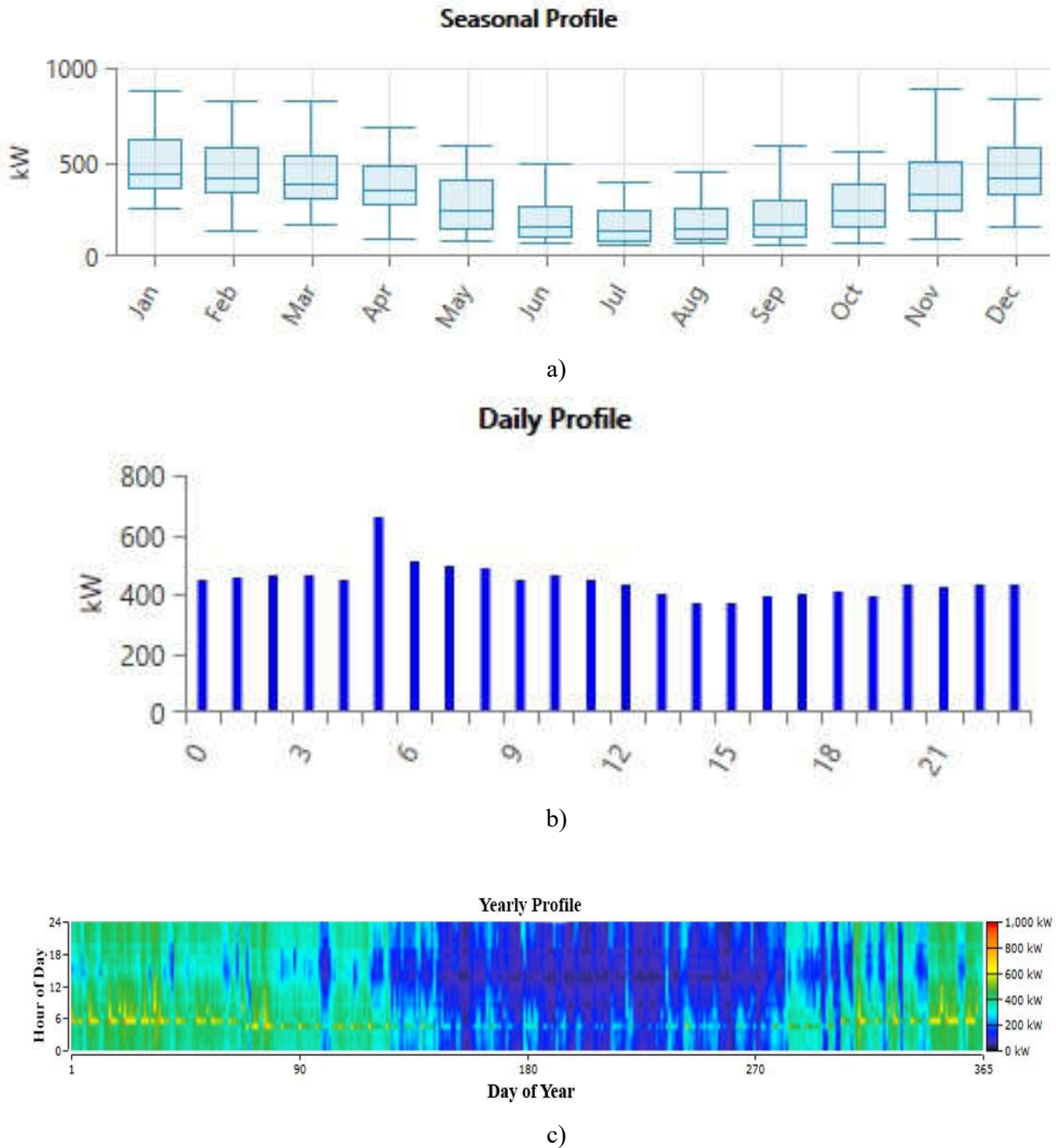


Figure 5. Thermal load profiles: a) seasonal, b) daily, and c) annual

Hydrogen Load Profile

In the hydrogen load model, daily and seasonal profiles were analyzed to determine hydrogen consumption patterns. According to the January profile, the hourly hydrogen load varied between 0.095 and 0.550 kg/h. The average daily hydrogen consumption was 11.26 kg/day, with an hourly average of 0.47 kg/h. These values serve as the baseline for evaluating the overall system performance. The highest hydrogen load was 2.09 kg/h, which typically occurs during specific times of the day. The annual profile shows that hydrogen consumption is stable throughout the year, with a load factor of 0.22.

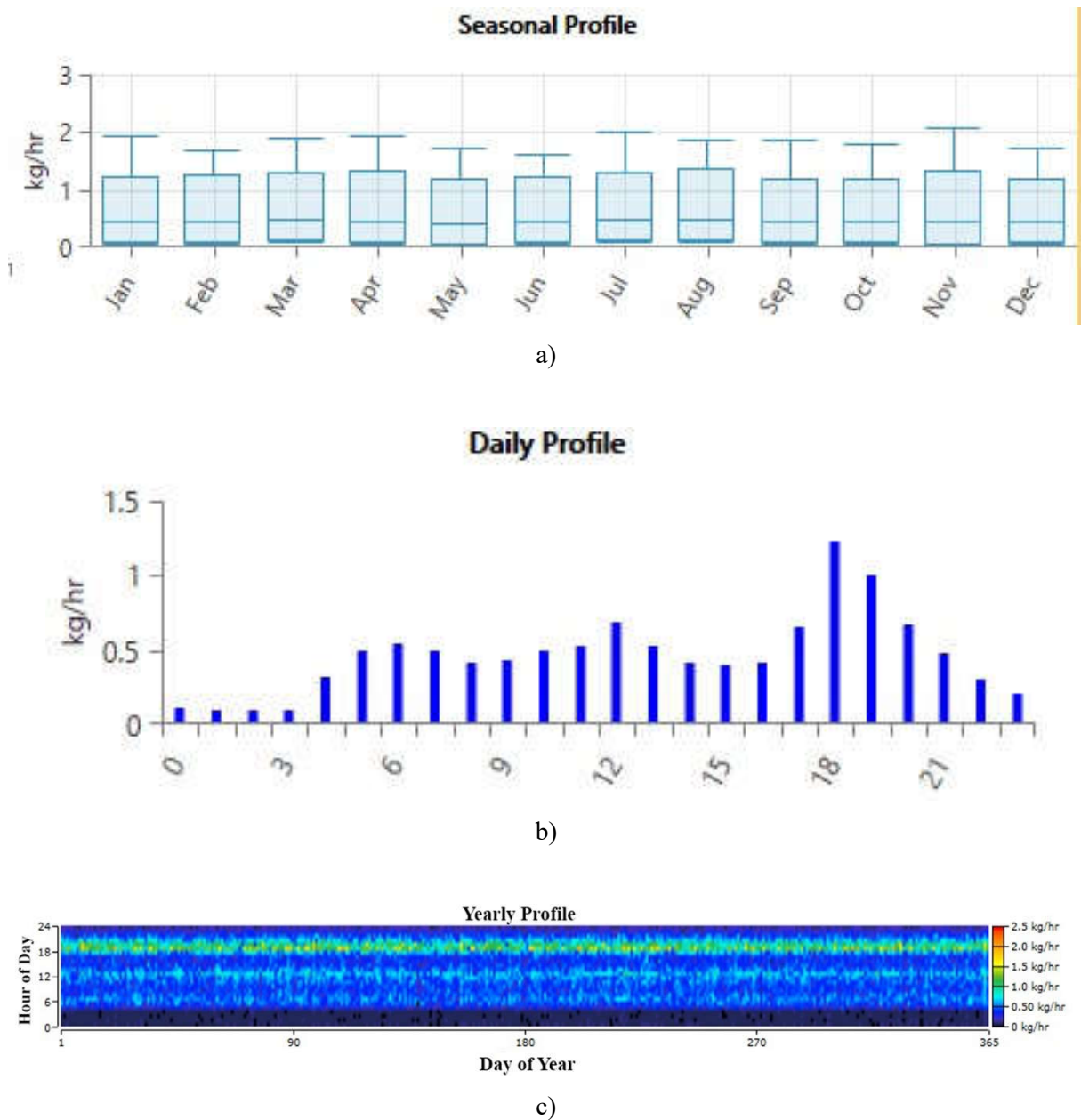


Figure 6. Hydrogen load profiles: a) seasonal, b) daily, and c) annual

Electric Vehicle Charging Station Load Profile

According to the load profile of the EV charging station, the base scenario assumes an average load of 300 kWh/day. Throughout the year, from January to December, the daily average load remains constant at 300 kWh/day, indicating that the station's energy consumption is stable and consistent year-round. The annual average load was calculated as 300 kWh/day. The storage capacity of the charging station was set at 600 kWh, and the maximum load was recorded as 600 kW. The minimum load rate was 20%, indicating that the station maintained a certain level of load during periods of low demand (Güven, 2024a).



Figure 7. Annual average eV charger load data

Hybrid Renewable Energy System Modelling

Figure 8 illustrates the general system configuration of the considered scenarios. In this microgrid structure, key components are connected through both AC and DC busses to ensure flexibility and reliability in energy management (Chowdhury et al., 2023). The gasoline generator, wind turbine, and grid are integrated into the AC bus, which supplies power to the electric load, including the EV charger. The PVPs and battery are connected to the DC bus, which also supplies the electrolyzer that produces hydrogen stored in the hydrogen tank. The hydrogen load is fed directly from the tank, ensuring a continuous supply of hydrogen as needed.

The electric load is primarily connected to the AC bus, while the EV charger has the capability to draw power from both AC and DC busses, enhancing operational flexibility. Additionally, the boiler, which is connected to the AC bus, provides thermal energy. In alternative scenarios, the gasoline generator and boiler can be replaced with diesel or natural gas generators, depending on fuel availability and environmental considerations.

This hybrid system, incorporating both renewable sources like wind and solar power along with energy storage technologies, ensures stability in power supply by addressing the intermittency of renewable energy sources (Diaf et al., 2008). The integration of an electrolyzer and hydrogen storage further enhances the system's capability by storing excess renewable energy in the form of hydrogen, which can later be converted back into electricity or used directly as fuel. The microgrid configuration is designed to optimize energy distribution while minimizing dependency on external grid power, thus improving energy security and sustainability.

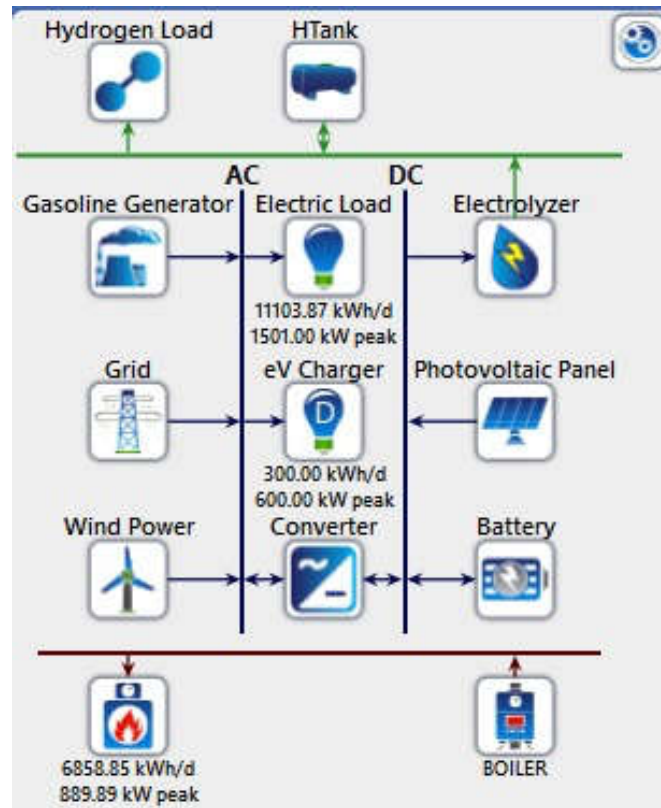


Figure 8. General scenario system configuration

Photovoltaic Panel

In the designed hybrid energy system models, SunPower E20-327 PVPs were selected for their high efficiency and reliability. These PVPs exhibit an efficiency of approximately 20.4% and an expected operational lifespan of approximately 25 years. Each panel has a nominal capacity of 0.327 kW, making it suitable for high-performance applications in renewable energy systems. The initial capital cost of the PV system was estimated to be \$1,300 per kilowatt, with the same amount set aside for replacement costs. Additionally, the annual operation and maintenance (O&M) costs are projected to be \$20 per kilowatt. The degradation factor of the PV array was approximately 88%, and the ground reflectance was set to 20%, indicating that the panels operated without a tracking system. Capacity adjustments for the PV array were optimized using HOMER.

The power generation from the PVPs can be calculated using the following equation:

$$P_{PV} = Y_{PV} \times f_{PV} \times \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \times [1 + \alpha_f \times (T_C - T_{C,STC})] \quad (1)$$

In Eq. (1), P_{PV} (kW) represents the output power of the PV array during the specified time interval. Y_{PV} (kW) is the rated output power of the PV panel under the Standard Test Conditions (STC), while f_{PV} (%) denotes the degradation factor of the PV system. G_T (kW/m²) refers to the solar irradiance incident on the PV array during the specified time interval, and $G_{T,STC}$ (1 kW/m²) represents the solar irradiance under the STC (which assumes an ambient temperature of 25°C). The term α_f (%/°C) is the temperature coefficient of the PV panel, reflecting how the panel's performance changes with temperature. T_C (°C) is the PV panel temperature during the time interval, while $T_{C,STC}$ (°C) represents the PV panel temperature under STC conditions (typically 25°C).

If the temperature effect on the PV panel (α_f) is not considered in HOMER software, the simplified calculation for the PV power output can be represented by equation (2):

$$P_{PV} = Y_{PV} \times f_{PV} \times \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \quad (2)$$

This simplified equation disregards the impact of temperature on the PV system, assuming ideal conditions modeled by the HOMER tool. However, in real-world scenarios, the influence of temperature can significantly affect the efficiency and output of PVPs, particularly in regions with extreme climatic conditions (Güven & Mete, 2021).

Wind Turbine

In the proposed models, the wind turbine is designed with specialized blades to capture the kinetic energy generated by the wind. As the wind passes over the blades at a suitable height, a lift force is generated, which causes the blades to rotate. These blades are connected to a drive shaft, which in turn rotates a generator to produce electricity.

The EOCYCLE E020 wind turbine was selected for the model owing to its optimal performance under various wind conditions. This turbine has a cut-in and cut-out wind speeds of approximately 2.75 and 20 m/s. The rotor diameter was 15.81 m, providing a significant swept area for energy capture. The capital cost of the wind turbine is estimated to be \$50,000 per kilowatt, with a replacement cost of \$35,000. The annual operation and maintenance (O&M) costs are projected to be \$50. The power capacity of the turbine is approximately 20 kW, and it has a total operational lifespan of about 25 years. The turbine can be installed on hydraulic towers with hub heights of 16 or 23 m, or on non-hydraulic towers with hub heights of 30 or 36 m, depending on the site-specific requirements.

HOMER Pro software was used to calculate the wind turbine power output in three stages. First, the wind speed at the hub height is calculated using the equation below. Based on the calculated wind speed under the Standard Test Conditions (STC), the expected power output from the wind turbine was estimated using the power curve shown in Figure 9. Finally, HOMER Pro adjusts the predicted power output by factoring in the air density ratio, as shown in equation (4), to calculate the actual power output facilitated by the wind turbine under real-world conditions.

$$U_{hub} = U_{anem} \times \frac{\ln\left(\frac{Z_{hub}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{anem}}{Z_0}\right)} \quad (3)$$

In Eq. (3), U_{hub} (m/s) represents the wind speed at the wind turbine hub height, while U_{anem} (m/s) refers to the wind speed at the anemometer height. Z_{hub} (m) is the hub height of the wind turbine, and Z_{anem} (m) is the height of the anemometer. Z_0 (m) is the surface roughness length, which reflects the terrain characteristics.

The wind turbine power output is then calculated as Eq.(4):

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \times P_{WTG.STC} \quad (4)$$

In Eq. (4), P_{WTG} represents the actual power output of the wind turbine, adjusted for air density, where ρ is the actual air density at the site, and ρ_0 is the air density under standard conditions. $P_{WTG.STC}$ is the power output of the wind turbine under standard conditions (STC). This adjustment ensures that the calculated power output aligns with the real operating conditions, as the air density can vary significantly depending on temperature, altitude, and weather conditions (Güven & Mengi, 2023).

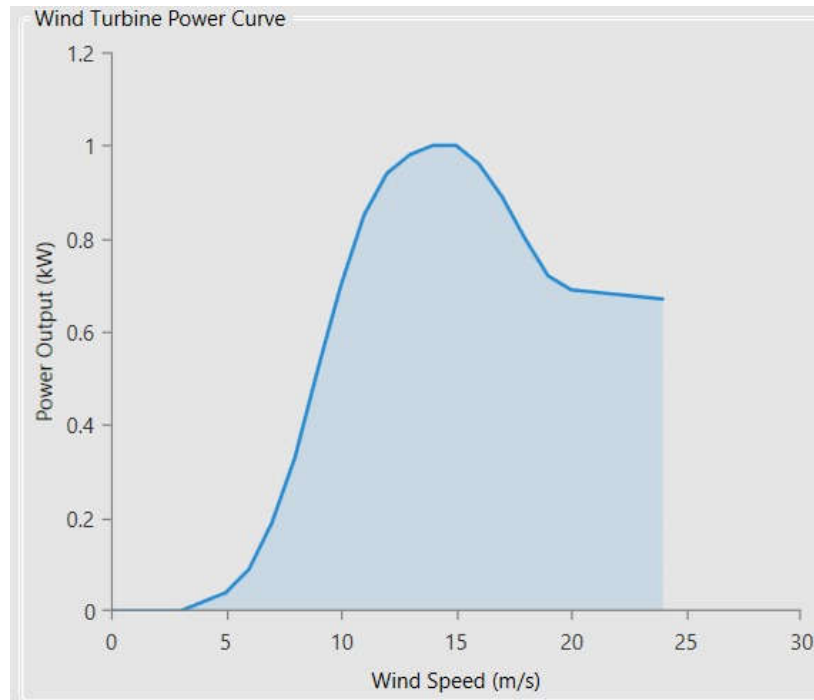


Figure 9. Wind power curve

System Generator

For the design and simulation of the project, an Autosize Genset generator was utilized, which was optimized according to the system requirements using HOMER Pro software. The generator operates with a minimum load ratio of 25%, and its expected lifespan is approximately 15,000 hours. The capital, replacement, and operational costs are estimated at \$500, \$500, and \$0.030 per hour, respectively. The generator is modeled under six different scenarios, employing three distinct fuel types: diesel, natural gas, and gasoline. The fuel consumption rate was calculated based on the generator's power output using equation (5):

$$F(t) = (F_0 \times Y_{gen}) + (F_1 \times P_{gen}) \quad (5)$$

In Eq. (5), $F(t)$ represents the fuel consumption rate of the generator, F_0 (L/h/kW) is the intercept of the fuel consumption curve, F_1 (L/h/kW) is the slope of the fuel consumption curve, Y_{gen} (kW) is the nominal power of the generator under the Standard Test Conditions (STC), and P_{gen} (kW) represents the actual output power of the generator during the time interval (Güven, 2024b).

The overall efficiency of the generator can be calculated using the following equation:

$$\eta_G = \left(\frac{3.6 \times X_G \times P_{gen}}{m_f \times LHV_f} \right) \quad (6)$$

This efficiency equation (6) defines the ratio of the generator's electrical output to its fuel input, where X_G is the energy conversion factor, m_f is the mass flow rate of the fuel, and LHV_f is the lower heating value of the fuel (Hasanien et al., 2024).

Diesel Generator

Diesel generators operate by compressing and igniting diesel fuel, which drives the engine pistons to produce mechanical energy that is then converted into electricity by the generator. For the generator used in this project, three fuel prices were considered for the sensitivity analysis: \$1.34, \$1.50, and \$1.75 per liter. These variable prices are key factors in evaluating the operational costs of generators and were analyzed in the sensitivity analysis section.

Natural Gas Generator

Natural gas generators work by compressing and igniting natural gas in the combustion chamber, which produces the mechanical energy needed to generate electricity. For the natural gas generator used in this project, three fuel prices were considered: \$0.143, \$0.17, and \$0.20 per cubic meter. These prices directly affect the operational costs of generators and are critical to the economic analysis of the system.

Gasoline Generator

Gasoline generators operate by igniting gasoline fuel through a spark plug, where the fuel is compressed in the engine's cylinders and ignited by the spark plug to generate mechanical energy. For the gasoline generator used in this project, three fuel prices were considered: \$1.38, \$1.45, and \$1.65 per liter. As with other fuel types, these variable prices affect the overall operating costs and were considered in the sensitivity analysis.

Battery Storage System

The battery used in the proposed model is a kinetic battery with a nominal voltage of 6 V and a nominal capacity of 6.91 kWh. The maximum capacity is 1150 Ah, and the capacity ratio is 0.237. The round-trip efficiency of the battery was approximately 80%, with maximum charge and discharge currents of 279 amperes. The specific model used in this project is a 6 CS 25P battery with a capacity of 820 Ah and an operational lifespan of 12 to 20 years. The capital cost of the battery was \$1,100, with a replacement cost of \$1,000 and annual O&M cost of \$20. The battery is expected to be last 15 years and provide a total energy throughput of approximately 6,879.60 kWh over its lifetime. The initial state of charge is set to 100%, and the minimum allowable state of charge is 40%.

The number of batteries required for the system was calculated using the following Eq. (7):

$$N_{bat} = \frac{E_d \times n_d}{V_{bat} \times Ah \times DD} \quad (7)$$

In Eq. (7), E_d (kWh) represents the daily energy demand, n_d refers to the number of autonomous days, V_{bat} (V) is the battery voltage, Ah is the battery capacity, and DD (%) is the depth of discharge. This calculation helps determine the appropriate battery size to meet the energy storage needs of the system based on the energy demand and operational conditions (Jui et al., 2024).

Electrolyzer

The "Generic Electrolyzer" model is used in the design of this system. In the electrolyzer, water is split into hydrogen and oxygen molecules via electrolysis. The hydrogen produced during this process is used to generate electricity. The capital and replacement costs for a 1-kW electrolyzer are estimated to be \$150, with an operational cost of \$8 per kilowatt. The lifespan of the electrolyzer was set at 15 years, and its efficiency was simulated under two different sensitivity levels: 85% and 67.5%. The chemical reactions occurring in the electrolyzer are presented below:

Overall chemical reaction:



Reaction at the anode:



Reaction at the cathode:



Numerical modeling of the electrolyzer is an effective technique for evaluating cell performance and the complex physicochemical processes involved, including the electrochemical reactions and mass transport at the cathode and anode. The model also incorporates the thermodynamics of the system and losses in the electrical circuits. The reversible cell voltage under the standard temperature and pressure (STP) conditions,

U_{revs}^{STP} , is determined by the thermodynamics of the water-splitting reaction at STP and can be calculated as follows:

$$U_{revs}^{STP} = \frac{-\Delta G^{STP}}{nF} = U_{revs}^{STP0} + \frac{RT}{nF} \times \ln \left[(p - \rho_w)^{1.5} \times \frac{\rho_w^*}{\rho_w} \right] \quad (11)$$

Here, ΔG^{STP} is the Gibbs free energy, F is the Faraday constant, and n is the number of electrons involved in the electrode reaction. ρ_w is the partial pressure of pure water, while ρ_w^* is the partial pressure of the gaseous electrolyte. The RRR is the universal gas constant (8.315 J/mol·K), and T is the temperature in Kelvin. U_{revs}^{STP} represents the reversible cell voltage under given STP conditions and can be determined as:

$$U_{revs}^{STP0} = 1.50342 - 9.956 \times 10^{-4} \times T + 2.5 \times 10^{-7} \times T^2 \quad (12)$$

The values of ρ_w and ρ_w^* can be calculated as follows:

$$\rho_w = \exp \left(37,93 - \frac{6426,32}{T} \right) \times \exp \left(0,016214 - 0,13802 + (0,19330 \times \sqrt{M}) \right) \times T^{-3,498} \quad (13)$$

$$\rho_w^* = \exp \left(377,93 - \frac{6426,32}{T} \right) T^{-3,498} \quad (14)$$

The Butler-Volmer equation is used to determine the cell current density (j_{cell}) and is given as

$$j_{cell} = j_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha}{RT} \times n \times F \times U_{act} \right) - \exp \left(\frac{(1-\alpha)}{RT} \times n \times F \times U_{act} \right) \right] \quad (15)$$

In this equation, j_0 represents the exchange current density at equilibrium, and α is the charge transfer coefficient, which quantifies the proportion of the energy barrier between the electrodes. The activation overpotential U_{act} is the sum of the anode and cathode overpotential voltages, which is calculated using the Tafel equation (16):

$$U_{act} = U_{act}^a + U_{act}^c = 2,3026 \times \frac{RT}{n \times F \times \alpha_a} \times \log \left(\frac{j}{j_0 - a} \right) + 2,3026 \times \frac{RT}{n \times F \times \alpha_c} \times \log \left(\frac{j}{j_0 - c} \right) \quad (16)$$

The exchange current density of the cell depends on the roughness and geometry of the electrode material. The charge transfer coefficients α_c and α_a typically range between 0.2 and 0.8, although experimental models reported in the literature suggest that the values of α_c and α_a are generally between 0.67 and 0.70.

Hydrogen Tank

The hydrogen tank is used for storing hydrogen, which is later used to power fuel cells. The capital cost of the hydrogen tank was estimated to be \$1.5 per kilogram of storage capacity, with a similar replacement cost of \$1.5 per kilogram. The annual operation and maintenance (O&M) cost is projected to be \$8. The tank's storage capacity ranges from 1 to 300 kg, allowing flexibility in the system design depending on the energy requirements. The lifespan of the hydrogen tank was carefully selected to be 25 years to ensure long-term durability and reliability (Nandi et al., 2024).

Boiler

A Generic Boiler model has been implemented in the project, operating with 85% efficiency and fueled by natural gas. The lower heating value (LHV) of natural gas was 45 MJ/kg, and its density was 0.790 kg/m³. When fueled with natural gas, the boiler produces relatively low emissions of carbon monoxide, unburned hydrocarbons, particulate matter, sulfur, and nitrogen oxides. The boiler was simulated under various scenarios using natural gas, gasoline, and diesel as fuel sources, each with distinct emission and cost profiles.

Sensitivity analysis was performed using varying fuel prices: gasoline prices were set at \$1.38/L, \$1.45/L, and \$1.65/L; natural gas prices were set at \$0.143/m³, \$0.17/m³, and \$0.20/m³; and diesel prices were set at \$1.34/L, \$1.50/L, and \$1.75/L. The impact of each fuel on the operational cost and boiler performance was evaluated. Fossil fuels such as gasoline and diesel produced higher emissions because of their higher carbon content than

natural gas. These analyses are critical for understanding the boiler efficiency and environmental impact of using different fuel types.

The influence of fuel prices on the boiler's operational costs was also considered, enabling the identification of the most cost-effective and environmentally friendly option. By performing these calculations, it is ensured that both the electric and gas boilers efficiently meet the required thermal demand. The equation below outlines the energy balance of the boiler system:

$$E_{Boiler}(t) = E_{thermal}(t) - [E_{BES} + E_{REH}(t) + (E_{TES}(t-1) \times (1 - \varphi) - E_{TES,min}] \quad (17)$$

This equation (17) represents the energy required by the boiler at time t , where $E_{thermal}(t)$ is the thermal energy demand at time t , E_{BES} is the energy storage from the battery, $E_{REH}(t)$ is the energy recovery at time t , $E_{TES}(t-1)$ is the thermal energy stored at the previous time step, and φ is the thermal storage efficiency. $E_{TES,min}$ represents the minimum energy required for thermal energy storage.

Grid System

In the HOMER Pro simulation of a grid-connected system, electricity pricing and sale rates vary depending on the time of day. The T3 peak electricity pricing structure in Turkey has been integrated into this system. Rate 1, which operates from 06:00 to 17:00, has a cost of \$0.1600/kWh and a sale price of \$0.1000/kWh. Rate 2, which operates from 17:00 to 22:00, has a cost of \$0.1800/kWh and sale price of \$0.1000/kWh. Rate 3, which operates from 22:00 to 06:00, has a cost of \$0.1200/kWh and sale price of \$0.1000/kWh. This pricing structure significantly affects the distribution of energy consumption throughout the day and plays a crucial role in cost optimization. Specifically, the T3 peak pricing implies that electricity use during peak hours incurs higher costs, whereas nighttime energy usage benefits from lower costs. This structure is critical for shaping energy management strategies and optimizing costs.

Converter

A Generic System Converter is utilized in the model, which is integrated into HOMER Pro software. This converter operates in both the inverter and rectifier modes. In situations where solar and wind resources are unavailable, the converter functions in inverter mode, which is typically occurring during nighttime or cloudy conditions. However, when sufficient renewable energy is available, the converter operates in rectifier mode to charge the battery storage system. The efficiency of the converter is approximately 95%. The cost of a 1 kW converter is approximately \$300, with a replacement cost of \$300 and a lifespan of 15 years.

The inverter capacity within the system can be calculated using the following Eq. (18).

$$P_{inv} = \frac{E_{L,max}}{\eta_{DC/AC}} \quad (18)$$

In Eq. (18), P_{inv} (W) represents the power capacity of the converter, $E_{L,max}$ (Wh) denotes the maximum energy demand required by the load, and $\eta_{DC/AC}$ represents the conversion efficiency (Falope et al., 2024).

Economic Model

Economic models play a pivotal role in making investment decisions, determining operational strategies, and assessing the integration of renewable energy sources. Key economic indicators, such as the annual total cost-saving ratio, NPC, and levelized cost of electricity (LCOE), are commonly used to evaluate the cost-effectiveness of different energy systems and projects. These economic models are critical for the design and implementation of sustainable and efficient energy systems.

Net Present Cost

The NPC of a hybrid system represents the total cost of the system over its defined lifetime, accounting for all associated costs, such as initial capital, replacement, and operation and maintenance (O&M), while subtracting

the salvage value at the end of the system's useful life. HOMER Pro software calculates the NPC of each component in the system using the following Eq. (19).

$$NPC = \sum(C_{capital} + C_{replace} + C_{maint} + C_{salvage}) \quad (19)$$

Levelized Cost of Energy (LCOE)

The LCOE is the average cost per kilowatt-hour of electricity produced by a system over its operational lifetime. To calculate LCOE, HOMER Pro divides the total annual cost by the sum of $L_{primeAC}$ and $L_{primeDC}$, as shown in the following Eq. (20) (Okafor et al., 2024).

$$LCOE = \frac{\text{Total Annual Cost}}{L_{primeAC} + L_{primeDC}} \quad (20)$$

Total Annual Cost

The total annual cost represents the yearly value associated with the project over its estimated lifespan, which corresponds to the NPC calculated through HOMER Pro. This value is then multiplied by the capital recovery factor to obtain the final total annual cost.

Annual Total Cost Saving Ratio

The annual total cost-saving ratio is used to assess the cost-effectiveness of a system or process. This ratio reflects the cost savings achieved by implementing a project or system modification. Typically expressed as a percentage, this is calculated by comparing the initial and replacement/maintenance costs:

$$YTMTO (\%) = \frac{(\text{Initial Cost} - \text{Replacement Cost})}{\text{Initial Cost}} \times 100 \quad (21)$$

Salvage Value

HOMER Pro calculates the salvage value of specific components using the following formula. The salvage value represents the remaining value of the power system component at the end of the project lifecycle. HOMER assumes linear depreciation for a component, meaning that the salvage value is proportional to the remaining lifespan of the component. HOMER specifies that the salvage value is based on the replacement cost rather than the initial capital cost. The salvage value is calculated as follows:

$$S = C_{rep} \times \frac{R_{rep}}{R_{comp}} \quad (22)$$

Environmental Performance Indicators

The environmental performance indicators in HOMER Pro are used to evaluate the environmental impact of energy systems. These indicators include factors such as carbon emissions, fuel consumption, and air pollution. Carbon emissions, in particular, are a key metric for assessing the environmental impact of energy production and are calculated using the following Eq. (23).

$$\text{Carbon Emissions (tons)} = \left(\frac{\text{Fuel Consumption (liter or m}^3\text{)}}{\text{Fuel Efficiency}} \right) \times \text{Emission Factor} \quad (23)$$

Environmental performance indicators are essential for assessing the sustainability of energy systems and their alignment with environmental goals. Minimizing carbon emissions, optimizing fuel consumption, and reducing air pollution are critical objectives for improving environmental performance. This project aims to enhance system efficiency and sustainability by considering these indicators in energy system design. Integrating environmental performance indicators helps optimize energy systems from both an economic and environmental perspective (Sadeghi et al., 2024).

Renewable Energy Fraction

The renewable energy fraction in HOMER Pro represents the proportion of total energy production supplied by renewable energy sources. This ratio is calculated by dividing renewable energy production by total energy production as follows Eq. (24).

$$\text{Renewable Energy Fraction (\%)} = \left(\frac{\text{Renewable Energy Fraction (kWh)}}{\text{Total Energy Production (kWh)}} \right) \times 100 \quad (24)$$

In this project, the renewable energy fraction was not constrained to a specific value, allowing HOMER Pro to optimize the system based on available renewable energy resources. This approach ensures that the system takes full advantage of renewable energy sources while offering a cost-effective solution. HOMER Pro analyzes various scenarios to identify the most efficient configuration while striking an optimal balance between energy sources (Güven & Yörükeren, 2024).

Findings and Discussion

The hybrid energy system designed to meet the 2024 electricity consumption values of a new public building, located 5.5 km from Yalova city center, was created by integrating the components defined in the system components section into the simulation. The optimal simulation results for three grid-connected and three off-grid system scenarios are presented in Table 1.

Table 1. Optimization results for on- grid and off-grid scenarios

On grid									
Scenario	PV Panel (kW)	Wind Turbine (kW)	Generator (kW)	Battery(kWh)	Converter	Electrolyzer (kW)	Hydrogen Tank (kg)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)
1	4000	78	-----	3	2707	100	300	11,7 M	0,0764
2	4000	78	-----	-----	2868	100	300	17,7 M	0,0765
3	4000	78	-----	-----	2868	100	300	18,7 M	0,0765
Off grid									
1	2182	62	2300	527	1130	100	300	25,4 M	0,304
2	4000	208	2300	1818	1892	100	300	48 M	0,499
3	3968	208	2300	1813	1502	100	300	49,1 M	0,502

As shown in Table 1, the grid-connected scenarios use components such as PVPs, WTs, hydrogen tanks, batteries, electrolyzers, and thermal loads. In these scenarios, variations in system components, renewable energy percentages, fuel prices (natural gas, gasoline, diesel), EV charging loads, and the minimum power capacity of EV charging stations were adjusted to determine the optimal system configuration. Similarly, the same components were considered for the off-grid system but with the addition of generators.

In grid-connected scenarios, no generator was used, whereas natural gas, diesel, and gasoline generators were used in off-grid systems. Specifically, off-grid scenario 1 uses a natural gas generator, Scenario 2 employs a diesel generator, and Scenario 3 uses a gasoline generator.

When evaluating the results of these scenarios, grid-connected scenario 1 was determined to be the most cost-effective system, with an NPC of \$10.8 million and LCOE of \$0.0764 per kWh. This scenario incorporates PVPs, WTs, hydrogen tanks, batteries, electrolyzers, and thermal load components, resulting in an optimal hybrid energy system from a cost perspective.

For off-grid systems, Scenario 1, with a natural gas generator, PVPs, WTs, hydrogen tanks, batteries, electrolyzers, and thermal load components, stands out as the most cost-effective configuration, with an NPC of \$25.3 million and COE of \$0.304 per kWh.

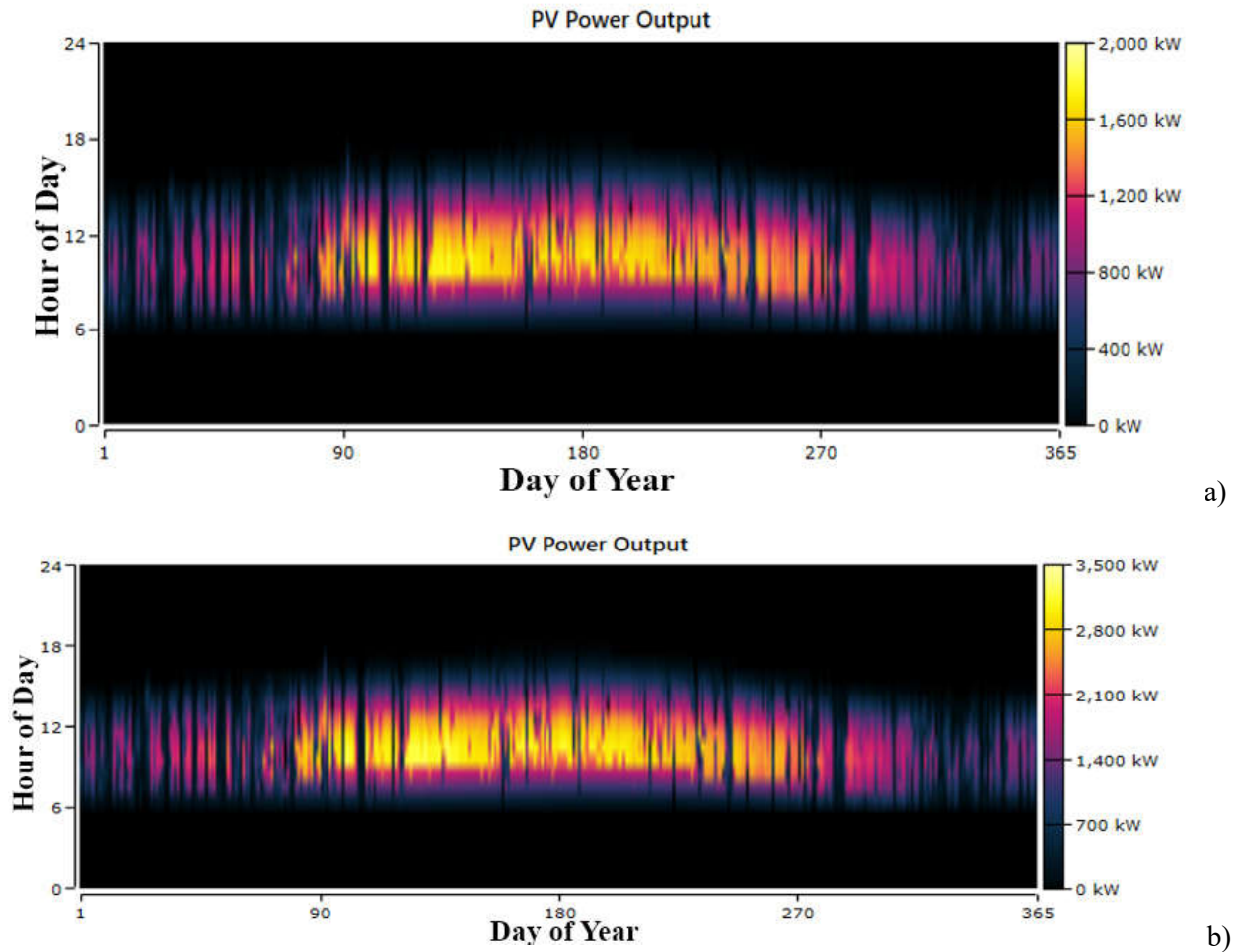


Figure 10. Solar panel output power for (a) off-grid scenario (b) on-grid scenario

In Figure 10 (a), the output power generated by the PVPs in off-grid scenario 1. As expected, the highest efficiency was achieved during midday when the sun's rays hit the Earth most directly and intensely. During winter, there is a noticeable decrease in the output power. The PVPs operate for 3,857 hours annually, generating a total of 2,353,853 kWh/year of electricity. The unit cost of electricity produced by the panels is \$0.0808/kWh.

Figure 10 (b), the output power generated by the PVPs in the on-grid scenario is presented. The PVPs operate for 3,857 hours annually, generating a total of 4,314,326 kWh/year of electricity. The unit cost of electricity produced by the panels is \$0.0808/kWh.

In Figure 11, the state of charge (SOC) of the batteries in off-grid scenario 1 are shown for different days and hours throughout the year. During the months when the PVPs operate at maximum efficiency (between April and October), the SOC reaches approximately 90% during midday. However, during the other hours of the day, particularly in January, February, March, November, and December, the SOC drops to between 52% and 72%. Despite these fluctuations, the fact that the batteries only reached the minimum SOC during the months with limited sunlight indicates that the system had a sufficient number of batteries to meet the energy demand.

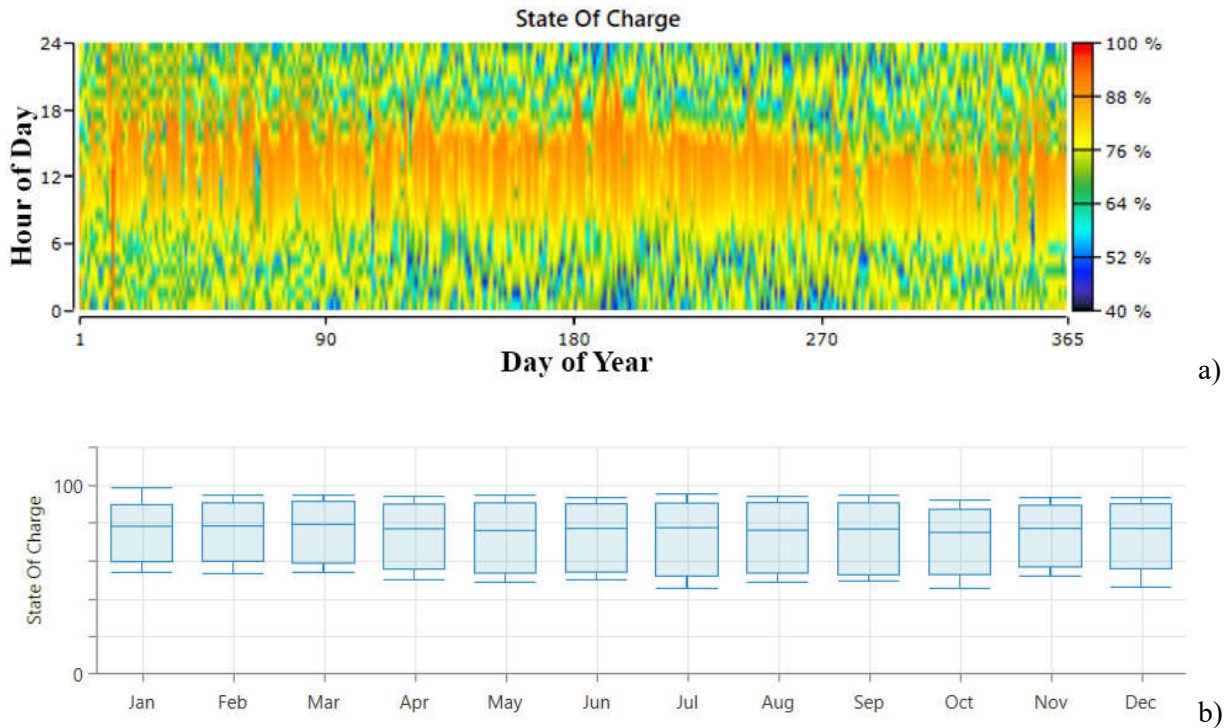


Figure 11. Battery state of charge in off-grid scenario 1 a) daily b) monthly

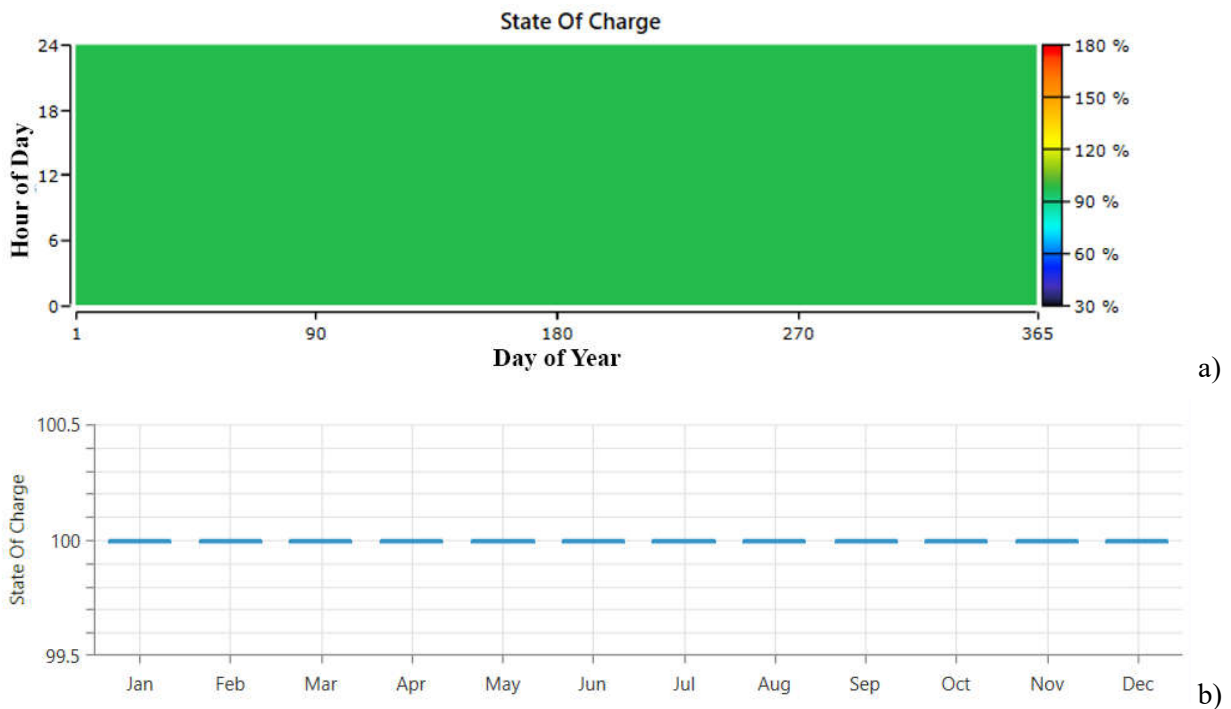


Figure 12. Battery state of charge in on-grid scenario 1 a) daily b) monthly

In Figure 12, the SOC of the batteries used in on-grid Scenario 1 are displayed for different days and hours throughout the year. As shown in the figure, the SOC remained at 100% throughout all months of the year. This is due to the system being connected to the grid, ensuring a constant supply of energy to fully charge the batteries at all times.

In Figure 13, the output power of the natural gas generator used in Scenario 1 is shown for different days and hours throughout the year. As observed in the graph, the integration of batteries and PVPs into the system significantly reduced the dependency on the electricity generated by the natural gas generator. The generator

operates for a total of 3,626 hours annually, producing 2,970,246 kWh of electricity. The unit cost of electricity produced by the generator is \$0.0367/kWh. Notably, between days 90 and 300 (from 06:00 to 18:00), the generator was scarce. This indicates that sufficient energy is supplied by the PVPs during daylight hours and that energy is drawn from the batteries when the sun is not available.

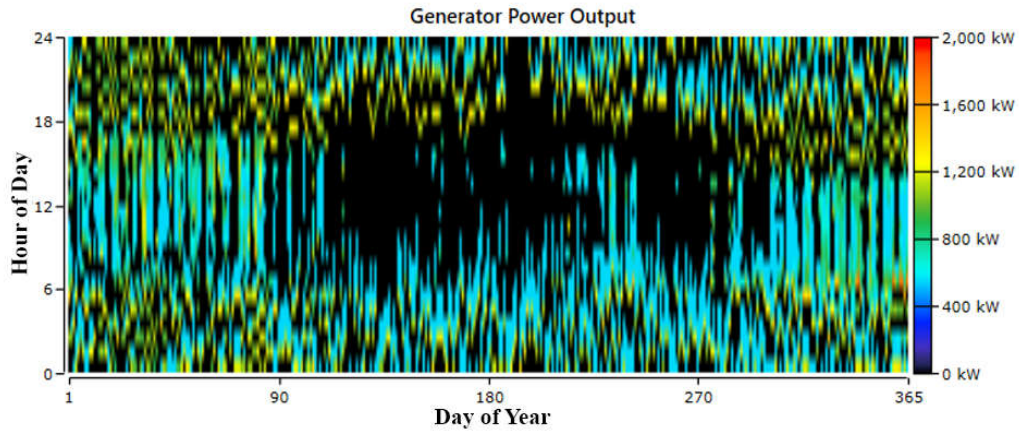


Figure 13. Daily output power of the generator (off-grid)

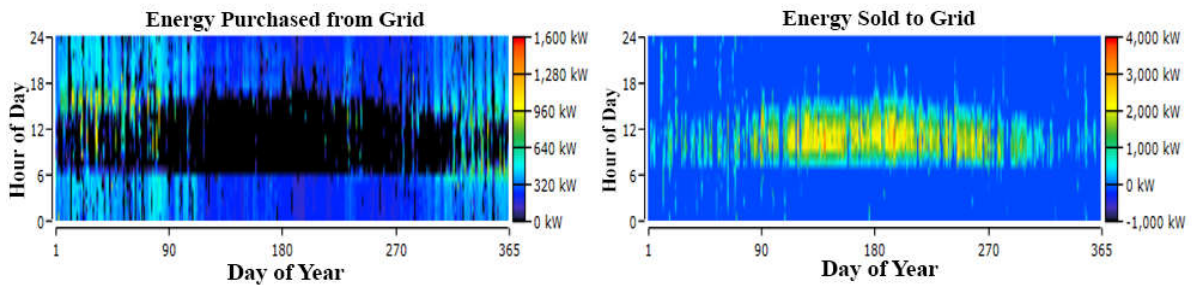


Figure 14. Annual energy purchased from and sold to the grid

In Figure 14, the amounts of electricity purchased from and sold to the grid in Scenario 1 are shown for different times of the year. The system purchased a total of 1,993,654 kWh of energy from the grid over the year and sold a total of 2,556,404 kWh back to the grid. This indicates that the electricity generated by the system components not only met the energy demand most of the time, but there was also a surplus of the electricity produced, which was sold back to the grid. This surplus energy sale contributed to additional system revenues.

Table 2. Electrical energy purchased and sold from the grid

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Energy Peak (kW)	Load	Energy Cost (\$)	Demand Charge (\$)
January	240,841	92,075	148,766	1,295		9,499.14	0
February	214,319	86,024	128,295	1,21		7,978.27	0
March	222,178	123,302	98,876	1,231		3,851.19	0
April	152,226	264,185	-111,959	788		18,819.54	0
May	107,422	416,001	-308,579	397		41,134.14	0
June	120,288	335,563	-215,275	503		30,248.18	0
July	89,762	432,193	-342,431	1,295		44,968.64	0
August	129,441	269,357	-139,916	981		21,623.46	0
September	108,554	281,53	-172,975	661		24,888.99	0
October	137,652	161,175	-23,523	920		8,093.90	0
November	210,413	59,933	150,48	1,273		10,253.51	0
December	260,556	35,066	225,49	1,467		17,617.58	0
Annual	1,993,654	2,556,404	-562,75	1,467		140,577.97	0

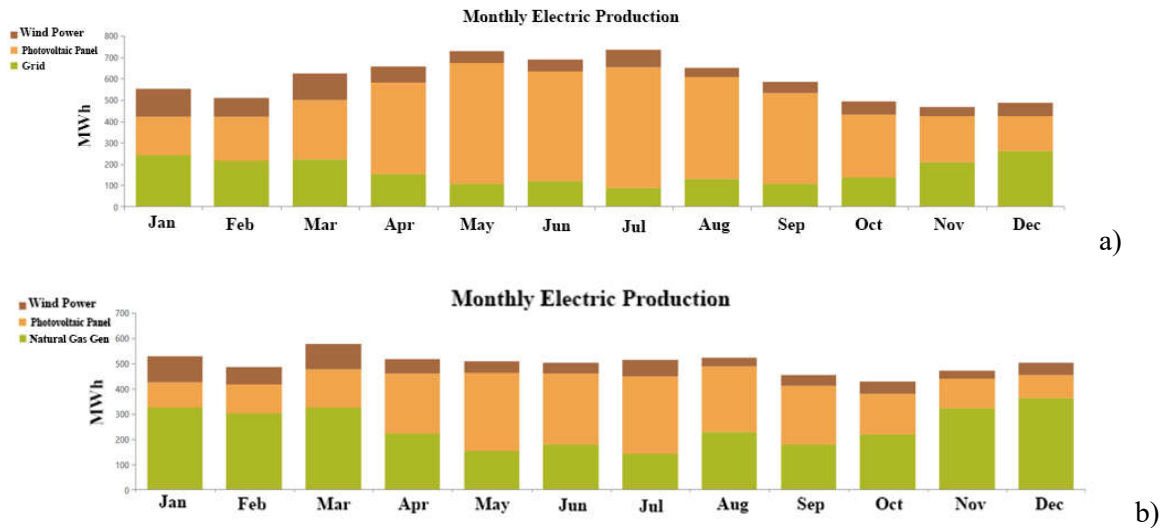


Figure 15. Electricity production distribution a) on-grid b) off-grid

Figure 15 (a) shows the monthly electricity generation distribution of system components for Scenario 1. It was observed that 60.1% of the total annual electricity generation was provided by PVPs, 12.1% by wind turbines, and 27.8% by electricity purchased from the grid. Annually, PVPs generated 4,314,326 kWh of energy, while wind turbines produced 864,659 kWh. Additionally, 1,993,654 kWh of electricity was purchased from the grid over the year.

Figure 15 (b) shows the monthly electricity generation distribution of system components for off-grid Scenario 1. It was observed that 39.2% of the total annual electricity generation was provided by PVPs, 11.4% by wind turbines, and 49.4% by natural gas generators. As shown in the graph, during the summer months, a significant portion of the electricity demand is met by the PVPs. Annually, the PVPs generate 2,353,853 kWh, the wind turbine generates 687,293 kWh, and the natural gas generator produces a total of 2,476,369 kWh.

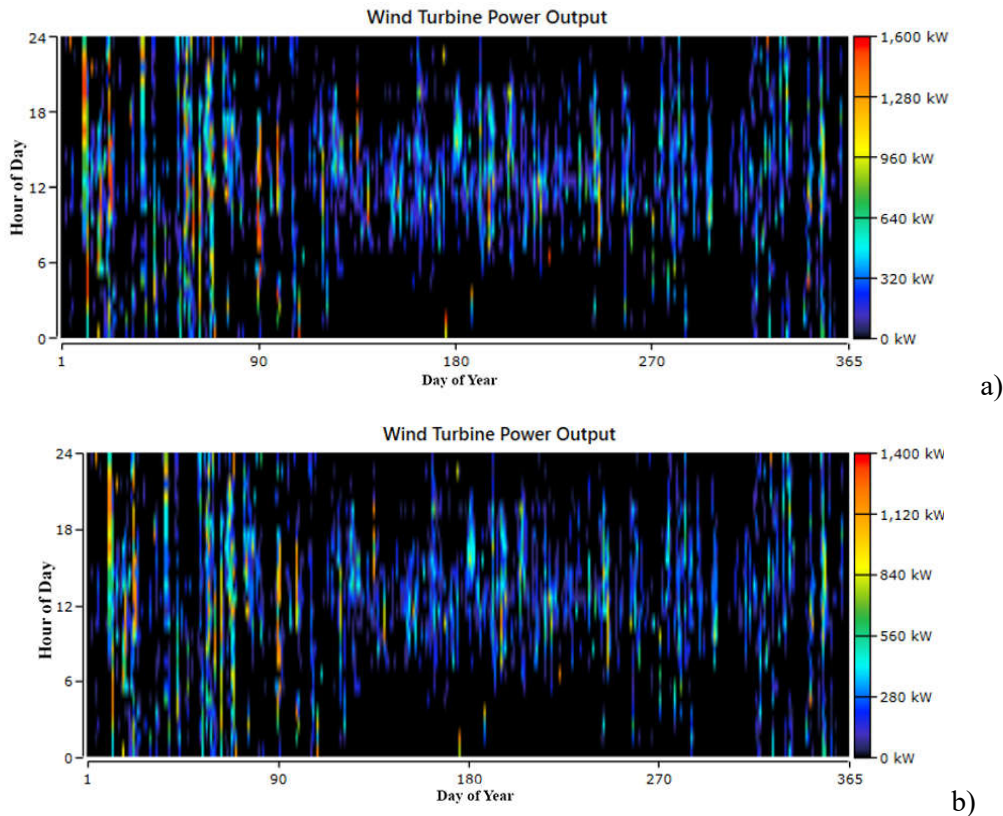


Figure 16. Wind turbine output power a) on-grid and b) off-grid

Figure 16(a), the output power of the wind turbine used in the grid-connected Scenario 1 is shown for different days and hours throughout the year. The variation in the values observed in the graph is related to wind speed and the electricity generation needs of the system. The wind turbine operates for a total of 2,901 hours annually and generates 864,659 kWh of electricity annually. The unit cost of electricity produced by wind turbines is \$0.272/kWh.

In Figure 16(b), the output power of the wind turbine used in Scenario 1 is displayed for different days and hours throughout the year. The variation in the values is influenced by both the wind speed and the system's electricity generation needs. The wind turbine operates for a total of 2,901 hours annually and generates 687,293 kWh of electricity annually. The unit cost of electricity produced by wind turbines is \$0.272/kWh.

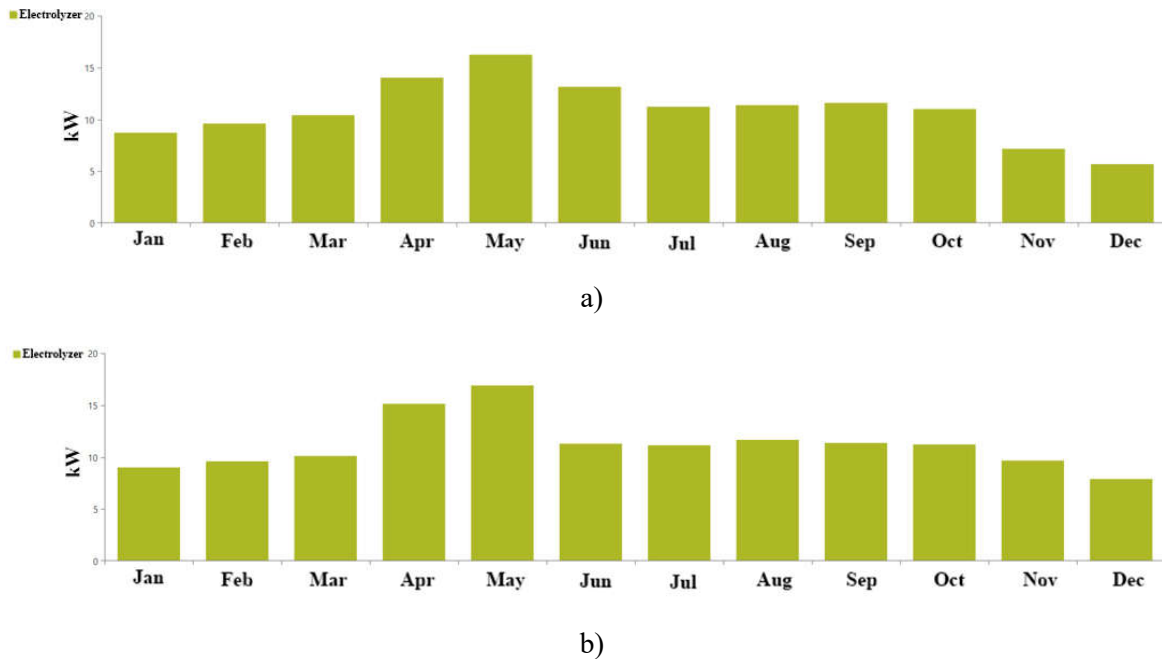


Figure 17. Electrolyzer annual energy consumption a) on-grid and b) off-grid

Figure 17(a) shows the annual energy consumption of the electrolyzer in grid-connected Scenario 1. The electrolyzer integrated into the hybrid energy system produced 3,956 kg of hydrogen over the course of the year. The peak hydrogen production occurred in May, during which the electrolyzer consumed approximately 18 kW of energy. The seasonal variation in hydrogen production corresponds to the availability of excess renewable energy, particularly during periods of higher solar generation, thus reducing reliance on grid power for hydrogen production. Figure 17(b) shows the annual energy consumption of the electrolyzer in off-grid Scenario 1. In this scenario, the electrolyzer produces 4,105 kg of hydrogen annually, peaking in April and May. During these months, the electrolyzer consumed an average of 18 kW of energy. The increase in hydrogen production during these months is directly linked to the surplus of renewable energy generated by solar and wind resources, which optimizes the electrolyzer's operation under off-grid conditions. The efficiency of the system in utilizing available renewable energy to drive hydrogen production highlights the effectiveness of the off-grid configuration in maintaining continuous hydrogen generation without grid dependency.

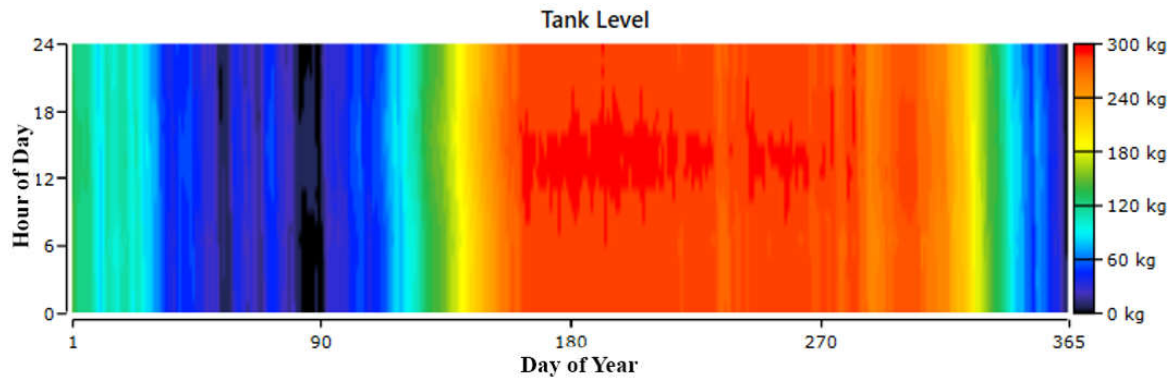


Figure 18. Hydrogen tank filling rate

Figure 18 illustrates the hydrogen tank fill levels for grid-connected (on-grid) Scenario 1 and off-grid Scenario 1 over different days and hours of the year. According to the graph, the hydrogen tank's fill level approached 100% between days 150 and 300 of the year. At full capacity, the hydrogen tank has an energy potential equivalent to 10,000 kWh. This indicates that during this period, the system produces excess renewable energy, which is efficiently stored as hydrogen for future use. Variations in the tank's fill levels correspond to fluctuations in renewable energy generation, highlighting the system's ability to balance energy production and storage.

Table 3 provides key data regarding the hydrogen storage system, including the tank's capacity to store 300 kg of hydrogen, which corresponds to 10 kWh of energy storage. The system's autonomy was calculated to be 21 hours, indicating the duration for which the stored hydrogen could supply energy without requiring additional input.

Table 3. Hydrogen storage data

Data	Value	Unit
Hydrogen Storage Capacity	300	kg
Energy Storage Capacity	10	kWh
Tank Autonomy	21.0	hr

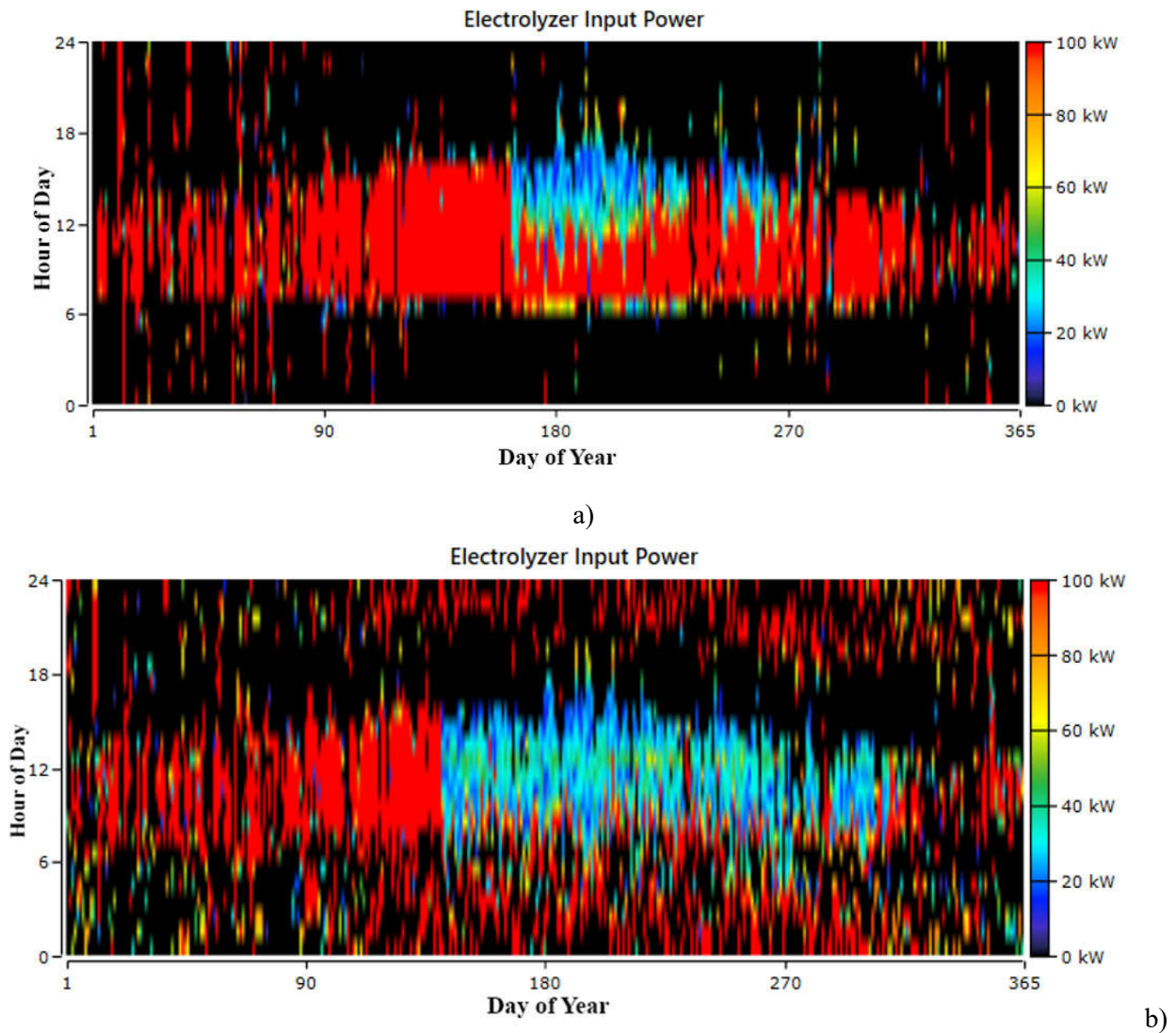


Figure 19. Electrolyzer input power a) on-grid and b) off-grid

In Figure 19(a), Scenario 1 shows the power input profile of the electrolyzer, which operated for 3,127 hours annually and consumed 231,190 kWh of energy. The capacity factor of the electrolyzer was 26.4%, and the total hydrogen production reached 3,956 kg per year. These results highlight the moderate utilization of the electrolyzer within the system, which is driven primarily by surplus renewable energy generation from solar and wind resources during peak periods. The grid-connected nature of the system provides additional flexibility in balancing the energy supply and demand, which contributes to consistent year-round electrolyzer operation.

In contrast, Figure 19(b) shows the power input profile of the electrolyzer in off-grid Scenario 1. In this case, the electrolyzer operated for 3,870 hours annually, consuming 239,909 kWh of energy. The electrolyzer capacity factor was slightly higher at 27.4%, with a total annual hydrogen production of 4,105 kg. The extended operation hours and increased hydrogen output indicate greater reliance on an electrolyzer for energy storage in the absence of a grid support. This reliance necessitated more frequent operation, particularly during periods of excess renewable energy generation, to ensure energy security and system autonomy. The higher capacity factor in the off-grid scenario underscores the critical role of electrolyzers in maintaining energy balance and supporting long-term sustainability in isolated system configurations.

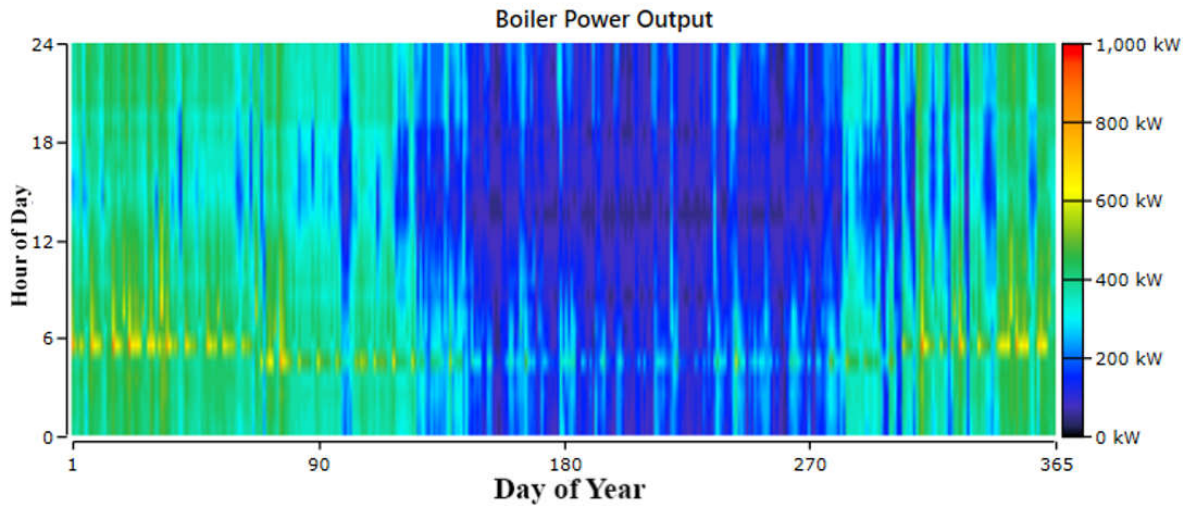


Figure 20. Thermal boiler output power

Figure 20 illustrates the boiler power outputs of both grid-connected Scenario 1 and the off-grid Scenario 1. The boiler was operated continuously for 8,760 hours throughout the year, generating a total of 2,503,479 kWh of thermal energy. The thermal efficiency of the system is 85%. As depicted in the figure, the boiler's output during summer ranges from 0 to 200 kW. The reduced output is attributed to the smaller temperature differentials during the warmer months, which result in lower heating demands. The consistent operation of the boiler throughout the year highlights its importance in meeting the system's thermal load, particularly during colder periods when the demand for heating is significantly higher.

Table 3. Hydrogen storage data

Data	Value	Unit
Hydrogen Storage Capacity	300	kg
Energy Storage Capacity	10	kWh
Tank Autonomy	21.0	hr

Cost analysis of the best on-grid scenario

The cost analysis for the on-grid system, as presented in Table 4, provides a detailed breakdown of the financial performance of each component, including capital costs, replacement expenses, operation and maintenance (O&M) costs, fuel expenditures, and salvage values. The Autosize Generator, with a capital cost of \$1,150,000.00 and substantial replacement and O&M costs of \$2,609,168.97 and \$2,869,971.74, respectively, accumulates a total expenditure of \$10,401,569.41, driven by significant fuel consumption of \$4,061,825.86. The Generic Boiler, which relies primarily on fuel, incurs a total cost of \$981,813.33 without additional O&M or capital expenses. The Generic Electrolyzer had a moderate capital cost of \$15,000.00 and minimal replacement and O&M costs of \$7,354.08 and \$15,491.17, respectively, resulting in a total cost of \$35,848.03 after considering a salvage value of \$1,997.22. The Grid component contributes notable savings, reflected in a negative O&M cost of -\$4,818,449.27, positively affecting the system's economics. The Hydrogen Tank, with a capital cost of \$130,000.00, incurs a total of \$159,045.95 due to O&M expenses. The SunPower E20-327 solar panel system, with a capital investment of \$3,285,946.49 and O&M costs of \$978,906.89, brings its total cost to \$4,264,853.38.

The Surrrette 6 CS 25P battery, which serves as a critical storage component, incurs a total cost of \$4,051,048.49 due to high replacement costs of \$3,225,203.48 and O&M expenses of \$239,725.87. The System Converter, with a capital cost of \$467,224.88 and a replacement cost of \$343,600.86, contributes \$717,510.65 to the system's total cost after factoring in a salvage value of \$93,315.08. Collectively, the system's financial evaluation reveals capital costs of \$5,048,171.37, replacement costs of \$2,960,123.90, and

O&M costs of -\$925,033.53. The inclusion of fuel costs (\$5,043,644.19) and salvage values (-\$384,709.46) results in a comprehensive total system cost of \$11,742,196.47. This cost analysis underscores the critical role of capital investments, operational expenditures, and lifecycle costs in determining the economic feasibility of on-grid energy systems, offering essential insights for long-term financial planning and investment decisions in renewable energy infrastructure.

Table 4. Cost table of on-grid system

Component	Cost (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Autosize Genset	1,150,000.00	2,609,168.97	2,869,971.74	4,061,825.86	289,397.16	10,401,569.41
Generic Boiler	0.00	0.00	0.00	981,818.33	0.00	981,818.33
Generic Electrolyzer	15,000.00	7,354.08	15,491.17	0.00	1,997.22	35,848.03
Grid	0.00	0.00	4,818,449.2	0.00	0.00	4,818,449.27
Hydrogen Tank	130,000.00	0.00	29,045.95	0.00	0.00	159,045.95
SunPower E20-327	3,285,946.49	0.00	978,906.89	0.00	0.00	4,264,853.38
System Converter	467,224.88	343,600.86	0.00	0.00	93,315.08	717,510.65
System	5,048,171.37	2,960,123.90	925,033.53	5,043,644.19	384,709.46	11,742,196.47

Table 5. Cost table of the off-grid system

Component	Cost (\$)	Replacement(\$)	O&M(\$)	Fuel(\$)	Salvage(\$)	Total(\$)
Autosize Genset	1,150,000.00	5,188,582.11	4,864,789.16	2,800,745.78	641,956.39	13,362,160.65
Eocycle EO20	1,150,000.00	534,359.56	22,268.56	0.00	361,746.45	1,344,881.67
Generic Boiler	0.00	0.00	0.00	981,818.33	0.00	981,818.33
Generic Electrolyzer	15,000.00	7,354.08	15,491.17	0.00	1,997.22	35,848.03
Hydrogen Tank	130,000.00	0.00	29,045.95	0.00	0.00	159,045.95
SunPower E20-327	3,526,547.68	0.00	1,050,583.70	0.00	0.00	4,577,131.38
Surrette 6 CS 25P	680,900.00	3,325,203.48	239,725.87	0.00	194,780.86	4,051,048.49
System Converter	567,644.83	417,450.48	0.00	0.00	113,371.15	871,724.17
System	7,220,092.52	9,472,949.71	6,221,904.39	3,782,564.11	1,313,852.07	25,383,658.66

Based on the off-grid system cost table in Table 5, the cost analysis provides a comprehensive breakdown of the financial performance, covering capital costs, replacement expenses, operation and maintenance (O&M) costs, fuel expenditures, salvage values, and total system costs. The Autosize Generator, with a capital cost of \$1,150,000.00, replacement cost of \$5,188,582.11, and O&M cost of \$4,864,789.16, leads to a total expenditure of \$13,362,160.65, largely due to substantial fuel consumption costing \$2,800,745.78. The Eocycle EO20 wind turbine, despite an initial capital cost of \$1,150,000.00, achieves a lower total cost of \$1,344,881.67 due to the absence of fuel costs and a salvage value of \$361,746.45. The Generic Boiler, primarily relying on fuel, incurs a total cost of \$981,818.33 without additional capital or O&M expenses. The Generic Electrolyzer, with a capital cost of \$15,000.00, minimal replacement costs of \$7,354.08, and O&M expenses of \$15,491.17, results in a total cost of \$35,848.03. The Hydrogen Tank adds \$159,045.95 to the system's cost. The SunPower E20-327 solar panel system, with a replacement cost of \$1,050,583.70 and no fuel expense, totals \$4,577,131.38. The Surrette 6 CS 25P battery, a crucial storage component, incurs a total cost of \$4,051,048.49 due to high replacement costs of \$3,325,203.43 and O&M costs of \$239,725.87. The System Converter, with a capital cost of \$567,644.83 and replacement cost of \$417,450.48, adds up to \$871,724.17 to the system's total cost.

In summary, the system's financial evaluation reveals total capital costs of \$7,220,092.52, replacement costs of \$9,472,949.71, and O&M costs of \$6,221,904.39. Including fuel costs (\$3,782,564.11) and subtracting salvage values (-\$1,313,852.07), the comprehensive total cost amounts to \$25,383,658.66. This cost analysis highlights the importance of capital and operational expenditures in assessing the economic sustainability of off-grid energy systems, offering essential insights for long-term financial planning and investment in renewable energy infrastructure.

Cost-Effective Energy System Scenario

Figure 21 illustrates the lowest-cost scenario in which the system integrates various energy sources and storage methods to meet both electrical and thermal demands. The primary components include a natural gas generator, a grid connection, wind energy, and PVPs. These components were designed to handle a daily electrical load of 11,103.87 kWh and a peak demand of 1,501.00 kW. The system also supports an EV charging station, which requires 300.00 kWh per day and has a peak demand of 600.00 kW. Excess energy generated from renewable sources is stored in batteries to ensure continuous energy availability. Additionally, an electrolyzer converts surplus electricity into hydrogen, which is stored in a hydrogen tank for later use or supplied directly to the hydrogen tank. For thermal demands, a boiler was utilized, consuming 6,858.85 kWh per day, with a peak consumption of 889.89 kW. The integration of these components through an AC/DC converter ensures balanced and efficient energy distribution, thus optimizing costs by leveraging renewable energy sources and reducing dependency on grid electricity. This system configuration successfully meets energy demands while maintaining cost-effectiveness and sustainability.

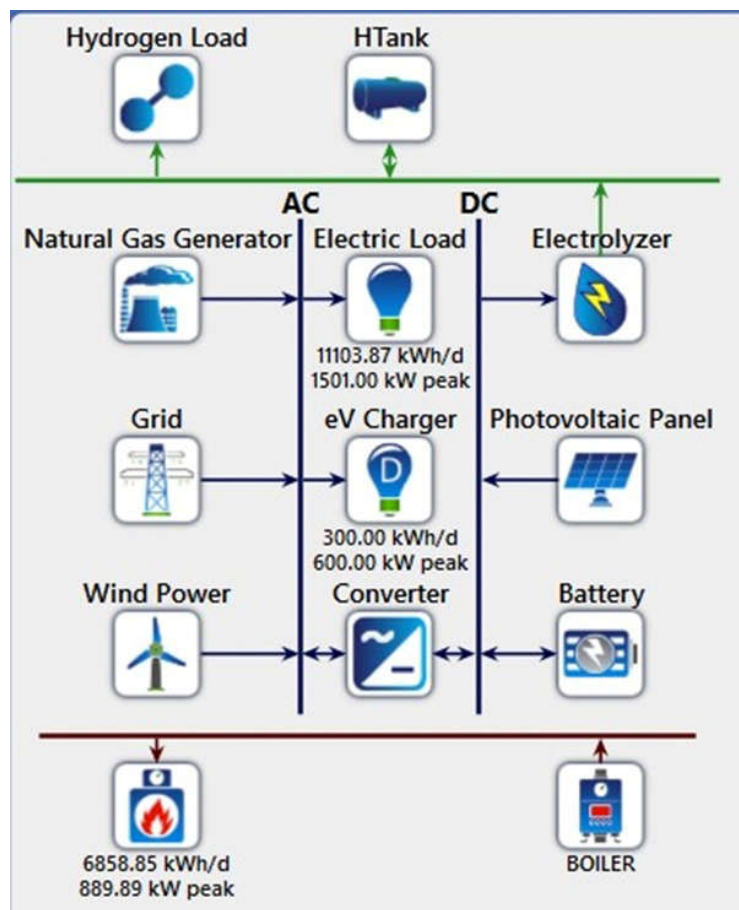


Figure 21. Thermal boiler output power

Sensitivity Analysis: Impact of Fuel Type on the System

In the sensitivity analysis conducted within the simulation, the effects of natural gas, gasoline, and diesel fuel types on the system were examined, assuming that the prices of these fuels may increase over time. It is projected that the unit price of natural gas could reach \$0.143, \$0.17, and \$0.20. Diesel prices were anticipated to rise to \$1.34, \$1.50, and \$1.75 per liter, whereas gasoline prices were expected to increase to \$1.38, \$1.45, and \$1.65 per liter. This analysis provides a detailed understanding of how the system responds to changes in fuel costs, thereby helping to evaluate the system's long-term viability and resilience against market fluctuations.

Currently, natural gas is considered one of the most environmentally friendly fossil fuel options. It offers a cleaner alternative for energy production due to its low-carbon emissions and is widely used in many energy systems. However, price volatility and supply security issues are critical factors that must be carefully considered in long-term planning. Increases in natural gas prices could elevate energy costs, challenging the system's economic stability.

Diesel fuel is widely used, especially in the heavy industry and transportation sectors, because of its high energy density and broad availability. However, it is known for producing significant carbon emissions. Rising diesel prices could increase operational transportation and logistics costs, prompting energy systems to explore alternative solutions to reduce their diesel dependency.

Gasoline is primarily used in light vehicles and personal transportation. Rising gasoline prices directly affect consumers' energy costs. Higher gasoline prices may encourage a shift toward more environmentally friendly alternatives, such as electric and hybrid vehicles. Moreover, increasing gasoline costs could accelerate the transition away from gasoline use in energy systems and promote the adoption of renewable energy sources.

The price fluctuations among these three fuel types are critical variables to consider in the strategic planning of energy systems. Increased fuel costs directly affect energy production costs and may drive a faster transition to renewable energy sources. Furthermore, considering the emission profiles and environmental impacts of different fuel types is essential for developing sustainable and economically efficient energy solutions. Ultimately, analyzing price changes in natural gas, diesel, and gasoline is crucial for understanding the dynamic nature of energy systems and shaping long-term sustainability strategies.

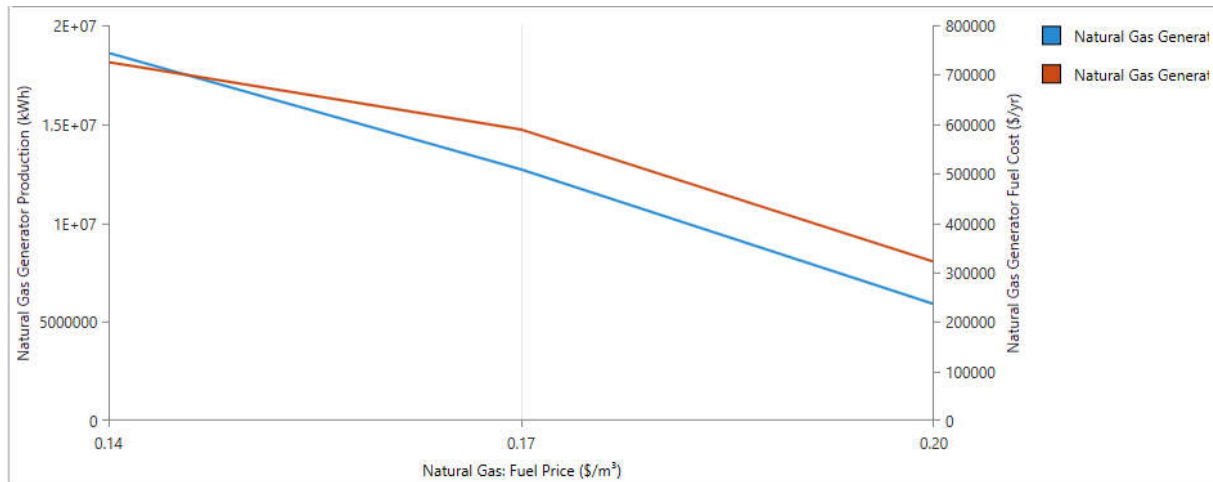
Effect of Varying Natural Gas Prices on the System

In the sensitivity analysis conducted as part of the simulation, the potential increase in natural gas prices over time was considered, with projections suggesting that prices could rise to \$0.143, \$0.17, and \$0.20 per cubic meter. Similarly, diesel prices are projected to increase to \$1.34, \$1.50, and \$1.75 per liter. This approach allowed for a detailed examination of how the system responds to changes in fuel costs, providing valuable insights into its long-term sustainability and resilience against market fluctuations.

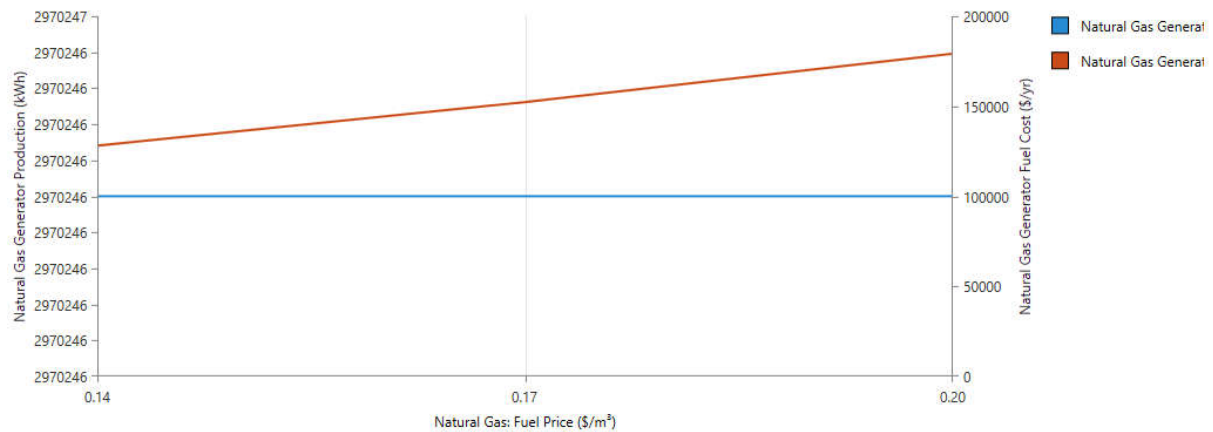
Figure 22(a) presents the impact of rising natural gas prices on the electricity generation and fuel costs of the best on-grid scenario. As natural gas prices increase from \$0.14/m³ to \$0.20/m³, the annual energy output of the natural gas generator decreases from approximately 2×10^7 kWh to around 1×10^7 kWh. This demonstrates that higher natural gas costs make generator operation less economically viable, leading the energy generation system to shift toward more cost-effective alternatives. While rising natural gas prices lead to higher fuel costs, a reduction in generator use causes total fuel costs to drop from an initial value of approximately \$800,000 to approximately \$300,000. This decline suggests a shift toward a more economical energy consumption preference toward grid electricity.

Figure 22(b) shows the effect of natural gas price on the generator for the best off-grid scenario. Unlike the on-grid scenario, there is no significant change in the annual energy output of natural gas generators as prices increase from \$0.14/m³ to \$0.20/m³. The generator's energy production remained steady at approximately 2,970,246 kWh per year, indicating that the generator's output was maintained regardless of fuel price fluctuations. However, fuel costs rise as natural gas prices rise. Initially, fuel costs are approximately \$100,000, but they rise to nearly \$200,000 when natural gas prices reach \$0.20/m³, showing that higher fuel prices directly impact operational costs without affecting the generator's output.

These results clearly demonstrate how rising natural gas prices affect generator utilization in both on-grid and off-grid systems. Although higher costs reduce generator use and fuel expenses in on-grid systems, off-grid systems maintain stable generator output, but fuel costs rise significantly with price fluctuations.



a)



b)

Figure 22. Effect of natural gas price a) on-grid and b) off-grid

Impact of Electrolyzer Efficiency on the System

The electrolyzer efficiency plays a critical role in the performance of energy systems, as demonstrated by the Homer scenarios. High-efficiency electrolyzers are capable of producing the same amount of hydrogen with less energy input, thereby reducing overall energy costs and improving the system efficiency. Conversely, low-efficiency electrolyzers consume more energy, leading to higher costs and less effective utilization of renewable electricity. Analyzing the effects of variations in electrolyzer efficiency is essential for understanding their impact on energy production costs, carbon emissions, and energy storage strategies. For instance, in scenarios where high-efficiency electrolyzers are employed, excess renewable energy can be more efficiently utilized for hydrogen production, thereby facilitating energy storage and better managing the energy surplus. Additionally, as the electrolyzer efficiency increases, the economic sustainability of renewable energy systems improves, thus reducing the reliance on fossil fuels. This shift not only enhances environmental sustainability and fortifies energy systems against long-term market fluctuations.

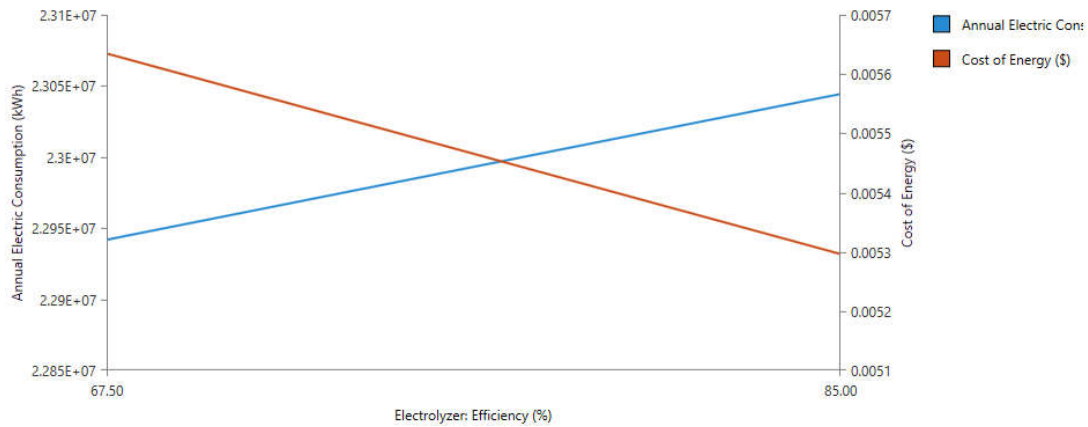


Figure 23. Effect of electrolyzer efficiency on electricity consumption and energy cost.

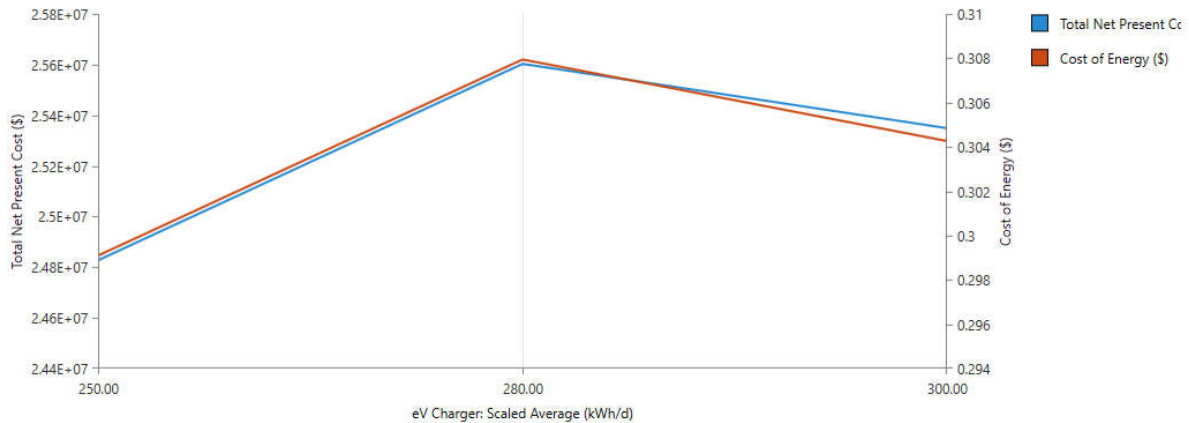
Impact of Average Daily Electricity Consumption of Electric Vehicle Charging Stations on the System

The average daily electricity consumption of EV charging stations is a complex topic influenced by several factors, each of which must be examined in detail to understand their effects on consumption. The first major determinant is the type of charging station. Fast-charging stations, which deliver higher power, can charge vehicles in a shorter time, resulting in daily consumption ranging from 100 to 500 kWh. In contrast, slow charging stations operate at lower power and typically consume between 10 and 50 kWh daily. Second, the frequency of use is a critical factor. High-traffic charging stations, where more vehicles are charged daily, naturally exhibit higher electricity consumption, whereas stations with less frequent use consume less electricity. The battery capacity of the vehicles also plays a significant role; vehicles with larger battery capacities require more electricity, whereas those with smaller batteries consume less. Regional grid characteristics can also influence consumption. In areas with lower electricity prices, more frequent charging may occur, whereas higher electricity prices can deter consumption. Furthermore, seasonal variations may affect usage patterns; during winter, cold weather can increase the charging time and consequently increase the electricity consumption, whereas hot weather in summer can have a similar but variable impact on the charging duration. The interplay of these factors means that the average daily electricity consumption of EV charging stations can vary widely, ranging from 10 to 500 kWh. This broad range highlights the importance of understanding and managing the energy demand of charging stations, particularly as EV adoption continues to grow. Effective energy management and planning for EV charging infrastructure is essential for optimizing the performance of energy systems and ensuring their sustainability, especially in light of the increasing integration of renewable energy sources.

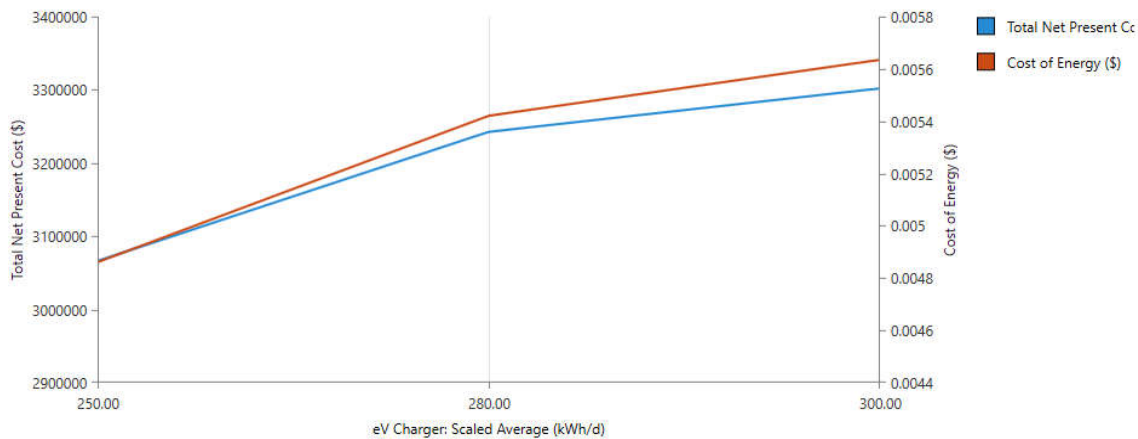
Figure 24 (a) presents the relationship between the average daily energy consumption of EV charging stations and the total NPC and energy cost of an off-grid system. The analysis shows that the scaled average daily energy consumption of the EV charging stations varies between 250 and 300 kWh. This detailed examination revealed the influence of EV charging station consumption on system costs. According to the data, when the daily energy consumption of the EV charging stations is 250 kWh, the total NPC is approximately 2.48×10^7 . As consumption increases, the total cost also rises, peaking at 280 kWh, which is approximately 2.56×10^7 . However, once daily consumption exceeds 280 kWh, the total cost begins to decrease, reaching around 2.52×10^7 at 300 kWh. Similarly, energy costs exhibit a comparable trend. For 250 kWh of daily energy consumption, the energy cost is approximately $\$0.304/\text{kWh}$. As consumption increases, energy costs rise, peaking at 280 kWh at approximately $\$0.31/\text{kWh}$. Beyond 280 kWh, energy costs decrease, returning to approximately $\$0.304/\text{kWh}$ at 300 kWh.

In Figure 24(b), an analysis of the on-grid system shows that when the daily energy consumption of the EV charging stations is 250 kWh, the total NPC is approximately $\$3,010,000$. As consumption increases, the total cost rises, reaching approximately $\$3,240,000$ at 280 kWh and continuing to climb to approximately $\$3,300,000$ at 300 kWh. The energy cost is approximately $\$0.0044/\text{kWh}$ for 250 kWh of daily consumption. As consumption increases, energy costs rise, peaking at 280 kWh at approximately $\$0.0052/\text{kWh}$ and further increasing to approximately $\$0.0056/\text{kWh}$ at 300 kWh. The analysis of these graphs reveals that the daily energy consumption of EV charging stations initially increases costs up to a certain threshold, after which costs

begin to decline. This trend suggests that there is an optimal usage level for charging stations. Specifically, the data indicate that the maximum impact on costs occurs at 280 kWh, and costs decrease beyond this point. These findings are critical for developing strategies aimed at optimizing energy consumption and minimizing costs. They highlight the importance of identifying the optimal consumption threshold for EV charging stations to enhance both cost and energy efficiency.



a)



b)

Figure 24. EV charging effect on daily electricity consumption off-grid b) on-grid

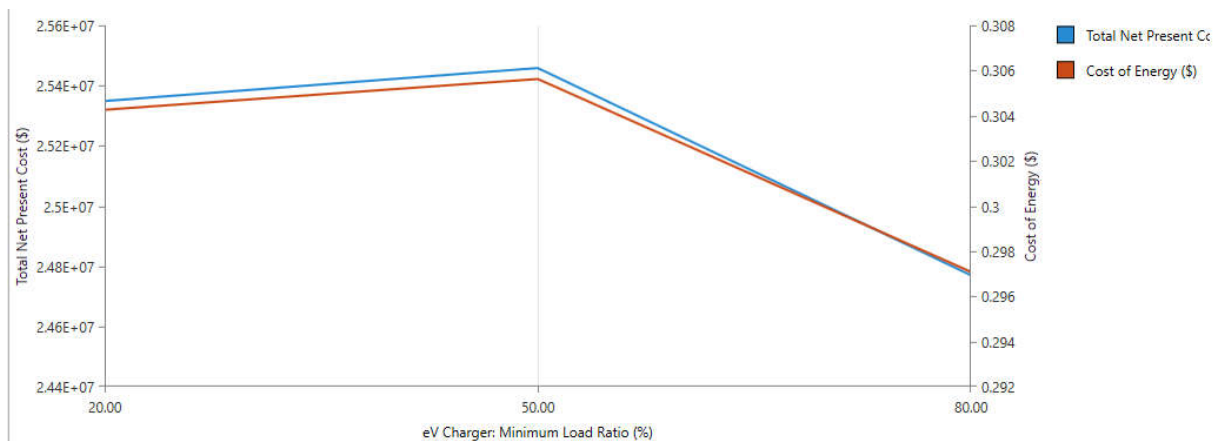
Impact of Minimum Load Ratio on Electric Vehicle Charging Station System

The minimum load ratio of EV charging stations represents the lowest energy demand required for stations to operate efficiently and safely. This ratio is crucial for optimizing energy consumption and preventing energy waste (Singh, et al., 2024). If charging stations fail to meet the minimum load requirement, device efficiency may decrease, potentially causing unexpected energy fluctuations. Therefore, considering minimum load ratios in the design and operation of charging infrastructure plays a critical role in enhancing the effectiveness of energy management. Accurately determining these minimum load ratios helps reduce energy costs while ensuring reliable and long-term operation of charging stations (Silapan et al., 2024).

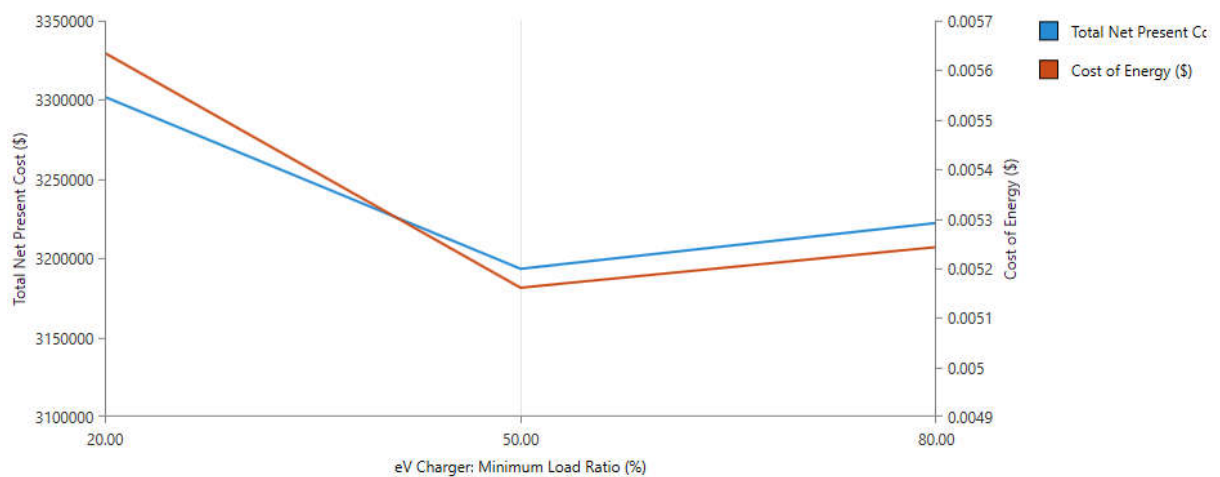
Figure 25 (a) shows the analysis of an off-grid system, examining the effect of the minimum load ratio of EV charging stations on the total NPC and energy cost. The minimum load ratio of the stations varies between 20% and 80%, which significantly affects the cost.

According to the data, when the minimum load ratio is 20%, the total NPC is approximately $\$2.48 \times 10^7$. As the ratio increases to 50%, the total cost peaks at approximately $\$2.54 \times 10^7$. However, when the minimum load ratio reaches 80%, the total cost decreases to approximately $\$2.46 \times 10^7$. This trend indicates that the load ratio initially leads to cost increases; however, after surpassing a certain level, further increases in the ratio

result in lower costs. In terms of energy costs, when the minimum load ratio is 20%, the cost is approximately \$0.304/kWh. As the load ratio increases to 50%, energy costs rise to approximately \$0.308 per kWh. However, at an 80% load ratio, the energy cost decreases to approximately \$0.296/kWh. This demonstrates a similar trend, where costs increase up to a certain point and then begin to decrease as the load ratio exceeds the optimal threshold. Figure 25 (b) presents the analysis of an on-grid system. When the minimum load ratio is 20%, the total NPC is approximately \$3,335,000. As the ratio increases to 50%, the total cost decreases to approximately \$3,190,000. However, when the load ratio reaches 80%, the total cost rises again to approximately \$3,230,000. This indicates that the minimum load ratio is optimal at a specific level, and costs increase when the ratio is below or above this level. The energy cost is approximately \$0.0057/kWh at a minimum load ratio of 20%, the cost is approximately \$0.0057/kWh. As the ratio increases to 50%, the cost decreases to approximately \$0.0050/kWh but rises again to approximately \$0.0053/kWh at an 80% load ratio. This suggests that energy costs fluctuate based on the minimum load ratio and increase after a specific threshold.



a)



b)

Figure 25. Effect of minimum load ratio on eV charging a) off-grid b) on-grid

These findings demonstrate that the minimum load ratio of EV charging stations is a critical parameter for cost optimization in both off-grid and on-grid systems. There is an optimal load ratio at which charging stations operate most efficiently and economically, and deviations from this ratio lead to significant changes in costs. Therefore, careful consideration of such parameters is essential for achieving cost-effectiveness and operational efficiency.

Environmental Assessment

In addition to the cost results, the emission values of the scenarios play a critical role in minimizing environmental impacts. Table 6 presents the emission values for the best on-grid and off-grid scenarios. These values highlight the environmental footprint of each system and demonstrate the relative environmental performance of on-grid and off-grid designs.

Table 6. Emission values of the best scenarios for on-grid and off-grid

Emission	On grid	Off grid	Unit
Carbon Dioxide	1838833	2292291	kg/yr
Carbon Monoxide	0	14778	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	645	kg/yr
Particulate Matter	0	89,6	kg/yr
Sulfur Dioxide	5463	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	2671	13883	kg/yr

From the emission data, it is evident that the off-grid system, which relies more heavily on fossil fuels, generates significantly higher emissions, particularly in terms of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), and nitrogen oxides (NO_x). In contrast, the on-grid system benefits from the availability of renewable energy sources and the grid, which reduces its reliance on polluting fuels, thereby resulting in lower overall emissions. The on-grid scenario generates 51.2% of its electricity from renewable energy sources, according to the HOMER simulation. In comparison, the off-grid scenario generates only 17.9% of its electricity from renewable sources. This substantial difference in renewable energy integration not only leads to lower emissions in the on-grid scenario but also contributes to a more sustainable operational profile. When considering carbon dioxide emissions, the on-grid system emits approximately 1.84 million kg of CO₂ annually, whereas the off-grid system produces 2.29 million kg. This 24% reduction in CO₂ emissions for the on-grid system can be attributed to its higher reliance on renewable energy sources, such as solar and wind, alongside the ability to draw energy from the grid when needed.

Furthermore, harmful pollutants such as CO, unburned hydrocarbons, particulate matter, and NO_x are completely absent in the on-grid scenario or are significantly lower than in the off-grid scenario. The off-grid system, which relies on fossil fuel-based generation, contributes to higher emissions of these pollutants due to the combustion of fuels like diesel or natural gas. Sulfur dioxide (SO₂) emissions are also a notable point of comparison. While the on-grid system produces 5,463 kg/yr of SO₂ due to some grid reliance on fossil fuels, the off-grid system, which does not utilize sulfur-emitting sources, produces none. However, the reduction in NO_x and other harmful gases in the on-grid system outweighs this slight increase in SO₂ emissions.

In summary, the environmental assessment clearly indicates that the on-grid scenario is more favorable from both an emissions and cost perspective. The substantial integration of renewable energy in on-grid scenarios reduces the environmental footprint, making it a more sustainable option for energy generation. As renewable energy technologies continue to advance and their costs decline, this trend is expected to grow stronger, further emphasizing the need to prioritize grid-connected systems that maximize renewable energy use. The off-grid scenario, while offering independence, incurs higher environmental costs because it relies on fossil fuels, underscoring the importance of renewable energy integration in achieving long-term sustainability goals.

Conclusion and Recommendations

This study aimed to design grid-connected and off-grid hybrid energy systems to meet the 2024 monthly consumption values of a public building located 5.5 km away from the city center using HOMER software. Various scenarios were modeled, and the optimal system configuration was determined by HOMER by comparing different results. The key components in these scenarios include PVPs, WTs, hydrogen tanks,

electrolyzers, thermal boilers, natural gas generators, converters, and batteries. Differences between scenarios arise from the components used and the sensitivity analyses performed. The inclusion or exclusion of generators and grid connections, changes in system components, and variations in the sensitivity analysis parameters were critical for identifying the system that best met the energy load requirements.

From the analysis, the hybrid energy system consisting of PVPs, a grid, WTs, thermal boilers, hydrogen tanks, electrolyzers, and batteries was determined to be the optimal solution, with an NPC of \$10.8 million and an LCOE of \$0.0764/kWh. Additionally, this system provided 51.2% of its energy from renewable sources, making it the most suitable choice from both a cost and environmental perspective. However, if an off-grid configuration is required, the first off-grid scenario emerges as a more viable option. This system, with an NPC of \$25.3 million and an LCOE of \$0.304/kWh, consists of PVPs, WTs, hydrogen tanks, electrolyzers, thermal boilers, natural gas generators, and batteries.

Given current considerations such as cost, renewability, and environmental impacts, the grid-connected scenario is the most practical choice. The integration of renewable energy sources into modern energy systems is essential for sustainable development, but it requires a thorough feasibility analysis before implementation. It is crucial to first assess the solar, wind, hydrogen, and geothermal energy potential of the chosen region. Additionally, a detailed understanding of the required energy loads is vital for accurate system design.

Hybrid energy systems are highly dependent on meteorological data of the region and fluctuations in electricity demand. As a result, system configurations can significantly affect the economic performance of a system. Therefore, as demonstrated in this study, a detailed analysis is essential. The configurations analyzed here provide valuable insights into the use of renewable energy sources and offer an optimal solution for this particular case.

Recommendations:

1. **Detailed Feasibility Studies:** Before implementing hybrid renewable energy systems, comprehensive feasibility studies should be conducted, including an assessment of the region's renewable energy potential (solar, wind, hydrogen, geothermal) and a detailed analysis of energy consumption patterns.
2. **Optimization of sustainability:** The optimal balance between renewable energy integration and economic viability should be continuously evaluated. The inclusion of higher percentages of renewable energy in the energy mix should be encouraged because it supports long-term sustainability while reducing environmental impacts.
3. **Flexibility in System Design:** Energy systems should be designed with flexibility to accommodate technological and policy changes, such as advancements in storage technologies or shifts in energy regulations.
4. **Environmental Impact Reduction:** Future projects should prioritize minimizing carbon and other pollutants by maximizing renewable energy usage. A clear pathway to reduce reliance on fossil fuels should be established.
5. **Economic Incentives:** Governments and institutions should consider providing incentives or subsidies for the integration of renewable energy sources, especially hybrid systems, to make them more financially attractive.

In conclusion, this detailed analysis provides a clear framework for the successful design and implementation of hybrid renewable energy systems. Such studies are vital for ensuring the economic and technical efficiency of energy projects, ultimately contributing to the broader goals of sustainable development and environmental preservation.

References

- Al-Sahlawi A.A.K, Ayob S.M., Tan C.W., et al (2024). Optimal Design of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System Considering Electric Vehicle Station Using Improved Multi-Objective Optimization: Techno-Economic Perspectives. *Sustain* 16: . <https://doi.org/10.3390/su16062491>
- Belkhier Y., Oubelaid A., Shaw R.N. (2024). Hybrid power management and control of fuel cells-battery energy storage system in hybrid electric vehicle under three different modes. *Energy Storage* 6:1–22. <https://doi.org/10.1002/est2.511>
- Chowdhury, S., Kumar, Y., Shrivastava, S., Patel, S. K., & Sangwai, J. S. (2023). A Review on the Recent Scientific and Commercial Progress on the Direct Air Capture Technology to Manage Atmospheric CO₂ Concentrations and Future Perspectives. *Energy & Fuels*, 37(15), 10733–10757. doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c03971
- Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2008). Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy*, 85(10), 968–987. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.02.012
- Falope T., Lao L., Hanak D., Huo D. (2024). Hybrid energy system integration and management for solar energy: A review. *Energy Convers Manag* X 21:100527. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100527>
- Güven A.F. (2024a). Integrating electric vehicles into hybrid microgrids: A stochastic approach to future-ready renewable energy solutions and management. *Energy* 303:131968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131968>
- Güven A.F. & Yörükeren N. (2024). A comparative study on hybrid GA-PSO performance for stand-alone hybrid energy systems optimization. 42:1410–1438. <https://doi.org/10.14744/sigma.2024.00>
- Güven A.F. & Yücel E. (2024). Sustainable energy integration and optimization in microgrids: enhancing efficiency with electric vehicle charging solutions. *Electr Eng*. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02619-x>
- Güven, A. F. & Mete M. (2021). Balıkesir İli Erdek İlçesi İçin Bağımsız Hibrit Enerji Sisteminin Fizibilite Çalışması Ve Ekonomik Analizi. *KONJES*, c. 9, sy. 4, ss. 1063–1076, 2021, doi: 10.36306/konjes.978002.
- Güven, A. F. (2017). Bahçelievler Belediye Başkanlık Binasının Enerji İhtiyacının Güneş ve Rüzgar Sistemi ile Karşılanması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 24–36. Retrieved from <http://dergipark.gov.tr/sinopfbd/issue/28364/255023>.
- Güven, A. F., & Hatipoğlu, C. (2022). Şebekeden Bağımsız Güneş/Rüzgâr/Biyogaz/Yakıt Hücresi/Batarya Tabanlı Hibrit Enerji Sisteminin Tekno-Ekonomik Analizi: Muğla Zaferler Köyü Vaka Çalışması. *EMO Bilimsel Dergi*, 12(1), 53-65.
- Güven, A. F., & Mengi, O. Ö. (2023). Assessing metaheuristic algorithms in determining dimensions of hybrid energy systems for isolated rural environments: Exploring renewable energy systems with hydrogen storage features. *Journal of Cleaner Production*, 428(September). doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139339
- Güven, A. F., & Poyraz, E. (2021). Feasibility Study and Techno-Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Muğla Province Köyceğiz. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 70–85. doi: 10.31466/kfbd.880437.
- Güven, A. F., & Yörükeren, N. (2022). Bir Hibrit Enerji Sisteminin Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması- Genetik Algoritma ve Gri Kurt Optimizasyon Algoritma Tekniği ile Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu: Yalova Üniversitesi için bir vaka çalışması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 853–879. doi: 10.31466/kfbd.1169643
- Güven, A. F., & Yücel, E. (2023). Application of HOMER in assessing and controlling renewable energy-based hybrid EV charging stations across major Turkish cities. *International Journal of Energy Studies*, 8(4), 747–780. doi: 10.58559/ijes.1324236.
- Güven, A. F., Türkmen, Ş., Aşıklı, E., & Örnek, G. (2023). Investigating the Effects of Different Types of Battery Impacts in Energy Storage Systems on Standalone Hybrid Renewable Energy Systems. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 943–964. doi: 10.31466/kfbd.1275823.

- Güven, A.F. (2024b). Heuristic techniques and evolutionary algorithms in microgrid optimization problems, in: Microgrid, CRC Press.
- Hasanien H.M., Alsaleh I., Tostado-Véliz M., et al (2024). Hybrid particle swarm and sea horse optimization algorithm-based optimal reactive power dispatch of power systems comprising electric vehicles. Energy 286:. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129583>
- Jui J.J., Ahmad M.A., Molla M.M.I., Rashid M.I.M. (2024). Optimal energy management strategies for hybrid electric vehicles: A recent survey of machine learning approaches. J Eng Res 12:454–467. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.016>
- Nandi, S., Ghatak, S. R., Sannigrahi, S., & Acharjee, P. (2024). Coordinated planning and operation of PV-hydrogen integrated distribution network incorporating daily-seasonal green hydrogen storage and EV charging station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 90(August), 134–158. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.402
- Okafor, C. E., & Folly, K. A. (2024). Optimal Sizing of Battery Energy Storage System (BESS) for Multiple Applications using Regression Analysis and Deep Sleep Optimizer Algorithm . 1 . Introduction Many researchers around the world have noted the crucial needs of battery energy storage sys. *Scientific African*, e02424. doi: 10.1016/j.sciaf.2024.e02424
- Sadeghi, A., Maleki, A., & Haghghat, S. (2024). Techno-Economic Analysis and Optimization of a Hybrid Solar-Wind- Biomass-Battery Framework for the Electrification of a Remote Area : A. *Energy Conversion and Management: X*, 100732. doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100732
- Silapan, S., Patchanee, S., Kaewdornhan, N., Somchit, S., & Chatthaworn, R. (2024). Optimal Sizing and Locations of Fast Charging Stations for Electric Vehicles Considering Power System Constraints. *IEEE Access*, 12(September). doi: 10.1109/ACCESS.2024.3466969
- Singh, A., Kumar, A., K.A., C., & Maulik, A. (2024). DC microgrid operation with hybrid energy storage considering islanding constraints and demand response coordination: A bi-level Stackelberg game approach. *Journal of Energy Storage*, 102(PA), 113913. doi: 10.1016/j.est.2024.113913



HİDROJEN VE DOĞALGAZ KARIŞIMLARININ YAKILMASI İÇİN GEREKLİ DENEY SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KURULMASI

Mehmet Enes ERSÖZ¹

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE.

¹ORCID ID: 0000-0002-2057-9318

Halit ARAT²

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE.

²ORCID ID: 0000-0002-6634-2535

Özer AYDIN³

³Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE.

³ORCID ID: 0000-0002-6397-5601

Özet

Bu çalışmada, ev tipi bir ocakta belirli oranlarda karıştırılmış hidrojen ve doğalgaz karışımının yanma verimliliği ve emisyon özelliklerinin incelenebileceği ayrıntılı bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney tesisatı, 300mbar basınç altında hidrojen ve doğalgaz karışımı hazırlamaya uygun olup, gerekli güvenlik önlemlerini sağlamaktadır. Tesisatta, 130 bar basınçta hidrojen tüpü, 200 bar basınçta azot tüpü ve tesisattan alınan 300 mbar basınçta doğalgaz bulunmaktadır. Azot tüpü, güvenlik amacıyla sistemde yer almakta ve normalde kapalı bir selenoid vana ile kontrol edilmektedir. Hidrojen ve doğalgaz hatlarında ise normalde açık selenoid vanalar kullanılmış olup, olası bir gaz kaçağını algılayan gaz alarm sistemleriyle entegre çalışmaktadır. Ayrıca, hidrojen tüpü çıkışında yer alan alev tutucu da güvenliği artırmaktadır. Karışım gazı, MFC (Mass Flow Controller)'leri kontrol eden basınç sensöründen geçtikten sonra, sistemin genel güvenliğini sağlamak amacıyla yerleştirilen ikinci bir alev tutucudan geçerek ev tipi dörtlü ocağa ulaştırılmaktadır. Sistem, bilgisayar kontrollü olup, istenilen debi ve basınç değerleri girilerek ayarlanabilmektedir. Ocak üzerine yerleştirilen davlumbaz içerisinde Testo 350 baca gazı analiz cihazı karbon monoksit (CO), azot oksitler (NOx) ve diğer yanma gazlarının ölçümünde kullanılmakta ve verilerin doğruluğunu sağlamaktadır. Bununla birlikte, ocak üzerinde eşit miktarda saf su kullanılarak yapılacak kaynama deneyleri için ortam sıcaklığı DS18B20 sensörü ve suyun sıcaklığı ise su içerisine daldırılmış DS18B20 sıcaklık sensörü ile kontrol edilmektedir. Ortam atmosferik basıncı ve bağıl nemi, BME280 sensörü ile ölçülmekte ve tüm sensör verileri Arduino Mega kontrol kartı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Veriler, Python ile geliştirilmiş bir arayüzde gerçek zamanlı olarak izlenmekte ve grafiksel olarak gösterilmektedir. Ayrıca veri kaydetme işlevi ile veriler, belirli aralıklarla saklanarak deney sürecinin her aşaması kayıt altına alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğalgaz, Enerji Verimliliği, Hidrojen, Yanma Emisyonları.

DEVELOPMENT AND ESTABLISHMENT OF THE EXPERIMENTAL SYSTEM REQUIRED FOR THE COMBUSTION OF HYDROGEN AND NATURAL GAS MIXTURES

Abstract

In this study, a detailed experimental setup was prepared to examine the combustion efficiency and emission characteristics of a hydrogen and natural gas mixture at specific ratios on a domestic stove. The experimental setup is designed to prepare hydrogen and natural gas mixtures at a pressure of 300 mbar and includes essential safety measures. The system consists of a hydrogen cylinder at 130 bar, a nitrogen cylinder at 200 bar, and natural gas at 300 mbar from the main supply. The nitrogen cylinder is included for safety purposes and is controlled by a normally closed solenoid valve. The hydrogen and natural gas lines, on the other hand, use normally open solenoid valves, integrated with gas alarm systems that detect potential leaks. Additionally, a flashback arrestor at the hydrogen cylinder outlet enhances safety. After passing through a pressure sensor that controls the mass flow controllers (MFC), the mixed gas flows through a secondary flashback arrestor for

added safety and reaches a domestic four-burner stove. This computer-controlled system allows precise adjustments of desired flow rates and pressure settings. Testo 350 flue gas analyzer in the hood placed on the stove is used to measure carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and other combustion gases and ensures the accuracy of the data. Beside this, for boiling experiments to be carried out using equal amounts of pure water on the domestic stove, the ambient temperature is controlled by the DS18B20 sensor and the temperature of the water is controlled by the DS18B20 temperature sensor immersed in the water. The ambient atmospheric pressure and relative humidity are measured with a BME280 sensor, and all sensor data are transmitted to a computer via an Arduino Mega controller. The data are visualized in real time on a Python-based interface, with graphical displays, and recorded periodically to document each stage of the experimental process.

Keywords: Natural Gas, Energy Efficiency, Hydrogen, Combustion Emissions.

Giriş

Hidrojen, elektrik, ısıtma, ulaşım ve sanayi gibi çeşitli enerji sektörlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna yardımcı olma potansiyeline sahip esnek bir enerji taşıyıcısıdır [4]. Hidrojen, fosil yakıtlardan buhar metan reformasyonu (SMR) yöntemiyle doğal gaz kullanılarak veya kömür gazlaştırma yoluyla üretilebildiği gibi, yenilenebilir kaynaklardan temiz elektrikle (örneğin, yenilenebilir enerji, nükleer enerji veya temiz enerji şebekeleri) elektroliz yöntemiyle de üretilebilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta ısı (örneğin, nükleer enerjiden sağlanan) kullanılarak termokimyasal yöntemlerle, biyokütle gazlaştırma veya fotoelektroliz yoluyla da üretim gerçekleştirilebilir [2]. Hidrojen üretildikten sonra, hem gaz hem de sıvı halinde depolanabilir ve taşınabilir. Bu amaçla, yer üstü tanklarında ve tuz mağaralarında gaz halinde depolama, iyi yalıtımlı tanklarda kriyojenik sıvı hidrojen depolama, sıkıştırılmış gaz taşımacılığı, sıvı taşımacılığı ve gaz boru hatlarıyla taşımacılık gibi çeşitli seçenekler mevcuttur [3]. Hidrojen, enerji sistemlerine büyük oranlarda entegre olan değişken yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle rüzgar ve güneş enerjisinin entegrasyonu için etkili bir çözüm olabilir [13]. Örneğin, hidrojen, bu enerji kaynaklarının değişkenliği ve mevsimsel dalgalanmalarını mevsimsel enerji depolama yoluyla ya da yüksek sıcaklık gerektiren ısıtma ve sanayi süreçleri gibi karbon salınımını azaltmakta zorlanılan enerji sektörlerinin dekarbonizasyonu aracılığıyla çözmeye yardımcı olabilir [6,11]. Ancak, hidrojen taşıma ağlarının kurmanın maliyeti, bu zor dekarbonize edilebilen sektörlerde yenilenebilir hidrojen kullanımını engelleyen bir zorluk oluşturabilir. Bu engeli aşmak amacıyla, hidrojenin mevcut doğalgaz taşıma altyapılarına karıştırılması, hidrojenin farklı kullanım alanlarına taşınması için potansiyel olarak daha ekonomik bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır; bu yöntem, karışım gazının doğrudan kullanılması veya ayrıştırılmasının ardından saf hidrojenin kullanılmasını içerebilir [8,9]. Buna ek olarak, karıştırma amacıyla hidrojen üretimi, elektrik talebini esnek bir şekilde karşılayarak yenilenebilir enerji kaynaklarının yayılmasına yardımcı olabilir [5]. Hidrojenin doğrudan doğalgaz iletim veya dağıtım ağlarına enjekte edilmesi, Power-to-Gas (P2G) teknolojilerinden biridir ve fazla enerjiyi, ağla uyumlu bir gaz haline dönüştürerek elektrik şebekesiyle gaz şebekesini birleştirir. Bu uygulamanın nihai kullanıcılar üzerinde iki önemli etkisi vardır. Birincisi, gaz halindeki hidrojenin enerji yoğunluğu doğalgazın yaklaşık üçte biri kadar olduğundan, iletilen gazın enerji miktarını azaltır. Bu nedenle, nihai kullanıcılar enerji ihtiyaçlarını karşılamak için daha fazla gaz tüketmek zorunda kalacaktır. İkincisi, hidrojen, güneş, rüzgar ve nükleer enerji gibi düşük ya da sıfır emisyonlu kaynaklardan veya emisyon kontrolü ve karbon yakalama teknolojileriyle gelişmiş fosil yakıtlardan üretilirse çevresel fayda sağlar [12]. Temiz enerji teknolojilerine geçiş, fosil yakıtlara olan bağımlılığı sona erdirerek, dünyadaki hızla artan enerji taleplerini çevresel etkileri en aza indirerek karşılamaya yardımcı olabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının payı giderek artsa da, bu kaynakların kesintili yapısı nedeniyle, eskiyen enerji şebekelerinde aşırı yüklenmeyi önlemek için uygun bir enerji depolama sistemine ihtiyaç vardır. Hidrojen depolama, potansiyel olarak etkili bir depolama çözümü olarak öne çıkmaktadır. Bu sırada, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ve suyun elektroliziyle üretilen yeşil hidrojen, fosil yakıtlara dayalı hidrojen üretiminin azaltılması için etkili bir yöntem olarak görülmektedir. (11) Hidrojen, karbon salmayan bir enerji taşıyıcısıdır ve yanması sırasında daha az kirletici madde açığa çıkarır. Bu sebeple, hidrojen, iklim değişikliği, hava kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel ve toplumsal sorunların çözülmesine katkı sağlayabilir [7].

Hidrojen ve doğalgaz içeren gaz karışımlarının yanmasıyla oluşan NO_x emisyonlarını tahmin etmek amacıyla bir araştırma yapılmıştır. Araştırmada, amonyak, doğalgaz, hidrojen ve kerosen karışımları kullanılmıştır. Hava-yakıt oranı, basınç ve sıcaklık gibi faktörlerin etkisini incelemek için, her bir yakıt için emisyonları

tahmin edebilecek basit bir doğrusal model geliştirilmiştir. Daha sonra, iki yakıt karışımının NO_x emisyonları, yapay sinir ağı (ANN) ile tahmin edilmiştir. Hidrojenin maksimum NO_x emisyonları 5000 ppm olarak hesaplanırken, hidrojen ve doğalgaz karışımının emisyonları ise 2000 ppm olarak bulunmuştur [10].

Bir fırın brülörünün yanma performansını incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Doğalgaz ve hidrojen karışımını kullanarak, bu karışım bir konut tipi ticari fırın brülöründe test edilmiştir. Hidrojen ve doğalgazın yer değiştirebilirliği değerlendirilmiştir. Yanma gürültüsü, brülör sıcaklığı, alev geri tepmesi sınırları, ateşleme performansı ve gaz emisyonları gibi farklı yanma özellikleri analiz edilmiştir. Hidrojen oranının brülör tüpündeki alev geri tepmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Doğalgazda %25 (hacimce) oranında hidrojen kullanıldığında alev geri tepmesi meydana gelebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, NO_x ve CO emisyonlarındaki değişiklikler ölçülmüştür [14].

Emisyonları incelemek amacıyla bir ocak brülörünün yanma performansı analiz edilmiştir. Karışımdaki hidrojen oranı %15'ten daha az olduğunda, ocak brülörünün yanma verimliliğinin belirgin bir şekilde değişmediği gözlemlenmiştir. Karışımdaki farklı hidrojen oranları için ateşleme süresi, alev tepmesi sınırları, alev özellikleri, pişirme verimliliği, brülör sıcaklığı ve gaz emisyonları incelenmiştir [15].

Bu çalışmada, doğalgaza eklenen hidrojenin yanma performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla deneysel bir düzenek oluşturulmuştur. Bu özgün çalışma, hidrojenin doğalgaza karıştırılmasının ve ev tipi set üstü ocaklarda yakılmasının emisyonlar üzerindeki etkilerini belirlemek için kapsamlı bir deney düzeneğinin tasarlanmasını ve üretilmesini kapsamaktadır.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada geliştirilen deneysel tesisat, hidrojen ve doğalgaz karışımının ev tipi ocaklarda güvenli ve verimli bir şekilde yakılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1: Deneysel düzeneği

Şekil 1'de verilen tesisat, gaz karışımının doğru oranlarda hazırlanması, güvenli bir şekilde taşınması ve kontrollü bir biçimde kullanılabilmesi için çeşitli teknik özelliklere sahip olup, aşağıda açıklanan bileşenlerden oluşmaktadır.

Deneysel tesisatında, hidrojen ve azot gazlarının güvenli bir şekilde temin edilmesi için Şekil 2'de verilen, yüksek basınçlı tüpler kullanılmaktadır. Hidrojen gazı, 130 bar basınçta bulunan hidrojen tüplerinden temin edilmekte ve çift kademe regülatör vasıtasıyla 300 mbar seviyesine düşürülmektedir. Bu sayede hidrojen, doğalgazla aynı basınç altında (300 mbar) karıştırılarak kullanılmak üzere karışım odasına iletilmektedir. Doğalgaz ise 300 mbar basınçta temin edilmektedir.



Şekil 2: Hidrojen ve azot tüpleri ve çift kademe basınç regülatörleri.

Hidrojen ve doğalgaz karışımının istenilen oranlarda ve doğru debilerle hazırlanabilmesi için her bir gaz hattında Şekil 3'te verilen kütleli debi kontrol cihazları (Mass Flow Controllers, MFC) kullanılmaktadır. Bu cihazlar, gazların debilerini sürekli olarak ölçmekte ve istenilen debide ayarlamaktadır. MFC cihazları, gazların doğru oranlarda karışmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, her bir MFC çıkışında Şekil 4'te verilen dijital basınç sensörleri yer almakta ve gazların basıncı sürekli izlenmektedir.



Şekil 3: Kütleli debi kontrol cihazı



Şekil 4: Dijital basınç sensörü

Sistemde, gazların güvenli bir şekilde taşınması için çeşitli güvenlik önlemleri alınmıştır. Gaz hatlarında, özellikle hidrojen ve doğalgaz hatlarında, Şekil 5'te görüldüğü üzere, normal kapalı pozisyonda olan selenoid vanalar kullanılmıştır. Bu vanalar, gaz kaçağı durumunda otomatik olarak kapanmaktadır. Ayrıca, sistemde yer alan gaz alarm sistemleri, herhangi bir gaz kaçağını anında tespit ederek vanaların kapanmasını sağlar ve azot hattı selenoid vanasını açarak sistemi azot doldurur ve güvenlik sağlanır. Azot tüpü, özellikle hidrojen ve doğalgaz hatlarında oluşabilecek tehlikeli durumlar için bir güvenlik bariyeri olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, herhangi bir gaz sızıntısı durumunda sistem otomatik olarak emniyetli hale gelir.



Şekil 5: Selenoid vanalar

Sistemde, olası yangın risklerini engellemek için alev tutucular kullanılmıştır. Şekil 6’da verilen alev tutucular, potansiyel yangın risklerini minimize etmek ve sistemin güvenliğini artırmak amacıyla kritik bir bileşen olarak yer alır.



Şekil 6: Alev tutucu

Emisyon ölçümleri, karbon monoksit (CO) karbon dioksin (CO_2) ve azot oksit (NO_x) gazlarını izlemek amacıyla yapılmaktadır. Emisyon seviyeleri, ocak üzerine yerleştirilen davlumbaz ve Şekil 7’de verilen Testo 350 baca gazı analiz cihazı ile ölçülmektedir. Testo 350 cihazı, yanma verimliliğini ve çevresel etkiyi izlemek

için doğru ve güvenilir ölçümler sağlar. Bu cihaz, emisyon verilerini yüksek doğrulukla toplar ve analiz eder, böylece hidrojen ve doğalgaz karışımının çevresel etkileri hakkında güvenilir veriler elde edilebilir.



Şekil 7: Testo 350 baca gazı analiz cihazı

SONUÇ

Bu çalışma, hidrojen ve doğalgaz karışımlarının kullanıldığı bir deney tesisatının kurulumu ve güvenli bir şekilde çalıştırılabilmesi için gerekli tüm bileşenleri ele almıştır. Fosil yakıtların çevresel etkilerinin azaltılması adına, hidrojenin potansiyelinin öne çıktığı bir yaklaşıma odaklanılmıştır. Yeşil enerji ve karbon ayak izi kavramları ışığında hidrojenin temiz enerji kaynağı olarak sunduğu faydalar ve neden hidrojen geçişinin gerekli olduğu detaylandırılmıştır. Çalışmanın amacı, hidrojen ve doğalgaz karışımının verimli ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesini sağlayacak bir deney tesisatının kurulmasıdır.

Deney tesisatının teknik özellikleri, kullanılan tüpler, regülatörler, sensörler ve güvenlik sistemleri gibi bileşenler ile ilgili kapsamlı bir açıklama yapılmıştır. Hidrojen ve azot tüpleri, doğalgaz tesisatının entegrasyonu, basınç düzenleme sistemleri ve karışım hazırlama mekanizmaları ile deneysel verilerin elde edilmesine olanak sağlayan bir altyapı kurulmuştur. Ayrıca, güvenlik önlemleri, gaz kaçağı algılama, alarm sistemleri ve alev tutucular gibi kritik unsurların sistemdeki rolü vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, bu deney tesisatı, hidrojenin evsel enerji kullanımı ve endüstriyel yakıt karışımları açısından potansiyelini araştırmak adına önemli bir adım teşkil etmektedir. Elde edilen veriler, hidrojenin temiz enerji kaynağı olarak kullanımını daha verimli hale getirecek sistemlerin tasarımına rehberlik edebilir. Bu çalışma, hidrojenin enerji kaynağı olma açısından gelecekteki rolüne dair önemli veriler sunmayı ve bu alandaki gelişmelerin önünü açmayı hedeflemektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 2022-44'nolu projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Abe, J., Popoola, A., Ajenifuja, E., & Popoola, O. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072–15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- [2] Acar, C., & Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production*, 218, 835–849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.046>
- [3] Cipriani, G., Di Dio, V., Genduso, F., La Cascia, D., Liga, R., Miceli, R., & Galluzzo, G. R. (2014). Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), 8482–8494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.174>
- [4] Crabtree, G. W., Dresselhaus, M. S., & Buchanan, M. V. (2004). The hydrogen economy. *Physics Today*, 57(12), 39–44. <https://doi.org/10.1063/1.1878333>
- [5] Erdener, B. C., Sergi, B., Guerra, O. J., Chueca, A. L., Pambour, K., Brancucci, C., & Hodge, B. (2022). A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(14), 5595–5617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.254>
- [6] Guerra, O. J., Zhang, J., Eichman, J., Denholm, P., Kurtz, J., & Hodge, B. (2020). The value of seasonal energy storage technologies for the integration of wind and solar power. *Energy & Environmental Science*, 13(7), 1909–1922. <https://doi.org/10.1039/d0ee00771d>
- [7] Karayel, G. K., Javani, N., & Dincer, I. (2022). Effective use of geothermal energy for hydrogen production: A comprehensive application. *Energy*, 249, 123597. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123597>
- [8] Melaina, M. W., Penev, M., & Zuboy, J. (2015). Hydrogen blending in natural gas pipelines. *Handbook of Clean Energy Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces205>
- [9] Ogden, J., Jaffe, A. M., Scheitrum, D., McDonald, Z., & Miller, M. (2018). Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature. *Energy Policy*, 115, 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.049>
- [10] Saleem, A., Karimi, I. A., & Farooq, S. (2022). Estimating NO_x emissions of useful two-fuel blends from literature data. *Fuel*, 316, 123213. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123213>
- [11] Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2018). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>
- [12] The future of hydrogen. (2019). In OECD eBooks. <https://doi.org/10.1787/1e0514c4-en>
- [13] Turner, J. A. (1999). A realizable renewable energy future. *Science*, 285(5428), 687–689. <https://doi.org/10.1126/science.285.5428.687>
- [14] Zhao, Y., McDonell, V., & Samuelsen, S. (2019a). Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12239–12253. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.100>
- [15] Zhao, Y., McDonell, V., & Samuelsen, S. (2019). Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(47), 26049–26062. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.011>



KÜTAHYA İLİNDEKİ BİR KONUTUN FARKLI SİSTEMLERLE ISITILMASININ EKONOMİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet Enes ERSÖZ¹

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE.

¹ORCID ID: 0000-0002-2057-9318

Halit ARAT²

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE.

²ORCID ID: 0000-0002-6634-2535

Özet

Dünya nüfusunun günden güne artması ve yaşanan teknolojik gelişmelerle birlikte ülkelerin toplam enerji tüketiminde son yıllarda artış gözlemlenmektedir. Ülkeler artan enerji talebini karşılayabilmek için konvansiyonel ve yenilenebilir enerji türleriyle yeni enerji kaynakları arayışına girerek enerji çeşitliliğini artırma politikası izlemeye başlamışlardır. Ülkemizin enerji üretiminde dışa bağımlılığı göz önüne alındığında, enerji çeşitliliğinin artırılmasının verimli sistemlerin kullanılmasının ülkemiz ekonomisi açısından son derece önemli olduğu görülmektedir. Bu çalışmada Kütahya ili için bir konutun elektrik, doğalgaz ve ısı pompası ile ısıtılmasında kullanılacak sistemlerin termodinamik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Elektrikli ısıtıcılarla genellikle mahal ısıtması kullanılan bir yöntem olup güvenli bir şekilde konutlarda da uygulanmaktadır. Doğalgazın yaygınlaşmasıyla birlikte ülkemizde ısıtma sistemlerinin büyük bir çoğunluğu doğalgaz ile çalışmaktadır. Bireysel ısıtmada kombi tercih edilirken merkezi ısıtma sistemlerinde kazan kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda kullanımı yaygınlaşan ısı pompası sistemleri farklı hava koşullarının olduğu bölgelerde güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Isı pompası düşük sıcaklığa sahip ortamdan yüksek sıcaklığa sahip ortama ısı taşıyan ve elektrik enerjisiyle çalıştırılan bir sistemdir. Öncelikle konutun ısı kaybı TS 825'e göre hesaplanmıştır. Bu ısı kaybını karşılamak ve ortamı istenilen sıcaklıkta tutmak için üç farklı enerji kaynağı ile çalışan sistemler için gerekli ekipmanlar belirlenerek ilk yatırım maliyetleri ortaya çıkarılmıştır. Bu miktara işçilik bedelleri de eklenerek toplam yatırım maliyeti hesaplanmıştır. Sistemlerin işletme maliyetleri kullanılacak elektrik ve doğalgaz miktarları belirlenerek yıllık olarak bulunmuştur. Ayrıca, bakım-onarım maliyetleri de hesaba katılarak toplam işletme maliyeti her üç sistem için hesaplanmıştır. Önerilen sistemlerin yatırım geri dönüşüm hesabı başabaş analizi kullanılarak yapılmıştır. Isıtma sistemi için önerilen üç sistem; ilk yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve geri dönüş süresi değerleri için kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Başabaş Noktası, Doğalgaz, Enerji Verimliliği, Isı Pompası, Kombi.

ECONOMICAL ASSESMENT OF HEATING A HOUSE WITH DIFFERENT SYSTEMS IN KÜTAHYA

Abstract

With the increasing world population and technological developments, an increase has been observed in the total energy consumption of countries in recent years. In order to meet the increasing energy demand, the countries have started to follow a policy of increasing energy diversity by searching for new energy sources with conventional and renewable energy types. According to our country's external dependency in energy production, it is seen that increasing energy diversity and using efficient systems are extremely important for our country's economy. In this study, thermodynamic and economical analysis of the systems to be used in heating a house with electricity, natural gas and heat pumps was performed for Kütahya. Electric heaters are generally used for space heating and are also safely applied in the houses. With the widespread use of natural gas, the vast majority of heating systems in our country operate with natural gas. While combi boilers are preferred for individual heating, the boilers are used in central heating systems. Heat pump systems, which have become widespread in recent years, are used safely in regions with different weather conditions. A heat

pump is a system that carries heat from a low-temperature environment to a high-temperature environment and is operated with electrical energy. First of all, the heat loss of the house was calculated according to TS 825. In order to meet this heat loss and keep the environment at the desired temperature, the necessary equipment for systems operating with three different energy sources was determined and the initial investment costs were determined. The labor costs were added to this amount and the total investment cost was calculated. The operating costs of the systems were found annually by determining the amounts of electricity and natural gas to be used. In addition, the total operating cost was calculated for all three systems by taking into account the maintenance and repair costs. The investment return calculation of the proposed systems was made using break-even analysis. The three systems proposed for the heating system were compared for the initial investment cost, operating cost and payback period values.

Keywords: Break-Even Point, Natural Gas, Energy Efficiency, Heat Pump, Combi Boiler.

GİRİŞ

Günden güne artan dünya nüfusu ve teknolojiye ilerlemeler ülkelerin enerji tüketimini artırmaktadır. Geleneksel enerji yakıtlarının azalması, fosil kaynaklara ulaşımın zorluğu ve konvansiyonel enerji yakıtlarının çevreye olumsuz etkileri dolayısıyla ülkeler enerjide yeni arayışlara girmek zorunda kalmışlardır. Mevcut sistemlerin verimli hale getirilmesi ve enerji çeşitliliğinin artırılması ülkemiz enerji politikasına da yön vermektedir.

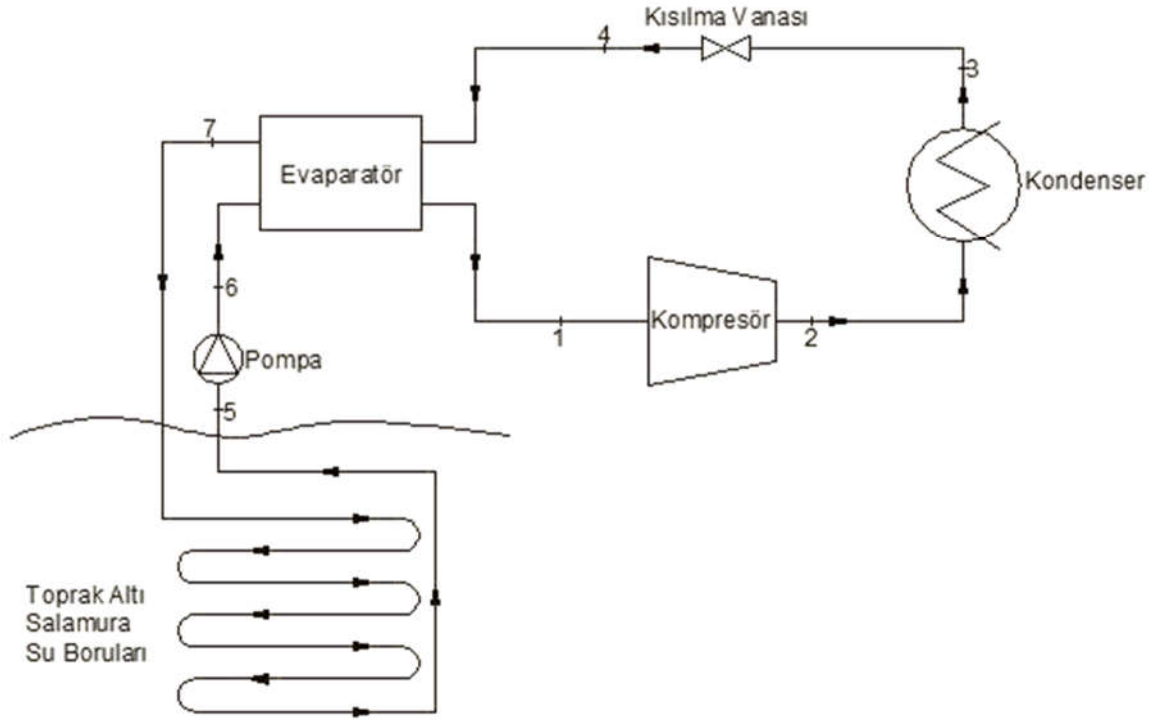
Ülkemizde ısıtma sistemlerinin büyük bir kısmında fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Son zamanlarda ortaya çıkan gelişmelerle çevreye zararı olan fosil yakıtlarının kullanımına son vererek daha verimli ve temiz alternatif enerjilerin kullanılması ülke politikası olarak benimsenen bir durum haline gelmiştir.

Isı pompaları düşük sıcaklığa sahip ortamdaki yüksek sıcaklığa sahip ortama ısı taşımakta ve elektrik enerjisiyle çalıştırılmaktadır [1]. Ülkemizde ısı pompaları yaygın olarak kullanılmamakta birlikte literatürde bu konuda yapılan araştırmalar yaygın olup son yıllarda yer altı ve su kaynaklarında uygulamaları giderek artmaktadır [2-3]. Yıldırım vd., İzmir Teknoloji Üniversitesi kampüsünün ısıtılması için ısı pompası sistemini ve kalorifer kazanlı sistemi modelleyerek karşılaştırmışlar ve ısı pompası sisteminin yatırım maliyetinin çok yüksek olmasına karşın düşük bir işletme maliyetine sahip olduğunu belirlemişlerdir [4].

Bu çalışmada Kütahya ili için bir konutun elektrik, doğalgaz ve ısı pompası ile ısıtılmasında kullanılacak sistemlerin termodinamik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Elektrikli ısıtıcılarla genellikle mahal ısıtması kullanılan bir yöntem olup güvenli bir şekilde konutlarda da uygulanmaktadır. Doğalgazın yaygınlaşmasıyla birlikte ülkemizde ısıtma sistemlerinin büyük bir çoğunluğu doğalgaz ile çalışmaktadır. Bireysel ısıtmada kombi tercih edilirken merkezi ısıtma sistemlerinde kazan kullanılmaktadır.

MATERYAL VE METOD

Kütahya ili için bir konutun elektrik, doğalgaz ve ısı pompası ile ısıtılmasında kullanılacak sistemlerin termodinamik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Öncelikle konutun ısı kaybı TS 825'e göre ısı kaybı hesabı, konutun mimari projesi ve bulunduğu konumu göz önüne alınıp ısı gereksinimi hesaplama çizelgesi yardımıyla 11,578 kW olarak hesaplanmıştır. Kütahya ili için ısıtma sezonu Ekim-Nisan ayları olarak 7 aylık bir zaman dilimi esas alınmıştır. Kütahya ili için kış mevsiminde dış ortam sıcaklığı -2°C ve toprak sıcaklığı 6°C olarak kabul edilmiştir. Isı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak R-134a kullanılmıştır. Toprak altına gömülen borular içindeki ısıyı taşıyan akışkan kütleli olarak %26 propilen glikol içeren salamura suyudur. Konutun ısıtılması için kullanılacak toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin tesisat şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin tesisat şeması

Bu çalışmada ısı pompası sisteminin kapasite hesapları ve termodinamik analizleri EES programında yapılmıştır. EES (Engineering Equation Solver) nümerik olarak binlerce lineer olmayan cebirsel ve diferansiyel denklem çiftlerini çözebilen bir denklem çözücü programdır. EES programının büyük bir özelliği, yüzlerce madde için yüksek doğruluğa sahip termodinamik ve transport özellikleri programın içinde barındırarak denklem çözebilme kabiliyetidir [5].

Isı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak R-134a kullanılmıştır. R-134a akışkanına ait özellikler EES programından alınarak termodinamik özellik tablolarından kontrol edilmiştir.

Tablo 1. Soğutucu akışkanın sistem elemanlarına giriş-çıkış noktalarının termodinamik değerleri.

1 Noktası	2 Noktası	3 Noktası	4 Noktası
$T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 50,34 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_3 = 39,96 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_4 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
$P_1 = 293 \text{ kPa}$	$P_2 = 1016 \text{ kPa}$	$P_3 = 1016 \text{ kPa}$	$P_4 = 293 \text{ kPa}$
$h_1 = 250,5 \text{ kJ/kg}$	$h_2 = 282,8 \text{ kJ/kg}$	$h_3 = 108,2 \text{ kJ/kg}$	$h_4 = 108,2 \text{ kJ/kg}$
$s_1 = 0,9314 \text{ kJ/kgK}$	$s_2 = 0,9516 \text{ kJ/kgK}$	$s_3 = 0,3947 \text{ kJ/kgK}$	$s_4 = 0,4107 \text{ kJ/kgK}$

1. Sistemde dolaşan soğutucu akışkan (R-134a) debisi:

$$\dot{m}_{R-134a} = \frac{\dot{Q}_{kondenser}}{q_{kondenser}} = \frac{11,578 \text{ kW}}{174,6 \text{ kJ/kg}} = 0,066 \text{ kg/s}$$

2. Kompresör kapasitesi:

$$\dot{W}_{kompresör} = \dot{m}_{R-134a}(h_2 - h_1) = 2,144 \text{ kW}$$

3. Evaporatör kapasitesi:

$$\dot{Q}_{evaporatör} = \dot{m}_{R-134a}(h_1 - h_4) = 9,434 \text{ kW}$$

Toprak eşanjöründe borular 1,5 m derinliğe yatay gömülecektir. Kütahya ili için kış durumunda toprak sıcaklığı 6°C olarak kabul edilmiştir [6]. Toprak altına gömülecek borular, kondenser, kompresör, evaporatör

ve kısılma vanasını içeren 11,578 kW kapasiteli ısı pompası sistemi toplam 203611,912 TL'dir. 7 aylık ısıtma sezonu için ısı pompası sisteminin yıllık elektrik tüketimi ise 13507,20 kWh olup Kütahya için maliyeti 27986,92 TL'dir.

Odaları elektrikle ısıtmak için kullanılacak fanlı ısıtıcıları ilk yatırım maliyeti 8149,50 TL'dir. Gerekli olan 11,578 kW ısı kaybını 7 aylık ısıtma sezonu için yıllık elektrik tüketimi ise 58353,12 kWh olup Kütahya için maliyeti 120907,66 TL'dir.

11,578 kW'lık ısı kaybını doğalgaz ile çalışan kombi ile karşılanması durumunda; doğalgaz tesisatı, kombi, radyatör ve borularla birlikte konut için kombi ilk yatırım maliyeti 92640 TL'dir. Kütahya ilinde doğalgaz dağıtımında yetkili firma olan Çinigaz'ın satmış olduğu doğalgazın satış fiyatı $13,941188 \text{ TL/m}^3 = 1,31026203 \text{ TL/kWh}$ tir [7]. Isıtma sezonunda toplam ısı kaybı 58353,12 kWh olarak gerçekleşecektir bunun için yanma verimi %90 olan doğalgaz kombisinde yakılması gereken doğalgazın toplam maliyeti 84953,20 TL olarak hesaplanmıştır.

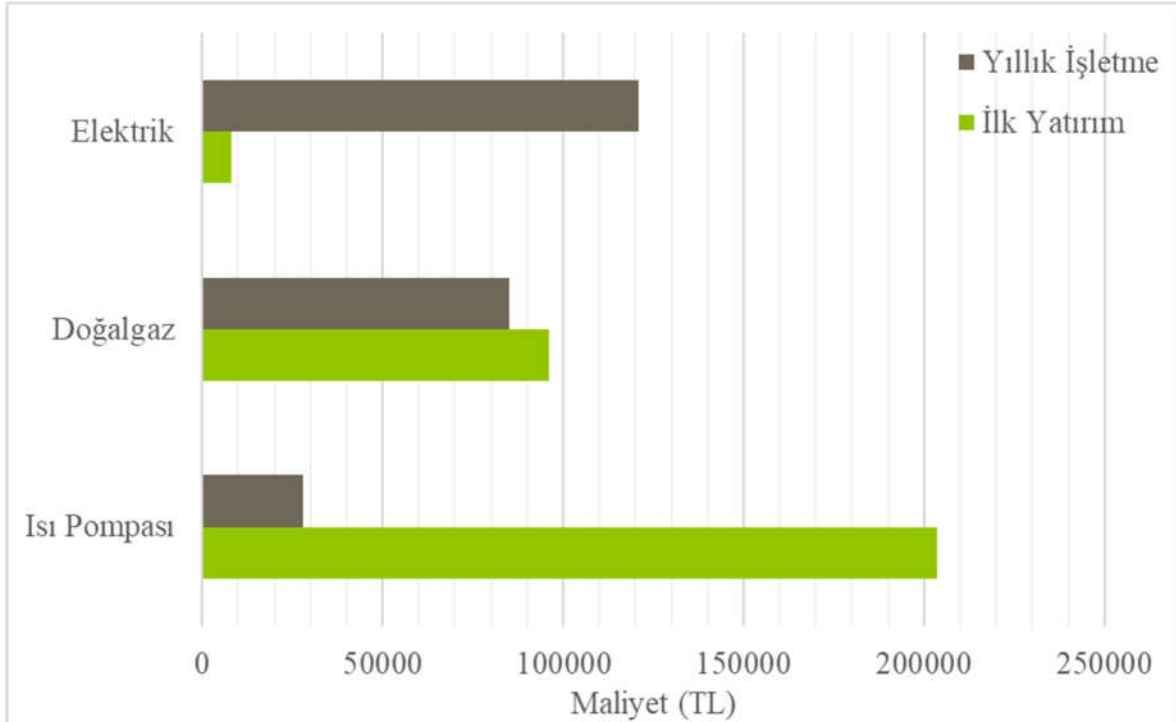
Bu çalışmada, yatırım getirisi başabaş nokta analizi kullanılarak belirlenmiştir. Bir projenin kümülatif nakit akışı genellikle negatif başlar ve kademeli olarak pozitif değerlere yükselir. Sıfıra ulaştığında projenin başabaş noktasını belirtir [8].

$$\text{Yatırımın geri dönüşümü} = \frac{\text{Toplam maliyet}}{\text{Yıllık toplam gelir}} \quad (1)$$

Yatırımın ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı getirinin bugünkü değerinden yatırımın maliyetlerinin bugünkü değerinin çıkarılmasıyla kalan miktardır. Başka bir deyişle, Net Bugünkü Değer (NBD), yatırımın nakit giriş ve çıkışlarının bugünkü değerlerinin toplamıdır. Eğer NBD pozitif ise proje kabul edilebilirdir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

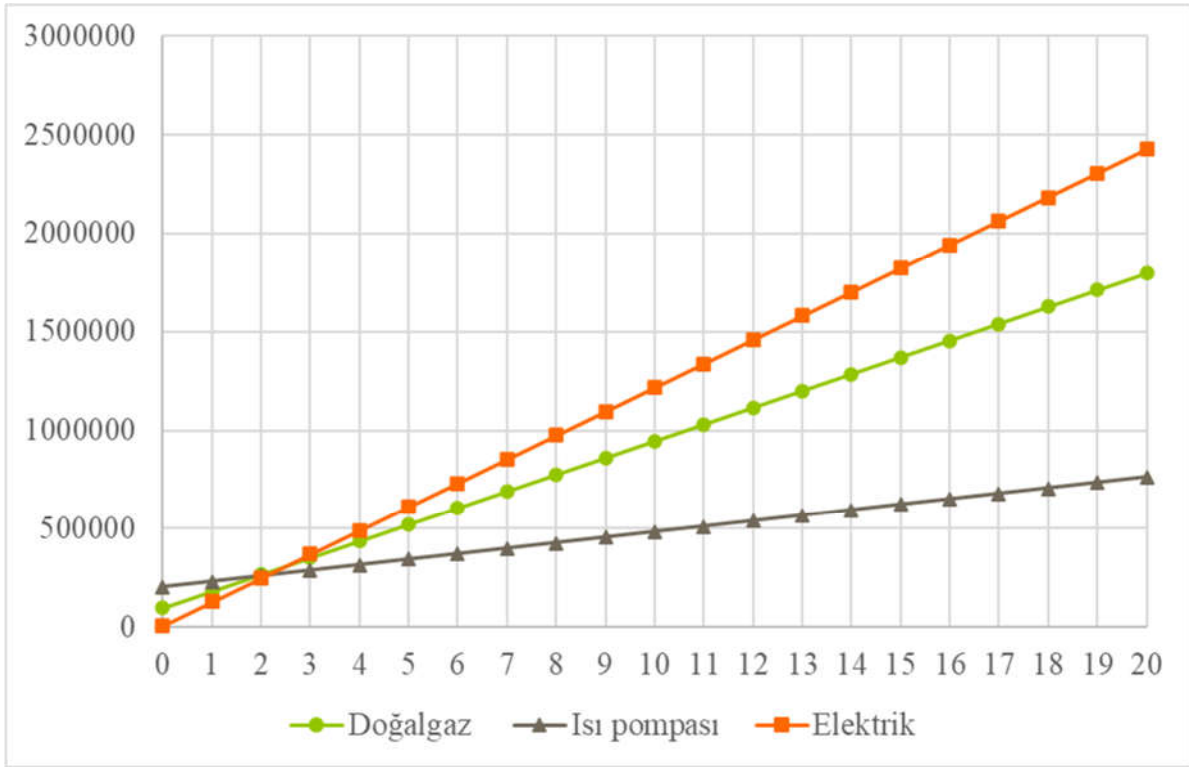
Bu çalışmada Kütahya ilinde bulunan konutun ısıtılmasında elektrik, doğalgaz ve toprak kaynaklı ısı pompasının kullanılması durumunda termodinamik ve maliyet analizi yapılmıştır. Konutun ısı kaybı 11,578 kW olarak hesaplanmış ve bu ısı kaybını karşılamak için kullanılacak ısı pompası, doğalgazlı kombi ve elektrikli ısıtıcı sistemlerinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır. Farklı ısıtma sistemlerinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin değişimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı ısıtma sistemlerinin ilk yatırım ve yıllık işletme maliyetleri.

Şekil 2 incelendiğinde, en yüksek ilk yatırım maliyeti 203611,912 TL ile ısı pompası sisteminde olurken en düşük ise 8149,50 TL ile elektrikli ısıtma sistemi için hesaplanmıştır. Bununla birlikte, en yüksek yıllık işletme maliyeti 120907,66 TL ile elektrikli ısıtma sisteminde iken en düşük değer ısı pompası sistemi için 27986,92 TL olarak bulunmuştur. Öte yandan, doğalgazlı ısıtma sisteminin ilk yatırım ve yıllık işletme maliyetleri sırasıyla 92640 TL ve 84953,20 TL olarak hesaplanmıştır.

En pahalı işletme maliyetine sahip elektrikli ısıtma sistemine göre doğalgazlı ve ısı pompalı sistemlerin NBD'leri hesaplanmıştır. 20 yıllık kullanım ömrü için ısı pompalı sistemin NBD'si 778492,49 TL olarak hesaplanırken doğalgazlı sistemin NBD'si ise -891316,89 TL bulunmuştur. NBD'si pozitif olan ısı pompalı sistem kabul edilebilir bir yatırım değerine sahiptir. Farklı ısıtma sistemleri için yıllara göre toplam maliyetin yıllara göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Farklı ısıtma sistemleri için yıllara göre toplam maliyetin yıllara göre değişimi.

Şekil 3 incelendiğinde, her ne kadar ilk yatırım maliyeti en yüksek sistem ısı pompalı ısıtma sistemi olsa da işletme maliyetindeki avantaj sebebiyle en ekonomik ısıtma sisteminin ısı pompalı ısıtma sistemi olduğu görülmüştür.

SONUÇ

Son zamanlarda artan enerji talebini karşılamak için enerjinin çeşitlendirilmesi ve verimli kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Fosil kaynaklı yakıt fiyatlarının günden güne artması ve buna bağlı artan elektrik fiyatları sebebiyle daha düşük maliyetli ısıtma sistemlerinin kullanılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada Kütahya ili için bir konutun elektrik, doğalgaz ve ısı pompası ile ısıtılmasında kullanılacak sistemlerin termodinamik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucu en yüksek ilk yatırım maliyeti 203611,912 TL ile ısı pompası sisteminde olurken en düşük ise 8149,50 TL ile elektrikli ısıtma sistemi için hesaplanmıştır. Bununla birlikte, en yüksek yıllık işletme maliyeti 120907,66 TL ile elektrikli ısıtma sisteminde iken en düşük değer ısı pompası sistemi için 27986,92 TL olarak bulunmuştur. Öte yandan, doğalgazlı ısıtma sisteminin ilk yatırım ve yıllık işletme maliyetleri sırasıyla 92640 TL ve 84953,20 TL olarak hesaplanmıştır.

İlk yatırım maliyeti en yüksek sistem ısı pompalı ısıtma sistemi olsa da işletme maliyetindeki avantaj sebebiyle en ekonomik ısıtma sisteminin ısı pompalı ısıtma sistemi olduğu görülmüştür. Isı pompası sistemi Avrupa’da yaygın bir şekilde kullanılmasına karşın yüksek ilk kurulum maliyetleri sebebiyle ülkemizde pek yaygınlaşmamıştır. Kütahya ili için toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin verimliliği ve ekonomikliği araştırılmış olup bir uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu ısı pompası sisteminin etkinlik değeri 5,4 olarak bulunmuştur. Bu yönüyle sistem enerjinin verimli kullanılmasına örnek teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Kaynaklı, Ö., Çoşkun, S., ve Yamankaradeniz, N. Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları, Dora Yayıncılık, Bursa, 2013.
- [2] Willem, H., Lin, Y., & Lekov, A. (2017). Review of energy efficiency and system performance of residential heat pump water heaters. *Energy and Buildings*, 143, 191-201.
- [3] Poppi, S., Sommerfeldt, N., Bales, C., Madani, H., & Lundqvist, P. (2018). Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 22-32.
- [4] Yıldırım, N., Toksoy, M. ve Gökçen, G., (2006), District heating system design for a university campus, *Energy and Buildings* 38, s.1111–1119.
- [5] Engineering Equations Solver (EES) Software, <https://fchartsoftware.com/ees/index.php/> Erişim Tarihi: Kasım 2024.
- [6] Özgür, A., Isı Pompaları Ders Notları, Kütahya, 2014.
- [7] Konut Doğalgaz Satış Fiyatı, Çinigaz, <http://www.cinigaz.com/tarifeler.html#gazSatisFiyat> Erişim Tarihi: Kasım 2024.
- [8] Korkmaz, B., & Hacısalihoğlu, S. Fotovoltaik ve Biyogaz Enerji Sistemlerinin Enerji Ve Çevresel Potansiyellerinin İncelenmesi: Süt Sığırcı Çiftliği Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 29(1), 245-262

**TEMİZ ENERJİ İHTİYACINI KARŞILAMADA HİDROJENİN ÖNEMİ****Sertaç HOPOĞLU**

Doç. Dr., İskenderun Teknik Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve İşletmecilik Bölümü, Hatay, Türkiye

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9541-2352>

Gözde GÖKGÖZ ÇORUK

Araştırma Görevlisi, İskenderun Teknik Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve İşletmecilik Bölümü, Hatay, Türkiye

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9258-0027>

Özet

Enerji kavramı varoluşumuzdan itibaren yaşamlarımızda önemli bir yere sahip kavramdır. Sanayi devrimleri sonrasında üretim süreçlerinde en önemli girdi kalemlerinden biri olarak yerini almıştır. Günümüzde tüm faaliyetlerde kullanılan birincil enerji yenilenemez enerji kaynakları başlığı altında yer alan enerji türlerinden elde edilmektedir. 1970'li yıllardan itibaren yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımının doğaya çeşitli zararlar verdiğine yönelik çalışmalar yürütülmeye başlamıştır. İklim değişikliğinin yanı sıra yenilenemez enerji kaynaklarının sonlu olmaları ve adaletsiz dağılmış olması nedeniyle enerji arz güvenliği sağlanamaması da enerji kaynaklarını çeşitlendirmek ve alternatif enerji kaynaklarına yönelim adına tetikleyici sebepler olmuşlardır. Küresel düzeyde güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, nükleer enerji gibi alternatif enerji kaynakları ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedirler. Ancak yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ve rüzgar enerjisi sürekli kullanılabilir olmamaları nedeniyle tam kapasite kullanılmamaktadır. Son yıllarda ise hidrojen enerjisi yenilenemez enerji kaynaklarına karşı önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak çalışmalara konu olmaya başlamıştır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin birçoğu 2017 yılından itibaren hidrojen stratejilerini tanıtmışlardır. Karbon salınımlarının yaklaşık olarak üçte birine yol açan taşımacılık sektörü hidrojen enerjisinin kullanımının artırılması adına çalışma yürütülen sektörlerin başında gelmektedir. Hidrojen enerjisinin önündeki en büyük engel olarak maliyetler gösterilmektedir ancak teknolojilerinin giderek iyileştirilmesi ile birlikte maliyetlerde azalan bir gidişat izlenmekte ve bu durum umut vadetmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen enerjisi, iklim krizi, fosil yakıtlar, temiz enerji

THE IMPORTANCE OF HYDROGEN IN MEETING CLEAN ENERGY NEEDS**Abstract**

The concept of energy has an important place in our lives since our existence. It has taken its place as one of the most important input items in production processes after the industrial revolutions. Today, the primary energy used in all activities is obtained from energy types under the heading of non-renewable energy sources. Since the 1970s, studies have started to be carried out on the fact that the use of non-renewable energy resources causes various damages to nature. In addition to climate change, the inability to ensure energy supply security due to the finite and unfair distribution of non-renewable energy resources has been a trigger for diversifying energy sources and turning to alternative energy sources. At the global level, studies on alternative energy sources such as solar energy, wind energy and nuclear energy are being carried out. However, solar and wind energy, which are renewable energy sources, are not used at full capacity because they are not continuously available. In recent years, hydrogen energy has started to be the subject of studies as an important alternative energy source against non-renewable energy sources, and many developed and developing countries have introduced hydrogen strategies since 2017. The transportation sector, which causes approximately one-third of carbon emissions, is one of the leading sectors where studies are carried out to increase the use of hydrogen

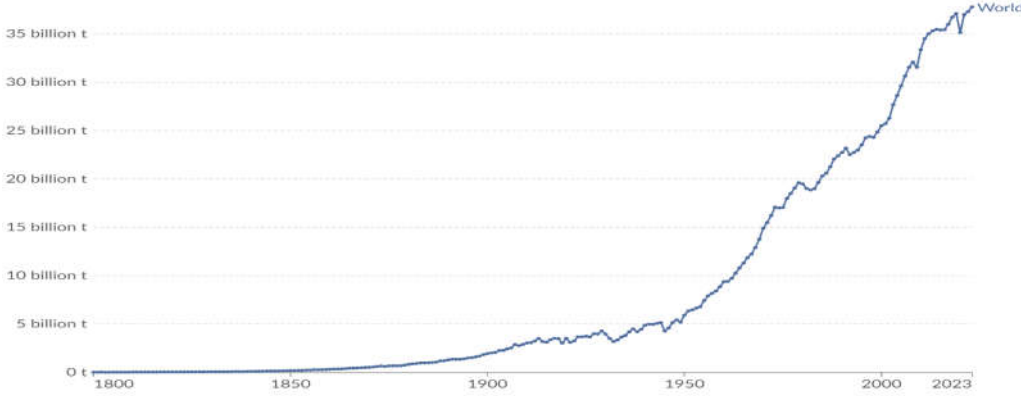
energy. The biggest obstacle to hydrogen energy is costs, but with the gradual improvement of technologies, costs are decreasing and this situation is promising.

Keywords: Hydrogen energy, climate crisis, fossil fuels, clean energy

GİRİŞ

Yaşamlarımızda daimi temel ihtiyaç olarak yer alan enerji kullanımını sanayi devrimi ile birlikte yerini sağlamlaştırmış ve en önemli girdi kalemlerinden biri haline gelmiştir. Aktif olarak kullanılan enerji elde edildiği kaynağa bağlı olarak iki farklı başlık altında yer almaktadır; yenilenebilir enerji ve yenilenemez enerji. Sanayi devrimi öncesini de kapsayarak günümüze kadar gelen süreçte kullanılan enerji türü ise fosil yakıtlar aracılığı ile elde edilen yenilenemez enerjidir. 1700'lü yıllar sonrasına denk gelen sanayi devrimi döneminde üretim süreçlerinin tüm aşamalarında, tedarik zincirlerinde, taşımacılıkta ve bir çok alanda aktif olarak kullanılan enerji kaynaklarının ikamesi bulunmamaktadır. Sanayi Devrimi ile birlikte fabrikalaşma başlamış, üretim seviyeleri kümülatif biçimde artmıştır. Üretim artışı beraberinde fosil yakıtlardan elde edilen enerji kullanım oranlarında da artış yaşanmasına yol açmıştır. 1800 yılında 5653 TWh olan küresel birincil enerji tüketimi 2023 yılında 183.230 TWh olarak gerçekleşmiştir (Ritchie, Rosado, & Roser, 2024). Aradan geçen iki yüzyılda enerji tüketimi 32 kat artış göstermiştir.

Şekil 1: Yıllık CO2 emisyon oranları (fosil yakıt ve sanayi kaynaklı)



Kaynak: (Ritchie & Roser, CO₂ Emissions, 2024)

Yenilenemez enerji kaynakları kullanımları esnasında karbon salınımı ortaya çıkmaktadır. Tetiklenen bu enerji tüketimi ile birlikte karbon salınımı fazlasıyla artış göstererek çevre üzerinde tahribata yol açmıştır. Sınır aşılardan önce doğanın kendini yenileme hızı verilen zararı tolere edebilirken tüm bu durumlar neticesinde verilen zarar doğanın kendini yenileme hızını geçmiştir. Gerçekleşen zararın medya üzerinden etki bulması ise 1970'li yıllar itibarıyla başlamıştır. Şekil 1'de de görüleceği üzere artan CO2 salınım oranları ivmelenecek devam etmiştir. Tahribat beraberinde aşırı doğa olaylarını, çeşitli hayvan, bitki türlerinin yok olmasını, iklim göçlerinin ortaya çıkmasını tetikleyerek, genel anlamda bireysel ve sosyal kayıplara yol açmıştır. Ortaya çıkan olumsuzlukları gözlemleyen ülkeler CO2 emisyonlarını sınırlamak adına küresel düzeyde çalışmalar gerçekleştirmeye ve politikalar oluşturmaya başlamışlardır. Küresel düzeyde konferanslar düzenlenerek anlaşmalar yapılmıştır.

Yenilenemez enerji kaynakları aynı zamanda dünya geneline adil bir biçimde dağılım göstermemektedir. Dolayısıyla fosil yakıt kaynaklarını ellerinde bulduran ülkeler ve sahip olmayan ülkeler arasında ticarete konu olmaktadır. Ancak ülkeler arasında yaşanan herhangi bir siyasi anlaşmazlık gerçekleşmesi durumunda kaynağı elinde bulduran ülke bu durumu koz olarak kullanabilmekte, enerji arz güvenliği için tehdit unsuru oluşturmaktadır. Örneklendirmek gerekirse 1970'li yıllarda Ortadoğu'da gerçekleşen savaşlar sırasında petrol ihraç eden Arap ülkeleri petrol fiyatlarını yükselterek ve miktar kısıtlama yoluyla diğer ülkelere göz dağı vermeye çalışmışlardır. Son dönemde ise Rusya-Ukrayna savaşı sırasında Rusya'nın Avrupa ülkelerine

doğalgaz akımını kısıtlaması örnek verilebilir. Yenilenemez enerji kaynaklarının en büyük dezavantajı ise arzlarının sınırlı olmasıdır; bir süre sonra azalarak tükenenlerdir.

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

İklim krizi, enerji arz güvenliği ve fosil yakıtların sonlu olmaları gibi nedenler ülkeleri alternatif enerji kaynakları için arayışa yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları olan hidroelektrik, rüzgar, güneş dalga enerjisi vs. günümüzde ülkeler tarafından tercih edilen enerji türleridir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük sorunu üretimlerinin dalgalı bir seyir izlemesi ve depolanamamasıdır. Bu soruna çözüm olarak hidrojen enerjisi son zamanlarda öne çıkmaktadır. Hidrojen evrende en bol bulunan elementtir, ancak doğada doğal olarak bulunmaz diğer elementler ile birleşmiş haldedir (Veziroğlu & Momirlan, 2005). Hidrojen enerjisi bir enerji kaynağı değil enerji taşıyıcısıdır. Elde edildiği enerji kaynağına bağlı olarak farklı renklerle isimlendirilmektedir. Gri hidrojen, fosil yakıtlar aracılığıyla elde edilmektedir. Mavi hidrojen benzer şekilde fosil yakıtlar kullanılarak elde edilir ancak üretiminde karbon yakalama ve depolama yöntemleri kullanılmaktadır. Yeşil hidrojen ise elektroliz yöntemi kullanılarak yenilenebilir enerji kaynakları ile elde edilmektedir.

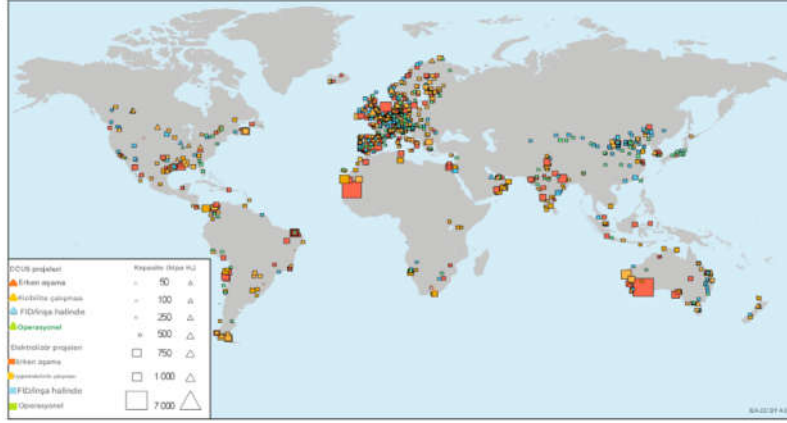
Tablo 1: Çevresel zarar ve çevresel uygunluk faktörleri

Enerji Sistemi/ Yakıt	Çevresel Zarar (ABD \$/GJ)	Çevresel Uygunluk Faktörü
Fosil Yakıt	8.42	
Kömür	9.82	0.047
Benzin	8.47	0.054
Doğal Gaz	5.60	0.082
Kömür/Sentetik	10.47	
Sentetik Gaz	13.77	0.033
Sentetik Doğal Gaz	9.13	0.050
Güneş- Hidrojen	0.46	
Hidrojen	0.46	1.000

Kaynak: (Kükreler, 2007)

Hidrojen enerjisi bilinen yakıt türleri içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. 1 kg'lık hidrojenin taşıdığı enerji miktarı 2.1 kg doğalgaz veya 2.8 kg petrolün taşıdığı enerji miktarına denk geldiği bilinmektedir (Tugal, 2014). Enerji/hacim açısından bakıldığında ise en ağır yakıt olarak bilinmektedir. Nejat Veziroğlu'nun 2023 yılında düzenlenen 21. yüzyılın enerjisi; hidrojen enerji sistemi konferansı açılış konuşmasının girişinde de belirttiği gibi hidrojenin ısı enerjisi elde edilirken %20, İçten yanmalı motorlarda %18, yakıt pili ve elektrik motorlarında ise %50 daha randımanlı olduğu açıklanmıştır. Dolayısıyla enerjiye gereksinin duyan faaliyetlerde aynı işi yapabilmek için diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha az miktarda hidrojene gereksinim duyulmaktadır. Çevreye verdiği zararlar açısından fosil yakıtlar ile karşılaştırma yapıldığında yeşil hidrojenin çevreye uyumluluk oranının en üst seviyede olduğu görülmektedir. Çevresel zararın dolar cinsinden karşılığına bakıldığında ise benzer şekilde yeşil hidrojen en az çevresel maliyete sahiptir. Küresel ısınmanın giderek arttığı bir süreç içerisindeyken ve Paris Anlaşması ile sıcaklık artışının 2 dereceyi geçmemesi, 1,5 derece seviyelerinde kalması hedeflenirken yeşil hidrojenin enerji türleri içerisinde uygunluk açısından ilk sıralarda yer almaktadır.

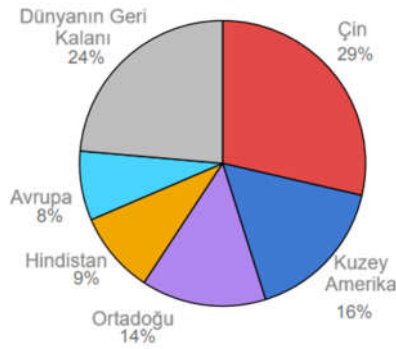
Harita 1: Açıklanan düşük emisyonlu hidrojen üretim projelerinin haritası, 2024



Kaynak: (International Energy Agency, 2024)

Alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir opsiyon olarak gösterilen hidrojen enerjisi için 2023 yılı itibariyle toplamda 60 ülke stratejisini ilan etmiştir. Bu ülkeler küresel enerji kaynaklı CO2 emisyonlarının yaklaşık olarak %85'ini oluşturmaktadır. Oluşturulan stratejiler beraberinde hidrojen enerjisi projelerinde artış getirmiştir. 2024 yılı Ekim ayında uluslararası enerji ajansı tarafından yayınlanan hidrojen görünümü raporunda yer alan haritaya göre hidrojen enerjisi projeleri belirli bölgelerde görece daha yoğunlaşma göstermekle birlikte Avrupa bölgesi ilk sırada yer almaktadır. Operasyonel kapasite Çin, Avrupa ve ABD'de yoğunlaşırken, Latin Amerika, Afrika ve Hindistan'da ise son dönemde fazla sayıda proje duyurulmuştur. Taahhüt edilen projeler içinde ise Çin ilk sırada yer almaktadır (International Energy Agency, 2024). Çin CO2 salınım oranlarında ilk sırada yer alırken aynı zamanda yenilenebilir enerji yatırımlarında da ilk sıradadır. Elektroliz projeleri 2022 yılı ile karşılaştırıldığında 2023 yılında %350 oranında artış göstermiştir (International Energy Agency, 2024). Kurulu elektroliz kapasitesi ise 2023 yılı sonunda 1,4 GW'a yükselerek 2022'nin yaklaşık olarak iki katına çıkmıştır.

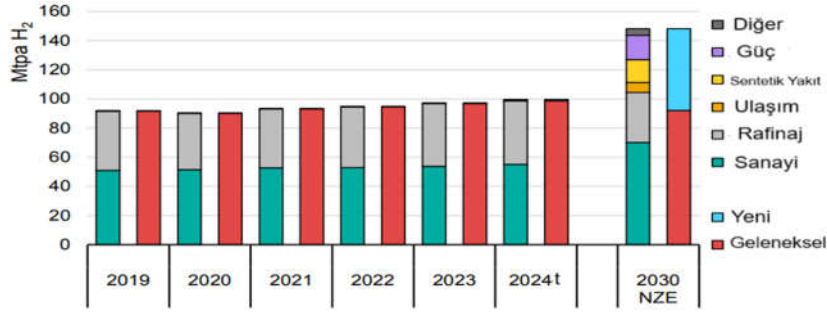
Şekil 2: Bölgelere göre hidrojen kullanımı 2023



Kaynak: (International Energy Agency, 2024)

2023 yılı hidrojen kullanım oranları dikkate alındığında %29'luk bir oranla Çin birinci olurken, sırasıyla Kuzey Amerika, Ortadoğu, Hindistan ve Avrupa Çin'i izlemektedir. Kullanılan hidrojen çoğunlukla yenilenebilir enerjiden elde edilmektedir. Ancak düşük emisyonlu hidrojen kullanımının 2030-2050 yılları arasında artması hedeflenmektedir.

Şekil 3: Sektöre göre hidrojen kullanımı (2019-2030)



Kaynak: (International Energy Agency, 2024)

Hidrojen enerjisinin son 5 yıl içerisinde kullanıldığı alanlar incelendiğine rafineri ve sanayi ön sırada yer almaktadır. Kullanılan hidrojen ise geleneksel yöntemler aracılığı ile elde edilmektedir. Rapora göre 2030 yılı net sıfır emisyon hedefine göre aksiyon alındığı taktirde kullanım alanları çeşitlilik göstermesi aynı zaman da yeni yöntemler aracılığıyla gerçekleşen üretimin de oranının önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir.

Tablo 2: Yeşil hidrojen kullanımının önündeki başlıca engeller

TEKNOLOJİK	EKONOMİK	KURUMSAL	SOSYAL
Belirli hidrojen teknolojilerinin henüz olgunlaşmamış olması	Yüksek ve belirsiz üretim maliyeti	Düzenleyici çerçeve yeşil hidrojen sektörü için hazır değil	Kamu bilinci ve kabulü
Enerji tüketim ve kayıpları ve hidrojen kayıpları	Yüksek teslimat maliyeti	Ulusal kamu kurumları arasında koordinasyon eksikliği	Hidrojen kaçırma korkusu
Mevcut enerji altyapısının hidrojen ile uyumluluğunun zayıf olması	Uygun son kullanım alanlarının olmaması	Çelişen itici güçler ve politika kararlılığı eksikliği	Yatırımcı güveninin eksikliği
	İlk hareket edenlerin dezavantajı		
	Bilgi birikimi, personel ve beceri seti eksikliği		

Kaynak: (International Renewable Energy Agency, 2024)

Hidrojen enerjisi kullanımının artırılmasının önünde bazı engeller bulunmaktadır. Bu engeller tablo 2 de 4 başlık altında sıralanmıştır. Günümüzde kullanımının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel olarak yüksek maliyete sahip oluşması ön plana çıkmaktadır. Ancak her teknoloji, gelişim safhasının başındayken maliyetlerinin görece daha yüksek seviyelerde olduğu ve ilerleyen zamanlarda ise düşüşlerin gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Hidrojen için de bu sürecin işlemesi öngörülmektedir. Ayrıca sonlu olan fosil yakıtların çıkarılmasının maliyetlerinin giderek artması ve aynı zamanda çevreye verdikleri zararların da muhasebeleştirilmesi sonucunda hidrojen enerjisinin ilerleyen dönemlerde fosil yakıt kullanımı ile rekabet edilebilirliğinin artması kaçınılmazdır.

SONUÇ

Hidrojen enerjisi küresel ısınma, enerji arz güvenliği gibi fosil yakıt kullanımı nedeniyle ortaya çıkan major sorunlar ile çözüm arayışında önemli bir alternatif olarak dikkate alınmakta ve bu doğrultuda ülkeler tarafından çeşitli politikalar ve stratejiler ile desteklenerek kullanımının artırılması hedeflenmektedir. Hidrojen enerjisinin bir enerji taşıyıcısı olarak yenilenemez enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında olumlu ve olumsuz yanları bulunmaktadır. Olumsuz yönleri içinde maliyetinin görece yüksek oluşu en başta gelmektedir. Ancak giderek artan küresel sıcaklıklar ve ülkeler arası yaşanan politik gerginlikler sonucu enerji kaynaklarının taraf ülkelere

bir koz olarak kullanılması hidrojene olan yönelimi hızlandırmaktadır. Her yıl bir önceki veriler ile kıyaslandığında talebin ve üretiminin artış göstermesi, ülkelerin her yıl yeni stratejiler yayınlamaları, projelerin ve proje ölçeklerinin, AR-GE çalışmalarının giderek artması ise umut vaatmektedir.

KAYNAKÇA

- International Energy Agency. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. Hydrogen Demand.
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Green Hydrogen Auctions: A Guide to Design*. Abu Dhabi.
- Kakran, S., Sidhu, A., Kumar, A., Youssef, A. B., & Lohan, S. (2023). Hydrogen Energy in BRICS-US: A Whirl Succeeding Fuel Treasure. *Applied Energy*.
- Kükreler, B. (2007). Hidrojen Enerjisinin Gelişme Potansiyeli ve Türkiye Açısından Değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2024, Ocak). *CO₂ Emissions*. Retrieved Kasım 25, 2024, from Our World in Data: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2024, Ocak). *Energy Production and Consumption*. Retrieved Kasım 25, 2024, from Our World in Data: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption#article-citation>
- Tugal, N. (2014). Enerji Talebi ve Enerji Talebini Belirleyen Faktörler: Türkiye Uygulaması.
- Veziroğlu, T. N., & Momirlan, M. (2005). The Properties of Hydrogen as Fuel Tomorrow in Sustainable Energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 795-802.



TÜRKİYE'NİN SOSYO-EKONOMİK KALKINMASINDA ROL ALAN PRİMER ENERJİ KAYNAKLARININ GÜNCEL DURUM ANALİZİ

Mahmut Suat DELİBALTA¹

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-4549>

Özet

Dünya birincil (primer) enerji kaynakları (petrol, kömür, doğalgaz, nükleer vd.) tüketimi 1971 yılında 213,45 EJ (Exajoule) düzeyinde iken, 2021 yılında 595,15 EJ düzeyine ulaşarak son 50 yılda yaklaşık 3 kat artmıştır. Türkiye birincil enerji arzı yıllık artış oranı ise, son 10 yılda ortalama %3,52 düzeyinde gerçekleşmiştir. 2021 yılında ülkemiz birincil enerji arzı bir önceki yıla göre %8,33 artarak 159,43 mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olmuştur. Bu arzın kaynaklara dağılımında ilk sırayı 49,23 mtep ile doğalgaz alırken; 43,98 mtep ile ham petrol ve petrol ürünleri ikinci sırada; 41,57 mtep ile kömür (taşkömürü, linyit, asfaltit, kok) üçüncü sırada yer almıştır. Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücünü incelediğimizde; ilk sırada 31.571,5 MW (Megawatt) ile hidroelektrik santralleri (barajlı ve akarsu), ikinci sırada 25.345,3 MW ile doğalgaz çevrim santralleri, üçüncü sırada ise 21.811,1 MW ile kömür yakıtlı termik santralleri görmekteyiz. Ülkemiz birincil enerji arzı kaynak dağılımında, yıllar içerisinde önemli değişiklikler söz konusu olmuştur. Öyle ki, 1971 yılında enerji arzının %46'sı petrol, %29'u biyo enerji ve atıklardan ve %24'ü yerli kömürden (liniyit, taşkömürü ve asfaltit) karşılanırken, 2021 yılına gelindiğinde en büyük pay %30,9 ile doğalgazın olmuş, petrol %27,6 ile doğalgazdan sonra yer almış; yerli kömür %11,1 ve biyo enerji ve atıklar da %2,6 düzeyine gerilemiştir. Buna karşın, ithal kömürün (taşkömürü ve kok) birincil enerji arzındaki payı ise %15'lere kadar yükselmiştir. Ayrıca; 2023 yılı ithal maden grubu içerisinde 41,2 milyon ton ve 6 milyar \$ ile enerji hammaddeleri, taşkömürü de 40 milyon ton ve 5,7 milyar \$ ile en fazla ithal edilen maden olmuştur. Burada sadece önemli bir husus; rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji kaynaklarının ülkemiz birincil enerji arzındaki paylarının her geçen yıl giderek artmasıdır. Ancak; ülkemiz enerji arzının yerli kaynaklardan karşılanma oranı 2019 yılında %31,1, 2020 yılında %29,9 iken, 2021 yılında %29,3'e gerilemiş olup, ithal enerji kaynakların toplam payı %71'lere kadar çıkmıştır. Tüm bu tespit ve verilere göre; ülkemizin yüksek döviz ödeme ve bütçe açıklarına neden olan enerji giderlerini azaltmak veya minimize etmek maksadıyla, kendi doğal kaynaklarına yönelmesi, yüksek teknolojik, çevreci ve enerji verimli sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Kongre bildirisi kapsamında, sektöre özgü yenilikçi çözüm önerileri sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Türkiye, Ekonomi, Enerji, Doğal Kaynaklar, Planlama, Analiz.

CURRENT SITUATION ANALYSIS OF THE PRIMARY ENERGY SOURCES INVOLVED IN THE SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF TURKEY

Abstract

The world's primary energy sources (oil, coal, natural gas, nuclear, etc.) while its consumption was at the level of 213.45 EJ (Exajoule) in 1971, it has increased by about 3 times in the last 50 years, reaching the level of 595.15 EJ in 2021. The annual increase rate of Turkey's primary energy supply has been realized at an average level of 3.52% over the last 10 years. In 2021, the primary energy supply of our country increased by 8.33% compared to the previous year and reached 159.43 mtep (million tons of equivalent oil). While natural gas takes the first place in the distribution of this supply to resources with 49.23 mtep; crude oil and petroleum products take the second place with 43.98 mtep; coal (hard coal, lignite, asphaltite, coke) took the third place with 41.57 mtep. When we examine the total installed electricity capacity of Turkey, we see hydroelectric power plants (dams and streams) with 31.571,5 MW (Megawatt) in the first place, natural gas cycle power plants with 25.345,3 MW in the second place, coal-fired thermal power plants with 21.811,1 MW in the third place. There have been significant changes in the distribution of primary energy supply resources in our country over the years. So much so that in 1971, 46% of the energy supply was covered by oil, 29% by bio-

energy and waste and 24% by domestic coal (lignite, hard coal and asphaltite), by 2021 the largest share was natural gas with 30.9%, oil took place after natural gas with 27.6%; domestic coal decreased to 11.1% and bio-energy and waste to 2.6%. On the other hand, the share of imported coal (hard coal and coke) in the primary energy supply has increased to 15%. In addition, energy raw materials with 41.2 million tons and 6 billion dollars and hard coal with 40 million tons and 5.7 billion dollars were the most imported mines in the imported mining group in 2023. Only one important issue here is that the share of wind, solar and geothermal energy sources in the primary energy supply of our country is increasing gradually every passing year. But; while the coverage rate of our country's energy supply from domestic sources was 31.1% in 2019, 29.9% in 2020, it decreased to 29.3% in 2021, and the share of imported energy sources increased to 71%. According to all these findings and data, in order to reduce or minimize the energy expenses that cause high foreign exchange payouts and budget deficits of our country, it is necessary to turn to its own natural resources, develop and implement high-technological, environmentally friendly and energy-efficient systems. Within the scope of the congress declaration, innovative sector-specific solution proposals will be presented.

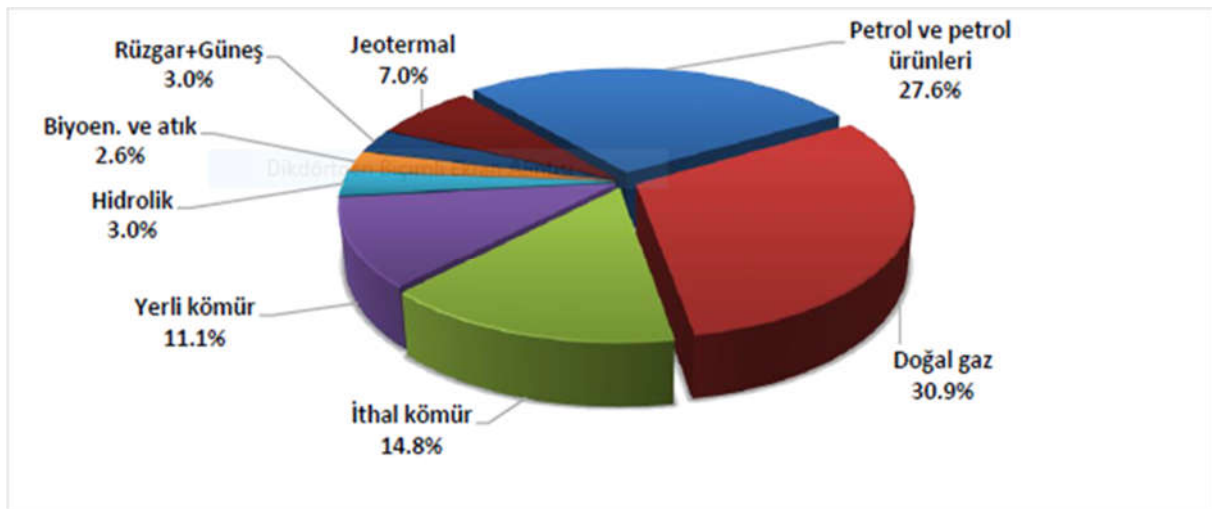
Keywords: Turkey, Economy, Energy, Natural Resources, Planning, Analysis.

1. GİRİŞ

Yaşadığımız çağın gereği olarak; teknolojik gelişmeler, sanayileşme, kentleşme ve hızlı nüfus artışı gibi faktörler, enerji kaynaklarına olan talebi önemli ölçüde yükseltmektedir. Ülkeler enerji politikalarını belirlerken, sürdürülebilir ekonomik ve sosyal kalkınma hedeflerini gerçekleştirmek istemektedir (ETKB, 2006; MadenMO, 2020). Dünya ülkeleri gibi Türkiye'nin de temel enerji politikası; zamanında, yeterli, rekabet edilebilir fiyatlardan, çevresel etkileri de dikkate alarak enerji talebini güvenli biçimde karşılamaktır.

Son 20 yılda dünya birincil (primer) enerji tüketiminde yaklaşık %49'luk bir artış yaşanmış, bu artışın %80'lik kısmı Asya Pasifik ülkelerinden kaynaklanmaktadır. Küresel enerji talep gelişimi izlendiğinde; Çin'de yaklaşık %250, Hindistan'da %163 artış yaşanırken, Japonya'da %20, Avrupa Birliği ülkelerinde (AB27) %9, ABD'de %0,3 oranında azalma görülmektedir. OECD ülkelerinde ise enerji tüketimi düşüş trendinde olmasına rağmen, kısmen aynı düzeyde kalmaktadır (İlseven, 2022; EÜAŞ, 2023). Konjontürel olarak; II.Dünya Savaşı'ndan sonra küresel enerji talebindeki en önemli azalış, %4 oranıyla 2020 yılı Covid-19 salgını döneminde gerçekleşmiştir.

Ülkemiz primer enerji kaynakları arz dağılımında da yıllar içerisinde önemli farklılıklar gözlenmiştir. Türkiye'de 1971 yılı enerji arzı %46 petrol, %29 biyoenerji ve atıklar, %24 yerli kömürden (linyit, taşkömürü ve asfaltit) karşılanırken, 2021 yılına gelindiğinde en büyük pay %30,9 ile doğalgazın olmuş, bunu %27,6 ile petrol, %11,1 yerli kömür, %2,6 biyoenerji ve atıklar izlemiştir. İthal kömürün (taşkömürü ve kok) birincil enerji arzındaki payı ise %14,8 seviyesine çıkmıştır. Ancak; rüzgâr, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir kaynakların ülkemiz birincil enerji arzındaki payı her geçen yıl giderek artmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye birincil enerji tüketiminin kaynaklara dağılımı (TKİ, 2023)

Ayrıca; ülkemiz enerji arzı yerli kaynaklardan karşılanma oranı 2019 yılında %31,1 2020 yılında %29,9 iken 2021 yılında %29,3'e gerilemiş, ithal kaynakların toplam payı %70,7'ye çıkmıştır. Yapılan enerji kaynakları ithalatının dağılımı ise; 51,99 mtep ham petrol ve petrol ürünleri, 48,43 mtep doğalgaz, 22,92 mtep kömür ve 0,76 mtep kok olarak gerçekleşmiştir. Ülkemiz ekonomisinde önemli çari açıklara neden olan enerji kaynakları kullanım durumu, bahse konu konferansta sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

“Türkiye'nin Sosyo-Ekonomik Kalkınmasında Rol Alan Primer Enerji Kaynaklarının Güncel Durum Analizi” çalışmasında; gerek ulusal ve gerekse uluslararası veriler yıllık gelişim süreci çerçevesinde ele alınarak, istatistiksel yönden değerlendirilmekte ve irdelenmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dünya enerji piyasası; üretim, iletim, dağıtım ve tedarik gibi temel unsurlardan oluşmaktadır. Elektrik enerjisi diğer ticari ürünler gibi kolay depolanamama ve üretildiği anda tüketilmesi zorunluluğu nedeniyle, tüm faaliyetlerin iç içe / bütünleşik olduğu bir sektördür. Dünya ve özellikle Avrupa enerji sektöründe; güvenilir ve daha fonksiyonel elektrik piyasasının oluşturulması için üretim, iletim, dağıtım faaliyetlerinin tek bir tüzel kişilik yerine, mümkün olan alanlarda özel sektör teşvik edilmektedir. Ancak, enerji iletim yatırımlarının yüksek maliyetli, kamulaştırma güçlükleri ve enterkonekte sistemin tekel niteliğe haiz oluşu gibi nedenlerle, iletim hizmetlerinin kamu tarafından sağlanması yönündeki eğilimler günümüzde de devam etmektedir (TEİAŞ, 2024). Türkiye de AB uyum programları kapsamında, büyük ölçüde bu süreçlere dahil olmaktadır.

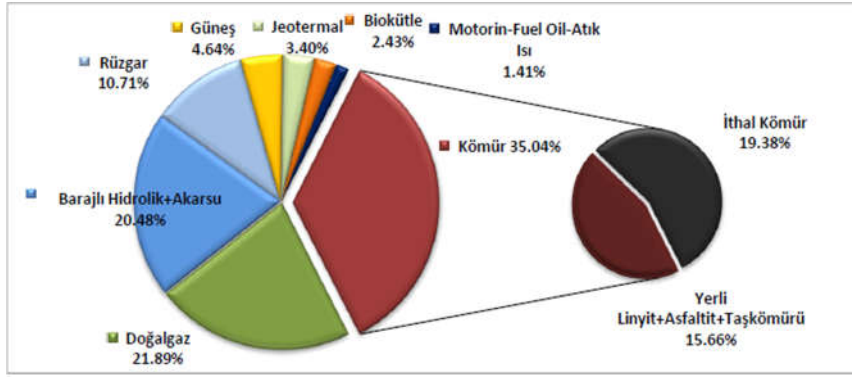
Bir dönem ülkemizde ENPEP (Energy and Power Evaluation Program)'in MAED (Model of Analysis of Energy Demand) modülü genel enerji ve elektrik talebini planlamak için kullanılırken, WASP (Wien Automatic System Planning Package) modülü elektrik üretim planlaması için kullanılmıştır. BALANCE modülü ile enerji üretiminden nihai tüketim aşamasına kadar tüm safhalar planlanmış, aynı zamanda oluşan sera gazı ve diğer gazların çevresel analizi de yapılmıştır. Özellikle ulusal enerji talep planlaması yapılırken; alternatif senaryoların birbiri ile karşılaştırılması ve durum tespiti amacıyla, öncelikle bir referans senaryo oluşturulmaktadır. Referans senaryo, varolan hükümet politikaları ve teknolojik durumu yansıtan olağan (business as usual) bir senaryodur (ETKB, 2006). Bunlardan bazıları;

- Düşük talep senaryosu (Low Growth Scenario),
- Talep taraflı verimliliğin artırılması (Demand Side Management-DSM Scenario),
- Nükleer santral senaryosu (No Nuclear Scenario),
- Sanayide kojenerasyon tesisleri kullanımı (Cogeneration Scenario) gibi.

Ancak, 2018 yılı Ekim ayı itibarıyla Türkiye enerji modellemesinde, IPA programı kapsamında AB tarafından finanse edilen büyük ölçekli yapıların çözümü için tercih edilen matematiksel bir yazılım olan Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) kullanılmaktadır. Model, bir piyasa dengesine ulaşmak için sırayla çalışan dört modülden oluşmaktadır. Bunlar; Talep Modülü, Elektrik ve Isı Modülü, Biyokütle Modülü, Dengeleme Modülü'dür. Söz konusu model, sektörel bazda detaylı analizlere de imkan sağlamaktadır (ETKB, 2022). Bu modelin uygulamaya dönük bazı bulguları, ilerleyen alt başlıklarda verilmektedir.

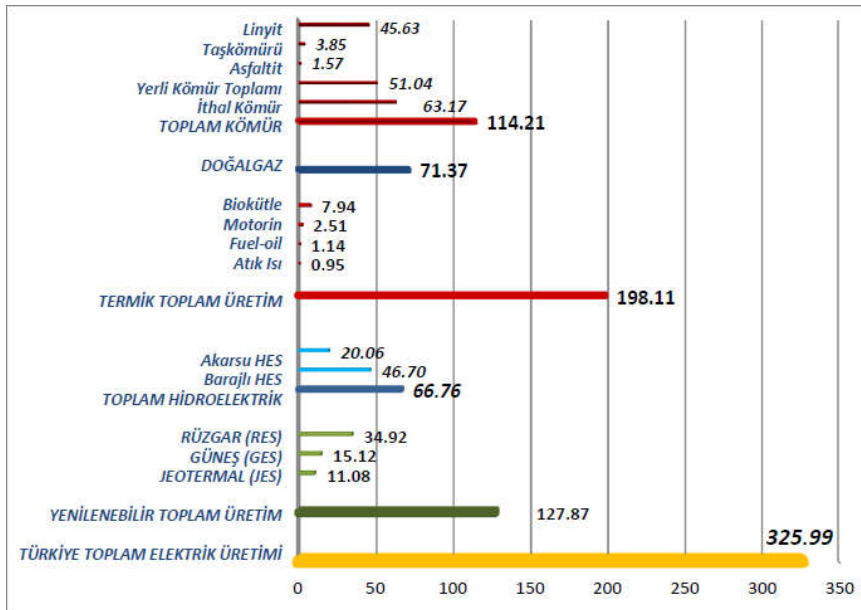
3.1. Kaynaklara Göre Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketimi

Türkiye 2023 yılı elektrik enerjisi tüketimi bir önceki yıla göre %1,2 artarak 335,2 TWh, elektrik üretimi ise %0,8 artarak 331,1 TWh olarak gerçekleşmiştir. Türkiye ulusal enerji planı çalışmalarına göre; elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh, 2035 yılında ise 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir (ETKB, 2024). Ülkemiz 2023 yılı elektrik enerjisi üretiminde; %35,0 kömür, %21,8 doğalgaz, %20,4 hidrolik, %10,7 rüzgar, %4,6 güneş, %3,4 jeotermal ve %3,8 diğer kaynaklar kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların % payı (TKİ, 2023)

2024 yılı Eylül sonu itibarıyla Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü 114.215 MW'a ulaşmıştır. Bu kurulu gücün kaynaklara dağılımı; %28,2 hidrolik, %21,6 doğalgaz, %19,2 kömür, %10,8 rüzgâr, %16,4 güneş, %1,5 jeotermal ve %2,4 diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca; ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, aynı dönemde 31.590'a (lisanssız santraller dâhil) yükselmiştir. Mevcut santrallerin 765 adeti hidroelektrik, 69 adeti kömür, 365 adeti rüzgâr, 63 adeti jeotermal, 341 adeti doğalgaz, 29.512 adeti güneş, 475 adeti diğer kaynaklı santrallerden oluşmaktadır. Kömür santralleri ülkemiz toplam kurulu gücün %21'ini, yerli kömür santralleri ise %11'ini karşılamaktadır (Şekil 3).

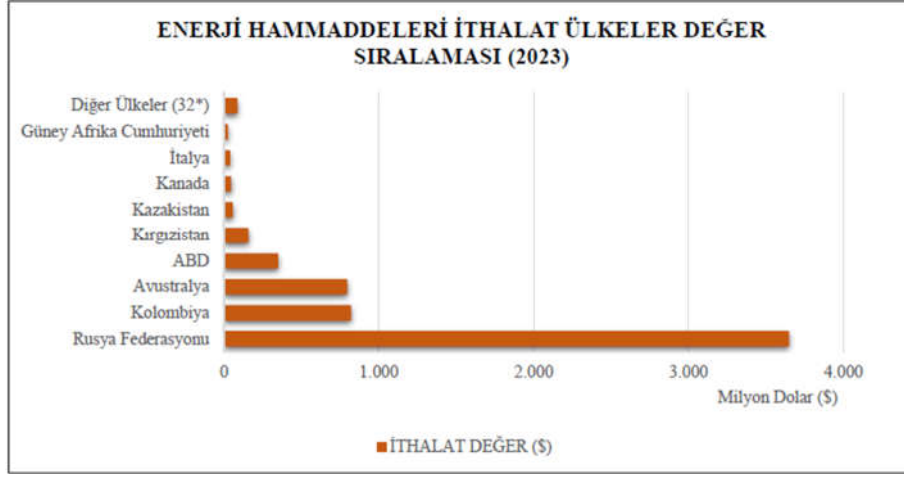


Şekil 3. Türkiye toplam elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara dağılımı (Milyar kW)

Yerli kömüre dayalı elektrik üretimi 51,04 milyar kW olup, bunun 45,63 milyar kW'si linyit, 1,57 milyar kW'si asfaltit ve 3,85 milyar kW'si taşkömüründen elde edilmiştir. Yerli kömüre dayalı üretim bir önceki yıla göre yaklaşık %3'lük artışla, Türkiye toplam elektrik üretiminin %15,66'sını oluşturmuştur. İthal kömüre dayalı santrallerdeki üretim ise; bir önceki yıla göre 8,37 milyar kW artarak 63,17 milyar kW olarak gerçekleşmiş ve toplam elektrik üretiminin %19,38'ine karşılık gelmektedir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre; 2023 yılı 339.053.071.567 \$ olan ülkemiz toplam ithalatında %2,36 pay alan madencilik sektörü ithalatı, 2022 yılına göre %31,11 azalarak 8.028.131.768 \$ olarak gerçekleşmiştir. Bu ithalatın %75,13'ünü enerji hammaddeleri, %15,17'sini metalik cevherler, %8,51'ini endüstriyel hammaddeler ve %1,19'unu doğaltaşlar oluşturmaktadır. 2023 yılında en fazla ithal edilen maden grubu 41,19 milyon ton ve 6 milyar \$ ile enerji hammaddeleri olmuştur. Özellikle, taşkömürü

40 milyon ton ve 5,7 milyar \$ ile en fazla ithal edilen enerji kaynaklı maden olmuştur. Enerji ithalatının gerçekleştirildiği ülkeler arasında Rusya Federasyonu 3,7 milyar \$ ve %46,15 pay ile ilk sırada yer almaktadır (Şekil 4). Enerji hammaddeleri ithalatı yapılan ülkelerin monopol veya tekel oluşu, ayrıca dikkate değerdir. Özet olarak; son 30 yılda Türkiye'nin toplam kurulu gücü 10 kat, elektrik üretim miktarı yaklaşık 8 kat, yerli kömüre dayalı kurulu güç ve elektrik üretim miktarı ise 2,5 kat artış göstermiştir.

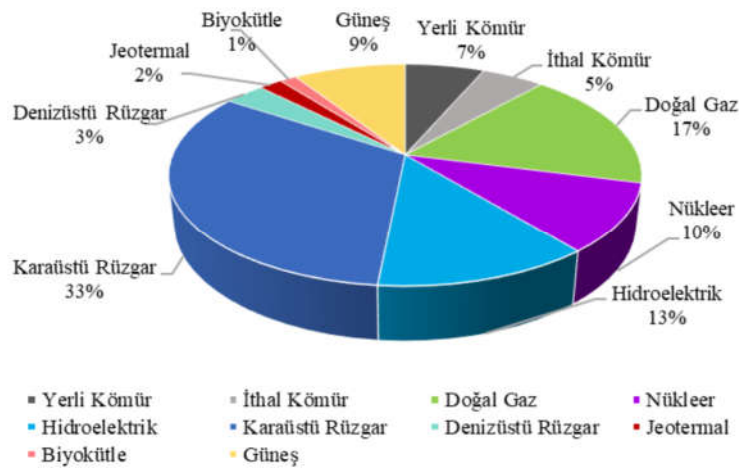


Şekil 4. Türkiye'nin enerji hammaddeleri ithalatı yaptığı ülkeler ve değeri (MTA, 2024)

3.2. Türkiye'nin 2035-2053 Yılı Enerji Görünümü

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun Arz Güvenliği başlıklı 20.Maddesi ve 4646 sayılı Doğalgaz Piyasası Kanunu Ek Madde 2 gereğince hazırlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı, ülkemizin 2035 ve 2053 yılı enerji görünümüne ilişkin tahminleri içermektedir. Söz konusu plana göre;

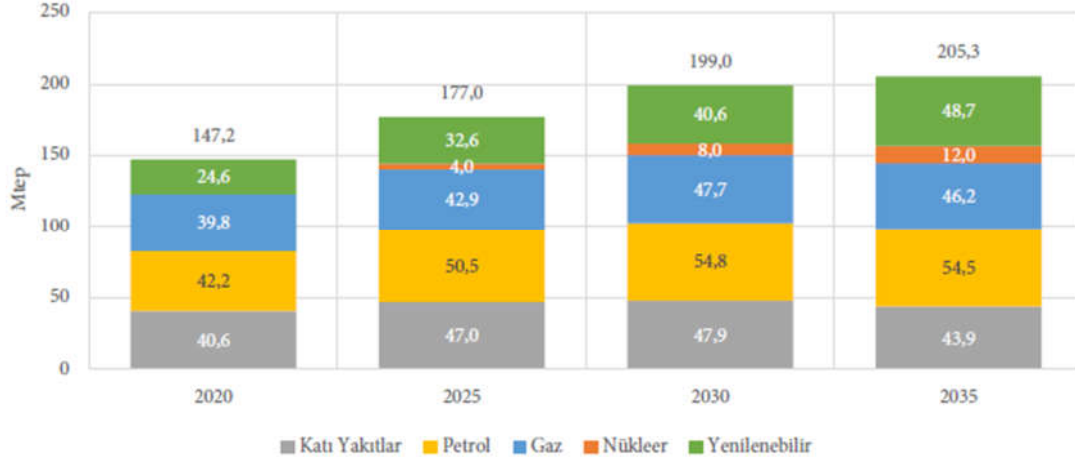
2020 yılı enerji üretiminde %34,5 paya sahip olan kömür santrallerinden sağlanan elektrik enerjisi üretimi, 2053 yılına kadar azalarak devam edecektir (Yıldız, 2022; İDB, 2024). Sistemdeki tüm santraller, teknik ömürleri doluncaya kadar elektrik üretimine katkıları azalsa da devrede kalmakta ve sisteme rezerv kapasite ile esneklik sunmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Mevcut durum senaryosu, 2053 yılı elektrik üretim payları (Çelik & Selçuklu, 2023)

Bu dönemde karbon tutma teknolojisine sahip yeni bir kömür ya da doğalgaz santrali için yatırım kararı öngörülmemektedir. Fakat, teknolojik gelişmeler ve fiyatlardaki düşüş nedeniyle, kömür elektrik üretimine

daha fazla katkı sunabilir. Bu durumda, ihtiyaç duyulacak nükleer santral kurulu gücü de kısmen azalabilir. Ayrıca; 2020 yılı birincil enerji tüketiminde %28 olan kömürün payı 2035 yılında %21,4'e düşmesine rağmen, 2020 yılında 40,6 mtep iken 2030'da 47,9 mtep'e yükselerek, 2035 yılında 43,9 mtep olması öngörülmektedir (Şekil 6).

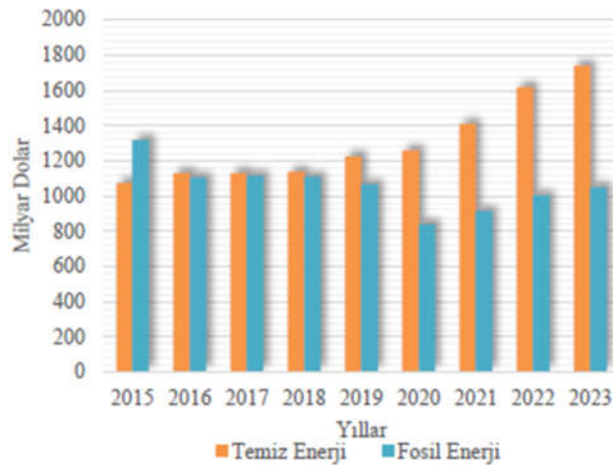


Şekil 6. Kaynaklara göre Türkiye birincil enerji tüketimi gelişimi (ETKB, 2022)

Aynı dönem; sanayi sektöründe %3,7 meskenlerde %2,3 hizmetler sektöründe %2,2 yıllık ortalama elektrik tüketim artışı olacağı öngörülmektedir. 2000-2020 dönemi %4,4 oranında artarak 128 TWh'ten 306,1 TWh'e yükselen elektrik tüketimi, 2035 yılına kadar yıllık ortalama %3,5 düzeyinde artarak 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir.

Sektörlere göre sera gazı emisyon miktarlarına baktığımızda, enerji sektörü ilk sırada yer almaktadır. 2019 yılı toplam sera gazı emisyonlarında CO₂ eşd. olarak en büyük payı %72 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken, bunu sırasıyla %13,4 ile tarım, %11,2 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı, %3,4 ile atık sektörü takip etmektedir. Dünyada madencilik sektörü kaynaklı yılda 1,9~5,1 gigaton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonu oluşurken, Türkiye'de madencilik endüstrisi kaynaklı yaklaşık 2 milyon ton CO₂ eşdeğer sera gazı emisyonu oluşmaktadır (TOBB, 2020; İDB, 2024).

Ayrıca; temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımların artmasının ana nedeni, çevresel etkilerin azaltılması amacıyla sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik küresel çabalar, fosil yakıtların fiyat dalgalanmaları, sınırlı kaynakların farkındalığı, politika destekleri, teşviklerle birlikte artan devlet düzeyindeki çabalar, teknolojik gelişmelerle birlikte temiz enerji maliyetlerinin düşmesi, enerji güvenliği hedefleri ve toplumsal bilinçlenmenin artması önemli rol oynamaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Enerji kaynaklarına küresel düzeyde yapılan yatırımlar (Bilhan, 2024)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji sektörü; başta sosyo-ekonomik gelişim ve insanların yaşam standartlarının yükseltilmesi bağlamında, ulusal ve uluslararası ekonomiler için büyük bir öneme sahiptir. Ancak; dünya enerji kaynakları talebindeki sürekli artış, yükselen enerji fiyatları, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi nedenler, ülkelerin enerji arz güvenliği konusundaki kaygılarını her geçen gün daha da artırmaktadır. Enerji kaynakları sadece ülke gelişimini etkileyen bir unsur olmanın ötesinde, dünya barışı için de çok önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle Dünya Enerji Konseyi (World Energy Council-WEC) “*insanlar için enerji, barış için enerji (energy for people, energy for peace)*” anlayışı ile hareket edilmesi kararı almıştır (Delibalta, 2018). Bu sebeple, enerji kaynakları stratejik özelliği olan bir sektördür.

Enerji ve çevre konusundaki öncelik ve gereksinimler ülkeden ülkeye değişse de, ulusal gündemlerin ve yönelişlerin gitgide daha çok uluslararası politikalar tarafından belirlendiği dikkati çekmektedir. Özellikle son yıllarda ülkeler iklim değişikliği ve buna yol açan fosil yakıtları tartışmaktadır. Dünya Enerji Konseyi'nin yürüttüğü çalışmalara göre; 2040 yılına kadar bugünkü dünya enerji tüketiminde %43, CO₂ emisyonlarında yaklaşık %55'lik bir artış, fosil kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin maksimum noktasına ulaşarak kısmen azalmaya başlayacağı, buna karşın alternatif / yenilenebilir enerji kaynakları payının giderek artacağı öngörülmektedir.

Ayrıca; AB'nin yeni stratejisi “Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal)” ile yeşil ve döngüsel bir ekonomi için temiz, ulaşılabilir ve güvenli enerji sağlayacak politikalara önem verilmektedir (Delibalta, 2024). Ülkemiz enerji sektöründe de sözkonusu mutabakat stratejisi ve hedefleri etkili olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmakta, yeşil yatırımlar teşvik edilmektedir. Öyle ki; ülkelerin enerji politikaları yeşil, ekonomik ve güvenli enerji arzı sağlamak olarak şekillenmektedir.

Türkiye’de bugüne kadar üç temel sütun (doğalgaz, kömür ve hidrolik) üzerine kurulu olan enerji sektörü; küresel gelişmelere uygun olarak, yenilenebilir kaynakları ve nükleer enerjiyi de içerecek şekilde beş sütunlu yapıda yeniden planlanmaktadır. Ancak; ulusun sosyo-ekonomik gelişimi için, yalnızca zengin doğal / tabii kaynaklara sahip olması yeterli değildir. Tabii kaynakların yanı sıra yeterli sermaye, teknolojik altyapı, kalifiye işgücü, serbest ve güçlü ekonomi politikalarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, ülkemizin enerji sektöründe yurtdışına olan bağımlılığını azaltmak ve sürdürülebilir kalkınması için; daha fazla yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi, mevcut termik santralleri revize etmesi, döngüsel ekonomi modeli, kaynak çeşitliliği ve enerji verimliliğini artırması gerekmektedir. Günümüzde ilgili bakanlıklar tarafından net sıfır emisyonu ve temiz enerji stratejileri yönünde olumlu adımlar atılmakla birlikte, bu faaliyetlerin başarı düzeyi, kontrol ve denetim çalışmaları da mutlaka yapılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

Bilhan, Ö. (2024). Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları açısından hidroelektrik ve güneş enerjisinin bölgesel ve iller bazında incelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, doi: 10.28948/ngumuh.1548541

Çelik, E. & Selçuklu, S.B. (2023). İklim değişikliği ile mücadele ve emisyon hedefleri kapsamında Türkiye’nin nükleer enerji politikaları analizi, *3rd International World Energy Conference-IWEC*, Full Texts Book, ISBN: 978-625-367-567-7, pp.31-41, 4-5 December, Kayseri/ Türkiye.

Delibalta, M.S. (2024). Türkiye kömür rezervlerinin rasyonel değerlendirilmesi ve ekonomik önemi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 745-749, doi: 10.28948/ngumuh.1391184

Delibalta, M.S. (2024). Bubbling fluidized bed and oven drying for Turkish coal: a comparative study, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, doi: 10.1080/19392699.2024.2336062

Delibalta, M.S. (2020). Türkiye Enerji Sektörü Gelişimi ve Ekonomik Etkilerine Güncel Bir Bakış, *4th International Congress on Economics Finance and Energy- EFE'2020*, Proceeding Book, ISBN: 978-9944-237-46-8, pp.2-18, 14-15 October, Ankara/ Türkiye.

Delibalta, M.S. (2018). Türkiye’de Fosil Enerji Kaynakları ve Yeni Nesil Termik Santrallerin Önemi, *International Congress of Energy, Economy and Policy-ENSCON 2018*, Proceedings Book, 11s., 21-22 April, Istanbul/ Turkey.

- ETKB, (2024). Bilgi Merkezi, Enerji-Elektrik, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Erişim tarihi: 24 Ekim 2024, online adres: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- ETKB, (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Strateji Geliştirme Başkanlığı, 54s., Ankara.
- ETKB, (2006). Enerji Sektöründe Sera Gazı Azaltımı Çalışma Grubu Raporu, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 41s., Ankara.
- EÜAŞ, (2023). Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu 2023, Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), Ek-1, 44s., Ankara.
- İDB, (2024). Türkiye Uzun Dönemli İklim Stratejisi, Türkiye 2053 Long Term Climaty Strategy, İklim Değişikliği Başkanlığı (İDB), Erişim tarihi: 14 Kasım 2024, online adres: <https://iklim.gov.tr/strateji-belgeler-i-20>
- İlseven, E. (2022). Genel Enerji Görünümü, *Hedef 2053: Termik Santrallerin Geleceği Çalıştayı*, 25-26 Mayıs, Ankara.
- MadenMO, (2020). Kömür ve Enerji Raporu 2020, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, ISBN: 978-605-01-1381-5, 48s, Ağustos, Ankara.
- MTA, (2024). Madencilik Sektörüne Ait Temel Ekonomik Göstergeler 2023, Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 106s., Ankara.
- TKİ, (2023). Kömür Sektör Raporu (Linyit) 2022, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Kurumu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 139s., Ankara.
- TOBB, (2020). Türkiye Madencilik Sektörü Gelişim Raporu (2020), Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB), Yayın No: 2021/25, ISBN: 978-605-137-862-6, 176s., Ankara.
- Yıldız, E. (2022). Sürdürülebilir Elektrik Üretimi Çerçevesinde Termik Santrallerin Geleceği, *Hedef 2053: Termik Santrallerin Geleceği Çalıştayı*, 25-26 Mayıs, Ankara.

**MAKİNE ÖĞRENİMİ İLE RÜZGÂRI TAHMİN ETMEK: XGBoost İLE TÜRKİYE’NİN RÜZGÂR ENERJİSİ ÜRETİMİNİN 60 AYLIK ANALİZİ****Halil ŞENOL¹**¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3056-5013>**Emre Aşkın ELİBOL²**²Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8573-6065>**Halil ÇOLAK³**³Giresun Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Beden Eğitimi ve Spor Bölümü, Giresun, Türkiye³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9003-106X>**Özet**

Bu çalışmada, Türkiye'nin 2018-2022 yılları arasındaki 60 aylık rüzgâr enerjisi üretim verileri kullanılarak, XGBoost algoritması ile geçmiş dönem üretim miktarları tahmin edilmiştir. Zaman serisi verilerinin tahmininde, XGBoost algoritmasının güçlü modelleme yeteneklerinden yararlanılmış ve geçmiş 3 zaman adımını içeren özellik mühendisliği uygulanmıştır. Modelin performansı, R², MSE, SSE ve MAPE gibi hata metrikleriyle değerlendirilmiş ve modelin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. R² değerinin 1 olması, modelin veriye tam uyum sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, XGBoost algoritmasının rüzgâr enerjisi üretimi gibi değişken kaynaklar için etkili bir tahmin aracı olduğunu ortaya koymuştur. Gelecekteki çalışmalarda, model performansının daha da artırılabilmesi için lag sayısının artırılması ve hiperparametre optimizasyonu gibi yöntemler önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, rüzgâr enerjisi, zaman serisi, tahmin yöntemleri

FORECASTING WIND WITH MACHINE LEARNING: 60-MONTH ANALYSIS OF TURKEY’S WIND ENERGY PRODUCTION WITH XGBoost**Abstract**

This study utilized 60 months of wind energy production data from Turkey, spanning 2018 to 2022, to estimate historical production figures using the XGBoost algorithm. The XGBoost algorithm's robust modeling skills were employed in the estimate of time series data, incorporating feature engineering that included the previous three time steps. The model's performance was assessed using error metrics including R², MSE, SSE, and MAPE, revealing that the model produced very accurate results. An R² score of 1 signifies that the model perfectly aligns with the data. The results demonstrated that the XGBoost method is an efficient estimation technique for variable resources, including wind energy output. Future research should incorporate strategies such as augmenting the lag number and optimizing hyperparameters to enhance model performance.

Keywords: Renewable energy, wind energy, time series, predictions methods.

1. Giriş

Enerji talebindeki artış ve buna bağlı çevre kirliliği, 21. yüzyılın iki önemli küresel sorunudur ve sera gazı emisyonları sonucu küresel ısınmaya neden olan fosil yakıtların düzensiz kullanımına yol açmıştır (Şenol, Çolak, & Oda, 2024). Sera gazı emisyonunu azaltma stratejileri arasında , yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ve kullanımı en etkili strateji olarak kabul edilmektedir (Mendonça & Fonseca, 2018). 2050 yılına kadar net sıfır emisyon taahhütleri göz önüne alındığında, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve

yenilenebilir enerji geliştirmek için çok çaba sarf edilmiştir (Lin & Chen, 2019). Hidroelektrik enerji hariç, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji teknolojileri küresel elektrik enerjisinin yaklaşık %2,1'ini oluşturmaktadır (Popp, Hascic, & Medhi, 2011).

Rüzgâr enerjisi, sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacı ve artan elektrik talebi nedeniyle yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmıştır (Bin Abu Sofian et al., 2024). Küresel Rüzgâr Enerjisi İstatistikleri 'ne göre 2021 yılı sonu itibarıyla en yüksek karasal rüzgâr enerjisi kapasitesine sahip ülkeler %39,34 (278.324 MW) ile Çin, ardından %17,28 (122.275 MW) ile ABD ve %27,43 (194.075 MW) ile Avrupa ülkeleri olmuştur (GWEC, 2021). 2022 yılının ilk yarısında Türkiye'nin toplam kurulu Rüzgâr enerjisi santral kapasitesi 11.641 MW'a ulaşmıştır. 2022 yılının ilk yarısında rüzgârdan elde edilen toplam elektrik, Türkiye'de üretilen toplam elektriğin %10,72'sini oluşturmuştur (TWEA, 2023).

Yenilenebilir enerji üretiminin yüksek değişkenliği ve belirsizliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine verimli bir şekilde entegre etmeyi zorlaştırmaktadır (Impram, Nese, & Oral, 2020). Bu nedenle yenilenebilir enerji üretimi için doğru tahmin yapılması gerekir (Benti, Chaka, & Semie, 2023). Son yıllarda, makine öğrenimi modelleri zaman serisi tahmin sorunları için giderek artan bir popülerlik kazanmıştır. Zaman serisi yöntemlerinden biri olan Extreme Gradient Boosting algoritması (XGBoost), mükemmel seri modelleme yeteneklerine ve hızlı eğitim hızlarına sahiptir (Xu et al., 2024). Bundan dolayı aylık rüzgâr enerjisi üretimini tahmin etmekte kullanılabilir.

Literatür incelemelerinde makine öğrenme yöntemleriyle rüzgâr enerjisinin tahmin edilmesi hem dünyada hem de Türkiye'de için birçok çalışma vardır. Jørgensen vd., (2020) Danimarka için yaptıkları çalışmada rüzgâr gücünü yapay sinir ağı (YSA), destek vektör makinesi (SVM), k en yakın komşu (KNN) ve rastgele orman yöntemiyle (RF) tahmin ettiler. Shabbir vd., (2019) Estonya'daki rüzgâr enerjisi üretimini tahmin etmek için SVM yöntemini kullandılar. Sun vd., (2024) Çin, Amerika ve Avrupa Birliği ülkeleri için rüzgâr enerjisi gelişim potansiyel arazi uygunluğunu modellemek için derin sinir ağı (DNN), RF, XGBoost ve lightGBM algoritmasını tercih ettiler. Yusuff ve Moseitlhe (2024) Güney Afrika'nın Great Kei şehri için Lineer Regresyon (LR) yöntemini kullanarak rüzgâr gücünü tahmin ettiler. Baroni vd., (2024) offshore rüzgâr enerjisi santralleri için dalga yükseklikleri ve rüzgâr hızının tahminleri için makine öğrenmesinin zaman serilerinin Facebook Prophet, ekzojen faktörlerle mevsimsel otoregresif entegre hareketli ortalama (SARIMAX) ve long short term memory (LSTM) yöntemlerini kullandılar. Mollick vd., (2024) Bangladeř için kıy bölgelerindeki rüzgâr santrallerinin yer seçimi için rüzgâr hızını multilayer lineer regresyon (MLR), lasso, ridge, KNN, karar ağacı (DT), GBR, RF, XGBoost, lightGBM, CatBoost, LSTM ve kapılı yinelemeli birim (GRU) yöntemleri ile tahmin ettiler. Yelgeç ve Bingöl (2024) Türkiye'nin güneybatısında bulunan bir rüzgâr santralinin potansiyel gücünü LSTM, GRU, XGBoost, RF, Yinelemeli Sinir Ağı (RNN) ile tahminde bulundular. Alkesaiberi vd., (2022) Fransa, Türkiye ve Kaggle'daki üç rüzgâr türbinden aldıkları verilerle Gauss Süreci Regresyonu (GPR), SVR ve topluluk öğrenme (ES) algoritmalarıyla rüzgâr potansiyelini tahmin ettiler. Singh vd., (2022) Türkiye'nin batı bölgesinde bulunan rüzgâr santrallerindeki verilerle rüzgâr enerjisi üretimini tahmin etmek için RF, eğitim artırma makinesi (GBM), kNN, DT ve ekstra ağaç regresyonu (ET) kullandılar.

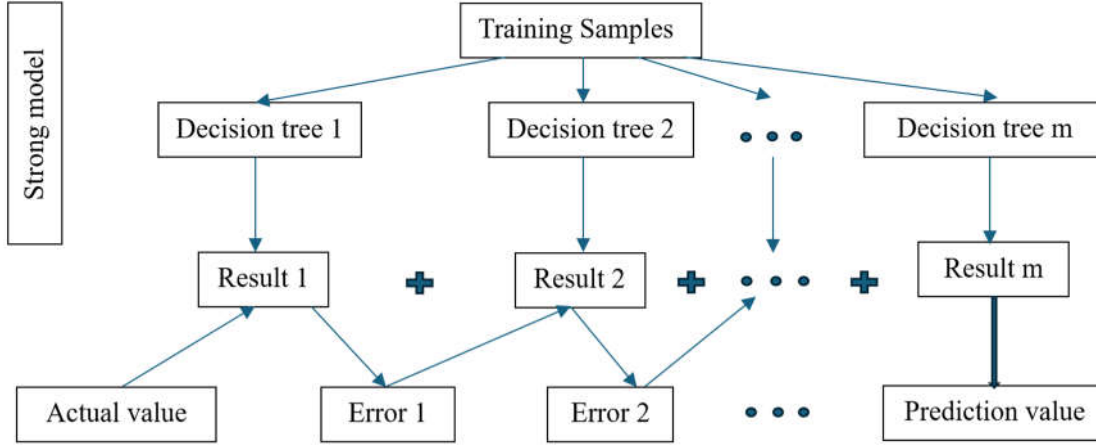
Bu çalışmada, Türkiye'nin 60 aylık (2018-2022) rüzgâr enerjisi üretim verileri kullanılarak XGBoost algoritması ile geçmiş dönem üretim miktarları tahmin edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, XGBoost'un güçlü modelleme yeteneklerini kullanarak mevcut verilerle rüzgâr enerjisi üretiminin nasıl tahmin edilebileceğini göstermektir. Literatürde, makine öğrenimi yöntemlerinin enerji üretimi tahminindeki etkinliği birçok kez incelenmiş olsa da bu çalışmada yalnızca mevcut verilerin tahmini üzerinde durulmuştur. Sonuçlar, yazarlara göre enerji üretiminde daha doğru planlama ve verimli yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için önemli bulgular sunabilir.

2. Teorik Metot

2.1. Aşırı Gradyan Artırma Ağacı

XGBoost 2014 yılında Tianqi Chen tarafından tanıtılan, gradyan artırma çerçevesini ve ağaç modelinin kademeli eklemeli modelleme stratejisini birleştirerek karmaşık, düzgün olmayan kayıp fonksiyonunun verimli optimizasyonunu elde etmek için amaç fonksiyonunun Taylor genişlemesini yaklaştırıp optimize eden bir gradyan artırma ağacı algoritmasıdır (Chen & Guestrin, 2016). XGBoost algoritması birkaç karar ağacından (Sınıflandırma ve regresyon ağacı, CART) oluşmaktadır ve XGBoost, CART'ın entegrasyonu ile gerçeleştirildikten sonra tüm karar ağaçlarının tahmin edilen değerleri, modelin tahmin edilen değerlerine

eklenir (Wang & Peng, 2024). XGBoost, veri kümelerini ardışık olarak analiz edildiğinden ve çok düşük bir performans oranıyla sonuçlandırıldığından, esas olarak hesaplama aralığını ve performansını artırmayı hedefler (Dezhkam & Manzuri, 2023). XGBoost Her eğitim turunda, kayıp fonksiyonu ve düzenleme terminalini en az indirmek için bir ağaç oluşturur ve düzenleme terminalini, modelin karmaşıklığını düzenlemek için kullanılır. Düzenlemelerin ağırlığını ayarlayarak, XGBoost modelinin karmaşıklığını korur ve modeli korurken genelleme yeteneğini iyileştirir (Luo, Wang, Gao, Wang, & Pang, 2024). Şekil 1’de XGBoost’un temel mimarisi yer almaktadır.



Şekil 1. XGBoost'un temel mimarisi.

2.2. Hata Performans Metrikleri

2018-2022 yılları arasında 60 aylık rüzgâr enerjisi üretimlerinin tahmin etmek için oluşturulan modelin hata performans metrikleri için belirleme katsayısı (R^2) ortalama karesel hata (MSE) kareler toplamı hatası (SSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) tercih edilmiştir. R^2 bağımsız değişkendeki veya değişkenlerdeki değişikliklerin bağımlı değişkendeki değişikliklere oranıdır (Şenol, 2021). MSE değeri, gerçek değer ile tahmin edilen değerler arasındaki kare farkların ortalamasıdır (Çolak & Çolak, 2024). SSE verilerin gerçek ampirik değerlerinden tahmin edilen değerlerin sapmasıdır (Şenol, Çolak, Elibol, Hassaan, & El Nemr, 2024). MAPE ise tahmin doğruluğunun bir ölçüsünü temsil etmektedir (Şenol, Çolak, & Oda, 2024). Performans metriklerine ait formüller Tablo'1 de sunulmuştur.

Tablo 1. Performans Metrikleri formüller

Performans Metrik	Formül
MSE	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$
SSE	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$
MAPE	$\frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \hat{y}_i }{y_i}$
R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$

2.3. Veri Seti

2018-2022 yılları arasındaki 60 aylık rüzgâr enerjisi üretim verileri Tablo 1'de sunulmuştur (T.E.T.J.S.C., 2024)

Tablo 2. 60 aylık (2018-2022) rüzgâr enerjisi üretimleri (GWh)

Aylar / Yıllar	2018	2019	2020	2021	2022
Ocak	1812	2202	2400	2919	3127
Şubat	1685	1488	2264	2511	2671
Mart	2054	2127	2165	2522	3225
Nisan	1168	1496	2000	2475	2614
Mayıs	1231	1166	1544	2105	2118
Haziran	1258	1724	1280	1553	2924
Temmuz	1429	1973	2663	3052	4213
Ağustos	2355	2668	2476	2635	2786
Eylül	1710	1992	2108	2809	2470
Ekim	1512	1271	1139	2647	3197
Kasım	2060	1357	2338	2634	2978
Aralık	1677	1872	2452	3494	2622

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, Türkiye'deki son 60 aylık rüzgâr enerjisi üretim verileri zaman serisi tahminine uygun hale getirilmiştir. Zaman serisi verileri, özellikle ardışık bağımlılıkları içermesi bakımından tahmin modelleri için büyük önem taşır. Ancak, XGBoost gibi ağaç tabanlı modeller, zaman serisi verilerindeki ardışık bağımlılıkları doğrudan öğrenemediğinden, veriler üzerinde özellik mühendisliği işlemleri yapılmıştır. Bu doğrultuda, geçmiş veri noktalarını modele entegre edebilmek amacıyla "lag" olarak adlandırılan gecikmeli özellikler oluşturulmuştur. Bu çalışmada, geçmiş 3 zaman adımına (lag=3) odaklanılmıştır. Örneğin, belirli bir zaman adımına (örneğin 5. adım) ilişkin veri tahmin edilmek istenirken, model bu tahmini gerçekleştirmek için 2., 3. ve 4. zaman adımlarına ait geçmiş verileri özellik olarak kullanır. Böylece, zaman serisindeki ardışık ilişkiler modelin girişine dahil edilmiş olur. Veri kümesi, XGBoost modeline uygun hale getirilmek üzere `create_lagged_features()` fonksiyonu kullanılarak hazırlanmıştır. Bu fonksiyon, geçmiş 3 zaman adımını yeni özellikler olarak ekler ve tahmin edilmek istenen veri adımını hedef değer olarak belirler. Oluşturulan yeni veri kümesinde, geçmiş 3 zaman adımı giriş (X) olarak tanımlanırken, mevcut zaman adımına ait değer hedef (Y) olarak atanmıştır. Böylece her bir zaman adımı için önceki 3 veri noktası kullanılarak tahmin yapılmıştır. X: geçmiş 3 zaman adımına ait veriler (örneğin: Zaman adımı 2, 3, 4). Y: mevcut zaman adımının hedef değeri (örneğin: Zaman adımı 5). u yapı, modelin geçmiş verilerden öğrenme kapasitesini artırarak zaman serisindeki ardışık ilişkileri etkili bir şekilde kavramasına olanak tanımaktadır. Örneğin, 5. adımda yer alan bir veri için, 2., 3. ve 4. adımlar modelin giriş verileri olarak kullanılır ve 5. adım hedef değer olarak tanımlanır. Bu işlem veri kümesindeki tüm zaman adımları için tekrarlanır. Veri kümesinin bu şekilde düzenlenmesi, modelin zaman serisi verilerindeki ardışık bağımlılıkları daha iyi öğrenmesine ve böylelikle tahmin doğruluğunun artmasına katkı sağlar. XGBoost, regresyon problemlerini çözmek için güçlü bir ağaç tabanlı modeldir. XGBRegressor sınıfını kullanarak zaman serisi verileri üzerinde tahmin yapacak bir model oluşturuldu. Modelin bazı önemli parametreleri şunlardır:

`n_estimators=100`: Modelin oluşturduğu karar ağaçlarının sayısıdır. Burada modelin doğruluğunu artırmak için 100 ağaç kullanıldı. `objective='reg. '`: Regresyon görevleri için kullanılan hata fonksiyonudur. Model, fit fonksiyonu kullanılarak X ve Y verileriyle eğitildi. Bu süreçte, model geçmiş 3 veri adımını kullanarak her zaman adımı için tahminlerde bulundu.

XGBoost modelinin performans sonuçları, tahmin doğruluğunu ve modelin başarımını değerlendirmek için kullanılmıştır. R² değerinin 1 olarak elde edilmesi, modelin mükemmel bir uyum gösterdiğini ve tüm veri noktalarının model tarafından doğru bir şekilde tahmin edildiğini ortaya koymaktadır. MSE değeri ise 4,34E-06 gibi oldukça düşük bir seviyede bulunmuş, bu da modelin tahmin hatasının minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. SSE değeri 0,000247 olarak hesaplanmış olup, bu değer toplam hata miktarının çok düşük

seviyelerde olduğunu göstermektedir. Son olarak, MAPE değeri ise $7,79E-07$ gibi neredeyse sıfıra yakın bir sonuç vermiştir, bu da tahminlerdeki yüzdesel hatanın ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, XGBoost modelinin zaman serisi verileri üzerinde son derece yüksek bir doğrulukla çalıştığını ve tahminlerdeki hata oranlarının çok düşük olduğunu göstermektedir. Bu parametreler, modelin genel performansının etkileyici düzeyde olduğunu ve XGBoost algoritmasının zaman serisi tahminlerinde etkili bir araç olduğunu doğrulamaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. XGBoost modelin hata performans metrikleri.

Performans metrikleri	Değerler
R ²	1
MSE	4,34E-06
SSE	0,000247
MAPE	7,79E-07

Tablo 4'te XGBoost modelin tahminleri yer almaktadır. Değerler incelendiğinde gerçek ve tahmin değerleri model hata performanslarından ötürü aynı değerler olarak bulunmuştur.

Tablo 4. XGBoost modelin tahminleri.

Aylar/Yıllar	2018	2019	2020	2021	2022
Ocak	*	2202	2400	2919	3127
Şubat	*	1488	2264	2511	2671
Mart	*	2127	2165	2522	3225
Nisan	1168	1496	2000	2475	2614
Mayıs	1231	1166	1544	2105	2118
Haziran	1258	1724	1280	1553	2924
Temmuz	1429	1973	2663	3052	4213
Ağustos	2355	2668	2476	2635	2786
Eylül	1710	1992	2108	2809	2470
Ekim	1512	1271	1139	2647	3197
Kasım	2060	1357	2338	2634	2978
Aralık	1677	1872	2452	3494	2622

Modelin bu yüksek doğruluk oranı, zaman serisi verilerinde XGBoost'un güçlü bir tahmin algoritması olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Buna ek olarak, performansın daha da iyileştirilmesi amacıyla geçmişteki daha fazla zaman adımının (lag sayısının) özellik olarak kullanılması, modelin performansını artırabilir. Ayrıca, hiperparametre optimizasyonu ($n_estimators$, max_depth , $learning_rate$ gibi parametreler üzerinde ince ayar yapılması) ile XGBoost modelinden daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bu sonuçlar, doğru yapılandırıldığında XGBoost algoritmasının zaman serisi tahminlerinde etkili bir araç olduğunu doğrulamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'nin son 60 aylık (2018-2022) rüzgâr enerjisi üretim verileri kullanılarak XGBoost algoritması ile geçmiş dönem üretim miktarları tahmin edilmiştir. Yapılan tahminlerde, modelin performansı oldukça yüksek doğrulukla sonuçlanmıştır. R² değerinin 1 olarak elde edilmesi, modelin veriye mükemmel bir uyum sağladığını göstermiştir. MSE, SSE ve MAPE değerlerinin çok düşük seviyelerde çıkması, XGBoost modelinin tahminlerdeki hata oranlarının minimum düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmada, zaman serisi verileri üzerine uygulanan özellik mühendisliği sayesinde geçmiş veri noktalarının (lag) kullanılması, modelin tahmin yeteneğini önemli ölçüde artırmıştır. Model, geçmiş 3 zaman adımını

kullanarak yapılan tahminlerde başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle rüzgâr enerjisi gibi dalgalanmaların yoğun olduğu bir enerji kaynağında, bu tür bir modelin kullanılması, doğru tahminler yapılabilmesi adına büyük önem taşımaktadır.

Bu sonuçlar, XGBoost algoritmasının rüzgâr enerjisi gibi değişken enerji kaynakları için etkili bir tahmin aracı olduğunu göstermektedir. Özellikle enerji yönetimi ve planlama süreçlerinde kullanılabilecek bu tahminler, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli entegrasyonu ve arz-talep dengelerinin sağlanması açısından stratejik bir rol oynayabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, lag sayısının artırılması ve hiperparametre optimizasyonu gibi yöntemlerle modelin performansının daha da iyileştirilebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, XGBoost algoritması zaman serisi tahminlerinde başarılı bir şekilde uygulanabilir ve enerji üretim tahminlerinde güvenilir bir araç olarak kullanılabilir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, enerji yönetimi ve stratejik planlama süreçlerine önemli katkılar sağlayabilecek niteliktedir.

Kaynaklar

- Alkesaiberi, A., Harrou, F., & Sun, Y. (2022). Efficient wind power prediction using machine learning methods: A comparative study. *Energies*, 15(7), 2327.
- Barooni, M., Ghaderpour Taleghani, S., Bahrami, M., Sedigh, P., & Velioglu Sogut, D. (2024). Machine Learning-Based Forecasting of Metocean Data for Offshore Engineering Applications. *Atmosphere*, 15(6), 640.
- Benti, N. E., Chaka, M. D., & Semie, A. G. (2023). Forecasting renewable energy generation with machine learning and deep learning: Current advances and future prospects. *Sustainability*, 15(9), 7087.
- Bin Abu Sofian, A. D. A., Lim, H. R., Siti Halimatul Munawaroh, H., Ma, Z., Chew, K. W., & Show, P. L. (2024). Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage. *Sustainable Development*.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). *Xgboost: A scalable tree boosting system*. Paper presented at the Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining.
- Çolak, H., & Çolak, E. (2024). Türkiye'de Cinsiyete göre Obezite Öncesi Yüzdeleri Dağılımının Yapay Sinir Ağı ve Zaman Serileri ile Tahmini. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1340-1359.
- Dezhkam, A., & Manzuri, M. T. (2023). Forecasting stock market for an efficient portfolio by combining XGBoost and Hilbert–Huang transform. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 118, 105626.
- GWEC. (2021). Global Wind Energy Council. *GWEC*, [Online]. Available: <http://www.gwec.net>.
- Impram, S., Nese, S. V., & Oral, B. (2020). Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey. *Energy strategy reviews*, 31, 100539.
- Jørgensen, K. L., & Shaker, H. R. (2020). *Wind power forecasting using machine learning: State of the art, trends and challenges*. Paper presented at the 2020 IEEE 8th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE).
- Lin, B., & Chen, Y. (2019). Does electricity price matter for innovation in renewable energy technologies in China? *Energy Economics*, 78, 259-266.
- Luo, S., Wang, B., Gao, Q., Wang, Y., & Pang, X. (2024). Stacking integration algorithm based on CNN-BiLSTM-Attention with XGBoost for short-term electricity load forecasting. *Energy Reports*, 12, 2676-2689.
- Mendonça, H. L., & Fonseca, M. V. d. A. (2018). Working towards a framework based on mission-oriented practices for assessing renewable energy innovation policies. *Journal of Cleaner Production*, 193, 709-719.
- Mollick, T., Hashmi, G., & Sabuj, S. R. (2024). Wind speed prediction for site selection and reliable operation of wind power plants in coastal regions using machine learning algorithm variants. *Sustainable Energy Research*, 11(1), 5.
- Popp, D., Hascic, I., & Medhi, N. (2011). Technology and the diffusion of renewable energy. *Energy Economics*, 33(4), 648-662.

- Shabbir, N., AhmadiAhangar, R., Kütt, L., Iqbal, M. N., & Rosin, A. (2019). *Forecasting short term wind energy generation using machine learning*. Paper presented at the 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).
- Sun, Y., Li, Y., Wang, R., & Ma, R. (2024). Modelling potential land suitability of large-scale wind energy development using explainable machine learning techniques: Applications for China, USA and EU. *Energy Conversion and Management*, 302, 118131.
- Şenol, H. (2021). Methane yield prediction of ultrasonic pretreated sewage sludge by means of an artificial neural network. *Energy*, 215, 119173.
- Şenol, H., Çolak, E., Elibol, E. A., Hassaan, M. A., & El Nemr, A. (2024). Optimisation of biochar dose in anaerobic co-digestion of green algae and cattle manure using artificial neural networks and response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 152750.
- Şenol, H., Çolak, E., & Oda, V. (2024). Forecasting of biogas potential using artificial neural networks and time series models for Türkiye to 2035. *Energy*, 131949.
- T.E.T.J.S.C. (2024). Turkish Electricity Transmission Joint Stock Company. <https://www.teias.gov.tr/>.
- TWEA. (2023). Turkish Wind Energy Association. Turkish Wind Energy Statistics Report July 2022. <https://tureb.com.tr/eng/lib/uploads/c7da1763fce81678.pdf>. Accessed August 2023.
- Wang, S., & Peng, H. (2024). Multiple spatio-temporal scale runoff forecasting and driving mechanism exploration by K-means optimized XGBoost and SHAP. *Journal of hydrology*, 630, 130650.
- Xu, Y., Zheng, S., Zhu, Q., Wong, K.-c., Wang, X., & Lin, Q. (2024). A complementary fused method using GRU and XGBoost models for long-term solar energy hourly forecasting. *Expert Systems with Applications*, 124286.
- Yelgeç, M. A., & Bingöl, O. (2024). Wind Power Forecasting With LSTM and Comparison With Different Machine Learning Algorithms: A Case Study of Southwestern Turkey. *Electric Power Components and Systems*, 1-20.
- Yusuff, A. A., & Mosele, T. C. (2024). *Quantification of Strategic Reserve for a Wind Farm Based on a Linear Regression Machine Learning Scheme: A Case Study of Great Kei Local Municipality, South Africa*. Paper presented at the 2024 32nd Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC).



MAKİNE ÖĞRENİMİ İLE TÜRKİYE'NİN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN GELECEĞİ: YSA VE ARIMA MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Halil ŞENOL¹

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3056-5013>

Emre ÇOLAK²

²Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı, Giresun, Türkiye

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0850-2876>

Özet

Bu çalışma, Türkiye'nin elektrik enerjisi talebini karşılamaya yönelik olarak, 2045 yılına kadar olan elektrik üretim tahminlerini Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modellerini kullanarak gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Türkiye'nin hızla artan nüfusu, sanayileşme süreci ve ekonomik büyümesi, enerji talebinde kayda değer bir artışa yol açmaktadır. Bu durum, Türkiye için gelecek yıllarda arz-talep dengesinin korunması açısından uzun vadeli ve güvenilir tahminleri gerekli kılmaktadır. Çalışmada, farklı tahmin yaklaşımlarının performansları karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve modellerin etkinlikleri analiz edilmiştir. YSA modeli, karmaşık veri ilişkilerini yüksek doğrulukla modelleyebilme yeteneğine sahip olup, Levenberg-Marquardt (LM) algoritması ile eğitilmiştir. Bu model, doğrusal olmayan verileri işleme kapasitesi sayesinde, gelecek dönem elektrik üretim tahminlerinde dikkat çekici sonuçlar elde etmektedir. Yapılan analizler sonucunda, YSA modelinin 2045 yılı için Türkiye'nin elektrik üretimini 434,8 TWh olarak öngördüğü belirlenmiştir. Öte yandan, ARIMA modeli geçmiş verilere dayalı olarak $p=2$, $d=1$, $q=1$ parametreleri ile yapılandırılmıştır. ARIMA modelinin 2045 yılı için öngördüğü elektrik üretim değeri ise 547,5 TWh'dir. ARIMA model, özellikle kısa vadeli tahminler için güçlü sonuçlar vermekle birlikte, uzun vadeli ve doğrusal olmayan artışlar karşısında sınırlı esneklik göstermektedir. Her iki modelin performans değerlendirmesi, tahmin doğruluğunu belirlemek amacıyla yapılmıştır. ARIMA modeli, Mean Squared Error (MSE) ve Root Mean Squared Error (RMSE) değerlerinde daha düşük hata oranları sunarak güçlü bir performans sergilemiştir. Buna karşılık, YSA modeli Mean Absolute Percentage Error (MAPE) ve Sum of Squared Errors (SSE) açısından daha düşük hata oranları sağlamış, doğrusal olmayan eğilimlere karşı daha yüksek esneklik göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, YSA ve ARIMA modellerinin uzun vadeli tahminlerde yüksek doğruluk sunduğunu ve gelecekte Türkiye'nin enerji üretiminde ihtiyaç duyulacak kapasitenin tahmin edilmesinde önemli bir rehber olabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, enerji planlamacılarına ve politika yapıcılara, elektrik üretimi ve arz-talep dengesini sağlama sürecinde yol gösterici nitelikte bilgiler sunmaktadır. Her iki modelin güçlü yanları göz önüne alındığında, bu tahminler gelecekte alınacak stratejik kararlar için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik üretimi, makine öğrenmesi, zaman serileri, tahmin yöntemleri

THE FUTURE OF TÜRKİYE'S ELECTRICITY GENERATION WITH MACHINE LEARNING: COMPARATIVE ANALYSIS OF ANN AND ARIMA MODELS

Abstract

This study seeks to project the energy generation required to satisfy Türkiye's electricity demand until 2045 using artificial neural networks (ANN) and autoregressive integrated moving average (ARIMA) models. The swift population growth, industrialization, and economic expansion in Türkiye result in a substantial rise in energy demand. This circumstance requires enduring and dependable projections to sustain the supply-demand equilibrium for Türkiye in the forthcoming years. The study comparatively examines the performances of several estimating methods and analyzes the efficiency of the models. The Levenberg-Marquardt (LM)

algorithm has trained the ANN model to accurately represent intricate data interactions. This model attains exceptional outcomes in forecasting future electricity output due to its ability to analyze nonlinear inputs. The analyses indicate that the ANN model forecasts Türkiye's electricity generation to be 434.8 TWh by 2045. Based on historical data, we set the ARIMA model with parameters $p=2$, $d=1$, and $q=1$. The ARIMA model forecasts the electricity production value for 2045 to be 547.5 TWh. The ARIMA model yields robust outcomes, particularly for short-term predictions, although it demonstrates constrained adaptability to long-term and non-linear growth patterns. The performance assessment of both models was conducted to ascertain forecast accuracy. The ARIMA model demonstrated superior efficacy by yielding reduced error rates in mean squared error (MSE) and root mean squared error (RMSE). On the other hand, the ANN model had lower error rates for both mean absolute percentage error (MAPE) and sum of squared errors (SSE), which showed that it could handle non-linear trends better. The study's results indicate that the ANN and ARIMA models demonstrate outstanding accuracy in long-term forecasting and can serve as a crucial reference for evaluating future energy production capacity requirements in Türkiye. This study offers energy planners and policymakers insights to assist in electricity generation and the equilibrium of supply and demand. Taking into account the advantages of both models, these estimates serve as a crucial foundation for forthcoming strategic decisions.

Keywords: Electricity production, machine learning, time series, forecasting methods

1. Giriş

Nüfus artışı ve buna bağlı kentsel büyüme enerji talebini artırmıştır (Ahmadi et al., 2020). Birinci sınıf bir enerji kaynağı olarak elektrik, tüm büyük enerji tüketen sektörlerde gereklidir (Ang & Su, 2016). Elektrik üretimi yalnızca bir ülkenin kalkınmasını ve büyümesini değil aynı zamanda çevreyi ve insanların yaşam kalitesini de etkiler (Jamil, 2020). Türkiye’de 2022 yılında elektrik üretimi çeşitli kaynaklardan elde edilmiş olup, kömür %34,6 ile en büyük katkıyı sağlarken, bunu %22,2 ile doğal gaz, %20,6 ile hidroelektrik, %10,8 ile rüzgar, %4,7 ile güneş, %3,3 ile jeotermal ve %3,7 ile diğer kaynaklar takip etmiştir (Gulay, Sen, & Akgun, 2024)

Enerji talebi ve arz tahmini önemlidir. Tahmin yanlışlığı enerji ekonomisinde düşüşe ve hatta enerji sisteminde kargaşaya yol açar (Cheng, Zang, Wei, Zhang, & Sun, 2022). Elektrik kolayca depolanmadığından, arz ve talebi dengelemek için kesin tahminler hayati önem taşır (DEKTMK, 2000) Böylelikle tahminler, gelecekteki enerji yönetimi kararlarında etkilidir. Aynı zamanda etkili bir tahmin planlaması, karar almaya yardımcı olmaktadır, hükümetlerin elektrik tüketimindeki dalgalanmaları yönetmesine ve belirsiz koşullar altında istikrarlı, verimli bir enerji tedariki sağlamasına yardımcı olur (Li, Wang, Yang, & Bozkurt, 2024).

Son yıllarda, yapay zekâ teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte makine öğrenimi birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Zhang et al., 2024). Makine öğrenimi, tahmin ve gelecek tahmini için kullanılabilir verilerdeki kalıpları tespit etmek için bilgisayarlardan açık programlama olmadan öğrenme yeteneği sunan bir tekniktir. Makine öğrenimi, gelecekteki veri kümelerinde sonuçları çıkarabilen algoritmalar üretmek için bir veri kümesi ve çıktı kullanır (Schmitz & Sedaghat, 2024). Makine öğreniminin tahmin yöntemleri olan Yapay sinir ağları (YSA), Otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) modellerinin tahminsel hesaplamalarda iyi performans gösterdiği bilinmektedir (Şenol, Çolak, & Oda, 2024). YSA, insan zihninin nörolojik işlevlerini ve beynin mantıksal sistemlerini taklit etmek için tasarlanmıştır (Çolak & Çolak). Zaman serisi verilerini tahmin etmek birçok pratik uygulamada kritik bir görevdir. ARIMA modeli bu görevi ele almak için geliştirilmiştir (Ye, Du, & Wang, 2024).

Literatür çalışmalarında elektrik üretiminin Makine öğrenimi ile tahmin edilmesiyle ilgili birçok çalışma mevcuttur. Madrid ve Antonio (2021) elektrik üretim planı belirlemek amacıyla elektrik yükünü Extreme Gradient Boosting Regressor (XGBoost) algoritması ve k- en yakın komşu (kNN) algoritması, rastgele orman (RF) algoritması, çoklu doğrusal regresyon (MLR), destek vektör regresyonu (SVR) ve ön gönderim tahmini (Pre-Disp) ile tahmin ettiler. Saxena vd., (2024) güneş enerjisinden elektrik üretimi için hibrit KNN-SVM modelini kullandılar. Kamalov vd., (2024) sinirsel temel genişleme analizi (NBEATS) kullanarak elektrik üretimini için tahminde bulundular. Fan vd., (2024) kısa vadeli elektrik üretim yükünü tahmin ettiler ve bunun için Ampirik dalgacık ayrıştırma (EWT), CNN, yinmeli sinir ağı (RNN), LSTM ve Bayes optimizasyon algoritmasını (BOA) tercih ettiler. Ünlü (2019) Türkiye’nin elektrik üretimini SVR, çok katmanlı algılayıcılar (MLP), uzun kısa süreli bellek (LSTM) kullanarak tahmin etti. Piotrowski vd., (2022) rüzgâr enerjisiyle elektrik üretimini tahmini için Gradient-Boosted Trees (GBT), RF, MLP, SVR, kNN, LSTM kullandılar. Gulay

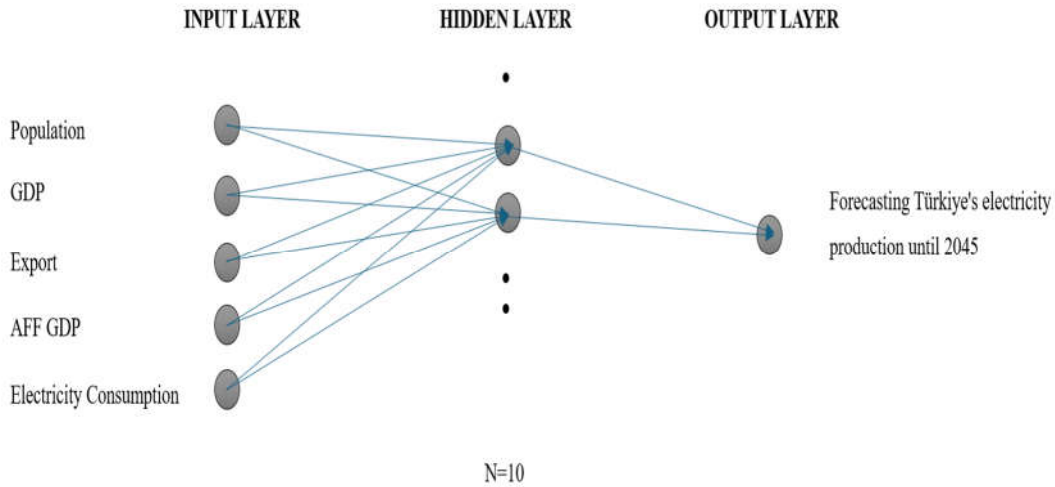
vd., (Gulay et al.) Türkiye için çeşitli kaynaklardan elektrik üretiminin tahminleri için Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (sARIMA), Holt-Winters (HW), durum alanı modeli (ETS), TBATS modeli, YSA, LSTM, evrişimsel sinir ağları (CNN), ayrıştırma yöntemini (STL) tercih ettiler. Şenol vd, (2024) Türkiye için hayvansal atıklardan (sığır türü) üretilebilecek elektrik enerjisini ANN, ARIMA ve doğrusal regresyon (LR) yöntemleriyle gelecek yıllar için tahmin ettiler.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin elektrik üretiminin 2045 yılına kadar olan dönemini, YSA) ve ARIMA modelleri ile tahmin etmektir. Enerji arz-talep dengesi, özellikle elektrik gibi depolanması güç olan bir enerji kaynağı için hayati öneme sahiptir. Doğru tahminler hem enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini sağlamak hem de ekonomik büyümeyi desteklemek açısından büyük bir gerekliliktir. Çalışmanın önemi, Türkiye'nin elektrik üretimi ve talebini uzun vadede öngörebilmesi ve bu doğrultuda hükümetlerin enerji politikalarını daha etkili bir şekilde yönlendirebilmelerine katkı sunabilmesinde yatmaktadır. Bu öngörüler, enerji yatırımlarının planlanmasında, altyapı yatırımlarının optimize edilmesinde ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasında stratejik bir rehber olacaktır. Çalışmanın yeniliği ise, ANN ve ARIMA gibi iki güçlü ve yaygın olarak kullanılan tahmin modelini karşılaştırmalı olarak uygulamamızda yatmaktadır. Bu araştırma, ANN ve ARIMA modellerinin elektrik üretimi tahmininde ne derece etkili olduklarını karşılaştırarak, model seçimlerinde karar vericilere ışık tutacak önemli bulgular sunmayı hedeflemektedir. Özellikle elektrik üretimi ile ilgili yapılacak uzun vadeli tahminler için en uygun modelin seçimi, enerji sektörü için stratejik planlama süreçlerine büyük katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, çalışma hem teorik hem de uygulamalı açıdan enerji sektörü için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

2. Teorik Metot

2.1. Yapay Sinir Ağları (YSA):

YSA, insan beyni gibi öğrenerek yeni bilgiler üretmek, oluşturmak ve keşfetmek üzere tasarlanmış bilgisayar bilişim sistemleridir. YSA'nın yapısını oluşturan üç bileşen vardır. Bunlar; nöron, bağlantılar ve öğrenme algoritmasıdır. (Çolak & Çolak). YSA, tek bir sinir hücresinin yapısının özelliklerine dayanarak birkaç sinir hücresinin birleştirilmesiyle oluşur (Şenol, Dereli, & Özbilgin, 2021). Nöronlara verilen her girdinin alaka düzeyi eşit olmadığından, her bir girdiye farklı ağırlıklar atanır, ardından bir önyargıyı ve ağırlıklı girdileri toplamak için doğrusal bir net fonksiyon kullanılır, ardından nöronun çıktısını elde etmek için bir transfer fonksiyonu uygulanır ve bu çıktı bir sonraki nörona aktarılır (Çolak & Çolak). Çalışmada aktivasyon transfer ve tanjant sigmoid fonksiyonu tercih edilmiştir. Bunun nedeni ise tanjant sigmoid fonksiyonunun doğrusal olmayan davranışları tahmin edebilmesidir (Şenol et al., 2021). Elektrik üretimini 2045 yılına kadar tahmin edilmesi için yapılan model de 5 girdi kullanılmıştır. Bunlar: nüfus, GSYH, ihracat, tarım-orman-balıkçılık GSYH (TOB GSYH) ve elektrik tüketimidir. Gizli nöron sayısı ise deneme yanılma yöntemiyle 10 olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Veri seti için kümelendirme oranı %70, %15, %15 şeklinde ayrılmıştır. Eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt (LM) seçilmiştir.



Şekil 1. Yapay Sinir Ağı Mimarisi 5-10-1

2.1.1. Hassasiyet Analizi

YSA için yapılan tahmin modelinde girdi değişkenlerinin çıktı değişkeni üzerindeki etkisini belirlemek için Garson algoritması ve Yoon algoritması tercih edilmiştir.

2.1.1.1. Garson Algoritması

Garson algoritması giriş ve çıkış katmanları arasındaki ağırlık dağılımını belirlemek, giriş sinyallerinin çıkış üzerindeki önemini belirlemeye yardımcı olur ve giriş ile çıkış katmanları arasındaki ağırlıkları çıkararak giriş değişkenlerinin etkisini veya göreceli katkısını hesaplar (Denklem 1) (Ma, Mi, Yang, Sun, & Liu, 2024).

$$RI(\%)_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m ((W_{ij} / \sum_{i=1}^n |W_{ij}|) x |W_{jk}|)}{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m ((|W_{ij}| / \sum_{i=1}^n |W_{ij}|) x |W_{jk}|))} \times 100 \quad (1)$$

RI, girdi değişkenlerinin göreceli anlamlılığını ifade ederken, W_{ij} ve W_{jk} sırasıyla girdi katmanı ile gizli katman arasındaki ve gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki bağlantıların ağırlıklarını belirlemektedir.

2.1.1.2. Yoon Algoritması

Yoon algoritması ANN modellerinde girdi değişkenlerinin çıktı değişkeni üzerindeki göreceli önemini (RI) belirlemek, yani ağdaki her girdi değişkeninin RI'sini belirlemek için seçildi. Yoon algoritması bir girdi değişkeninin diğerine oranını tanımlar ve mutlak değer almadan katkının yönünü hesaba katar (Denklem 2) (da Costa, de Lima, & Barbosa, 2021).

$$RI(\%)_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^h W_{ij} v_{jk}}{\sum_{i=1}^m |\sum_{i=1}^h W_{ij} v_{jk}|} \times 100 \quad (2)$$

W_{ij} , giriş ünitesi i ile gizli ünite j arasındaki bağlantı ağırlığını temsil ederken, W_{jk} , gizli ünite j ile çıkış ünitesi k arasındaki bağlantı ağırlığını belirtir.

2.2. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA)

Zaman serisi veri analizinde kullanılan en yaygın modellerden biri, farklı zaman serisi veri modellerini kapsayan Box-Jenkins tabanlı ARIMA modelidir (Şenol, Çakır, Bianco, & Görgün, 2024). Zaman serisi verilerinin çoğu durağan değildir. Ancak ARIMA modeli yalnızca durağan zaman serilerine atıfta bulunur (Yasmin & Moniruzzaman, 2024). ARIMA modeli, entegrasyon filtresi (I) ile otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) bileşenlerinin bir kombinasyonudur (Guerra, Vizziello, Savazzi, Goldoni, & Gamba, 2024). ARIMA (p, d, q) olarak ifade edilebilmektedir. Ve, 'p' otoregresif süreçlerin sırasını, 'd' farkın sırasını ve 'q' hareketli ortalama sürecinin sırasını temsil eder (Çolak & Çolak). Otoregresif süreç, korelasyon katsayısı ile temsil edilen AR fonksiyonunu hesaplamak için mevcut ve önceki verilerin kullanılmasını içerir. ARIMA modellemesindeki ilk adım, karşılaştırılabilir sıralara sahip olası modelleri belirlemeyi amaçlayan zaman serisi verilerinin otokorelasyon fonksiyonunu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonunu (PACF) incelemektir oluşur ve bunlara göre p,d,q değerleri belirlenir (Siddique et al., 2024).

2.3. Model Hata Performans Metrikleri

Türkiye'de Elektrik üretiminin 2045 yılına kadar tahmini için YSA ve ARIMA ile yapılan modellerin hata performanslarını belirlemek için korelasyon katsayısı (R^2), mean squared error (MSE), root mean square error (RMSE), ve squared estimate of errors (SSE), mean absolute percentage error (MAPE) tercih edilmiştir. Hata metriklerinin formülleri Denklem 3, 4, 5, 6 ve 7' de sunulmuştur

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$$

(4)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

(5)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

(6)

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}$$

(7)

Verilen denklemlerde gerçek \hat{Y}_i değeri, y_i beklenen değeri ve n gözlem sayısını ifade etmektedir.

2.4. Tahminler için Kullanılan Veri Seti

Çalışmada kullanılan TÜİK (TÜİK, 2024), TİM (TİM, 2024), DrDataStats (DrDataStat, 2024) ve TEİAŞ (TEİAŞ, 2024) verilerince yapılan veri seti Tablo 1’de sunulmuştur.

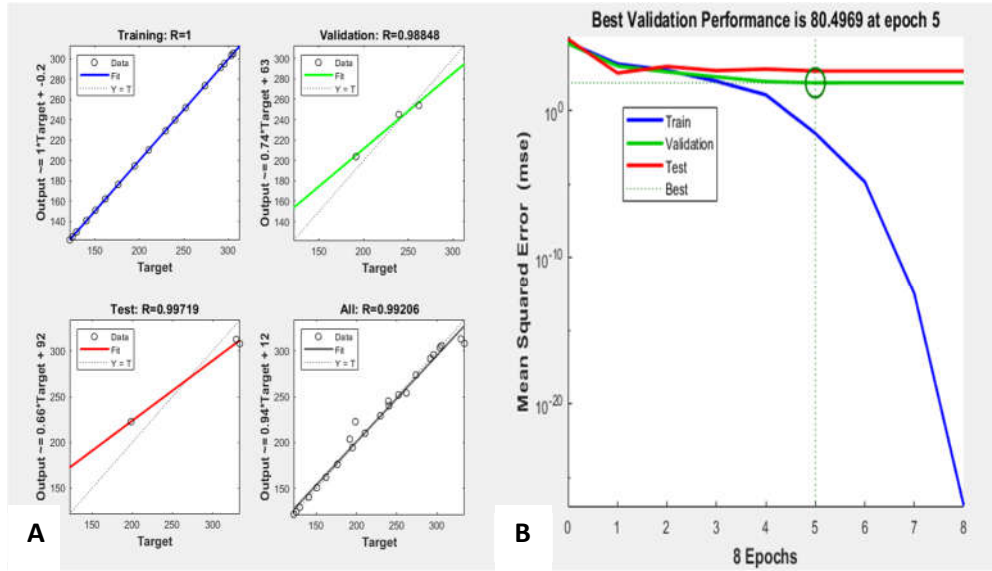
Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri setleri.

Yıl	Nüfus (10 ⁶)	GSYH (Dolar) (10 ⁹)	İhracat (Dolar) (10 ⁹)	TOB GSYH (TL) (10 ⁹)	Elektrik Tüketimi (TWh)	Elektrik Üretimi (TWh)
2002	67,8	358	36,1	37	132,6	129,4
2003	68,6	404	47,3	39,8	141,2	140,6
2004	67,3	489	63,1	45,9	150	150,7
2005	68,1	576	73,5	52,7	160,8	162
2006	69	660	85,5	56,6	174,6	176,3
2007	69,9	760	107,3	60,3	190,0	191,6
2008	70,8	778	132	67,2	198,4	198,4
2009	71,8	617	102,1	67,5	194,8	194,8
2010	73	731	113,9	75,3	210,4	210,4
2011	74	774	134,9	83,2	229,4	229,4
2012	75	880	152,5	92,0	239,5	239,3
2013	75,9	950	151,8	102,3	245,5	240,2
2014	76,8	935	157,6	106,2	255,5	252
2015	78	861	143,8	114,5	265,7	261,8
2016	79	863	142,5	123,9	278,3	273,6
2017	78,8	857	157	135,0	292,2	295,5
2018	81,2	797	167,9	148,3	294,9	303,4
2019	82,3	761	180,8	162,0	290,9	291,6
2020	82,8	720	169,5	175,2	292,2	305,4
2021	83,9	806	225,4	187	327,0	329,6
2022	85,3	900	254,2	195	334,7	334

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Türkiye’nin 2045 Yılına kadar ki Elektrik Üretiminin YSA ile Tahmini

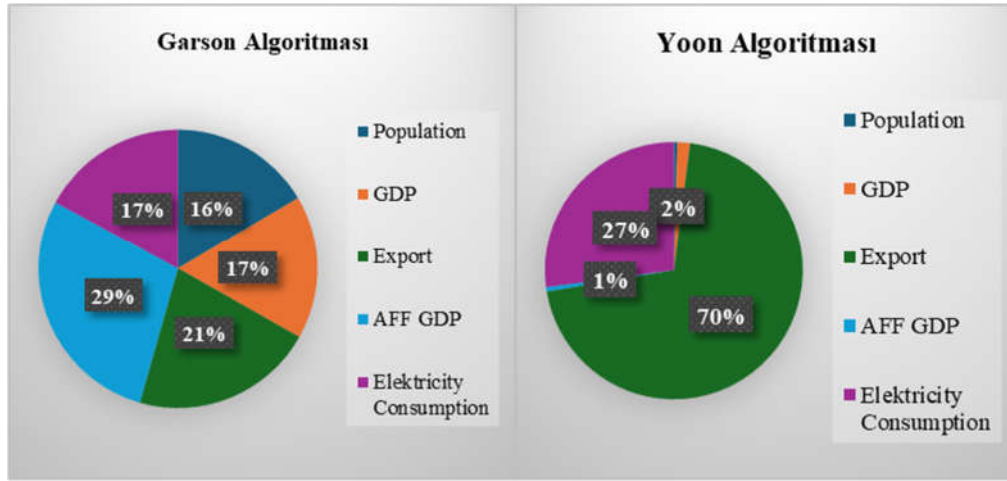
5-10-1 mimari ağı ile yapılan tahminleme de Matlab R2019 programı kullanılmıştır. LM algoritmasıyla yapılan modelde genel regresyon sayıları sırasıyla eğitim doğrulama test ve genel regresyon sayısı $R^2= 1,00000$, $R^2= 0,98848$, $R^2= 0,99719$ ve $0,99206$ olarak bulunmuştur. 8 iterasyon boyunca MSE değeri en düşük 5. iterasyonda sağlanmıştır ve buradaki değerlere göre model tahminlenmiştir (Figure 2).



Şekil 2. Yapay sinir ağı modelinin regresyon grafikleri (A) ve MSE grafiği (B).3.1.1. Hassasiyet Analizi

Garson ve Yoon algoritmaları ile yapılan analiz sonuçları Şekil 3'te yer almaktadır. Garson algoritması kullanılarak ANN model üzerinden Türkiye'nin 2045 yılına kadarki elektrik üretimini etkileyen faktörler sonucunda 'Tarım, Ormanlık ve Balıkçılık' sektörünün (%28,5) en büyük etkiye sahip değişken olduğu ortaya koymuştur. Bu, özellikle biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki önemini vurgulamaktadır. İkinci en önemli faktör olarak 'İhracat' (%21,2) öne çıkmış ve ihracattaki artışın elektrik üretimi talebini önemli ölçüde artıracığı anlaşılmıştır. 'Elektrik Tüketimi' (%17,1), artan talebin doğrudan üretim ihtiyacını etkileyen bir faktör olduğunu göstermiştir. 'GSYH', (%16,7) genel ekonomik büyüme ile birlikte enerji talebini tetikleyen önemli bir değişken olarak belirlenmiştir. Son olarak, 'Nüfus' (%16,5), artan nüfusla birlikte enerji talebinin artmasına ve elektrik üretim altyapısının geliştirilmesi gerekliliğine işaret etmektedir. Bu analiz, Türkiye'nin gelecekteki elektrik üretim stratejilerinde dikkate alınması gereken en önemli unsurları ortaya koymaktadır.

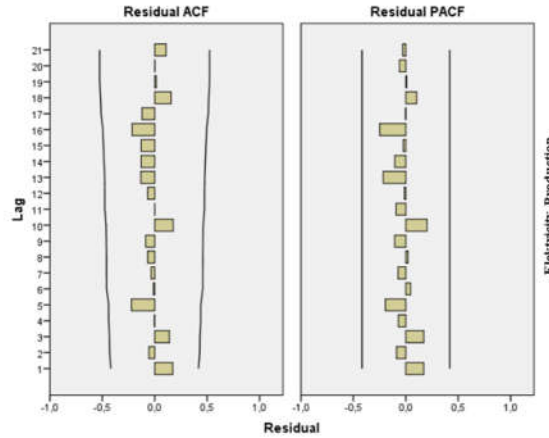
Yoon algoritması sonuçlarına göre, Türkiye'nin 2045 yılına kadarki elektrik üretimini tahmin eden modelde en önemli girdinin İhracat (%70,32) olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, Türkiye'nin ihracatında yaşanacak artışların enerji talebi ve dolayısıyla elektrik üretiminde belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. İhracatın, ülkedeki ekonomik büyüme ve sanayi üretimi ile doğrudan ilişkili olduğu, bu nedenle elektrik üretim kapasitesini büyük oranda etkilediği görülmektedir. İkinci önemli faktör olarak Elektrik Tüketimi (%27,11) öne çıkmaktadır. Bu durum, enerji tüketimindeki artışların gelecekteki üretim tahminlerinde kritik bir role sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek elektrik tüketimi, üretimin artırılmasına yönelik önlemlerin alınması gerektiğine işaret etmektedir. Diğer girdiler olan GSYH (%1,58), TOB GSYH'deki Payı (%0,55) ve Nüfus (%0,45) ise model üzerinde çok daha az etkiye sahip faktörler olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, elektrik üretimi açısından ekonomik büyüme ve demografik değişimlerin doğrudan bir etki yaratmadığını, ancak dolaylı etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, Türkiye'nin elektrik üretiminde ihracatın en önemli belirleyici olduğunu ve bu alandaki büyümelerin enerji politikalarına yön vermesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Yapay Sinir Ağı modelinin hassasiyet analiz sonuçları.

3.2. Türkiye'nin 2045 Yılına kadar ki Elektrik Üretiminin ARIMA ile Tahmini

SPSS 23 programı ile ARIMA model için verilerin ACF ve PACF grafiklerine bakılarak en iyi p,d,q değerlerinin 2,1,1 olduğu belirlenmiştir. BIC değerine bakıldığında 4,186 değerine sahiptir. Şekil 4' te oluşturulan modelin ACF ve PACF grafiği yer almaktadır.



Şekil 4. ARIMA modelinin ACF ve PACF grafiği.

3.3. Modeller Hata Performans Ölçümleri Sonuç

ANN ve ARIMA model için yapılan hata performans metrik sonuçları Tablo 2'de yer almaktadır. ANN ve ARIMA modellerinin hata performans metriklerine bakıldığında, her iki modelin de oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. ANN modelinin MSE değeri 77,5 olup, RMSE ise 8,8'dir. SSE 202,5 ile ANN modelinde daha düşük bir hata birikimine işaret ederken, MAPE 1,7 ile tahminlerin oldukça isabetli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ANN modelinin R^2 değeri 0,9980 olarak hesaplanmış ve bu, modelin tahminlerindeki yüksek doğruluğu vurgulamaktadır. Diğer yandan, ARIMA modelinin performansına baktığımızda, MSE değeri 37,5 ile ANN'e göre daha düşük bir hata oranı gösterirken, RMSE değeri 6.1 ile daha düşük bir kök hata değeri sunmaktadır. Ancak ARIMA modelinde SSE değeri 862,6 ile ANN'e kıyasla daha yüksektir. MAPE değeri 2,3 ile ARIMA modeli de oldukça iyi bir performans sergilemektedir. ARIMA modelinin R^2 değeri ise 0,9993 olarak, modelin mükemmel yakın bir uyum sağladığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, her iki model de yüksek doğrulukla çalışsa da ARIMA modelinin özellikle R^2 ve MSE açısından daha iyi bir performans sergilediği söylenebilir. Öte yandan ANN modeli, daha düşük bir SSE ve MAPE değerine sahip olup tahminlerdeki hata oranını minimize etme konusunda avantajlıdır.

Table 2. Error metric performances of models

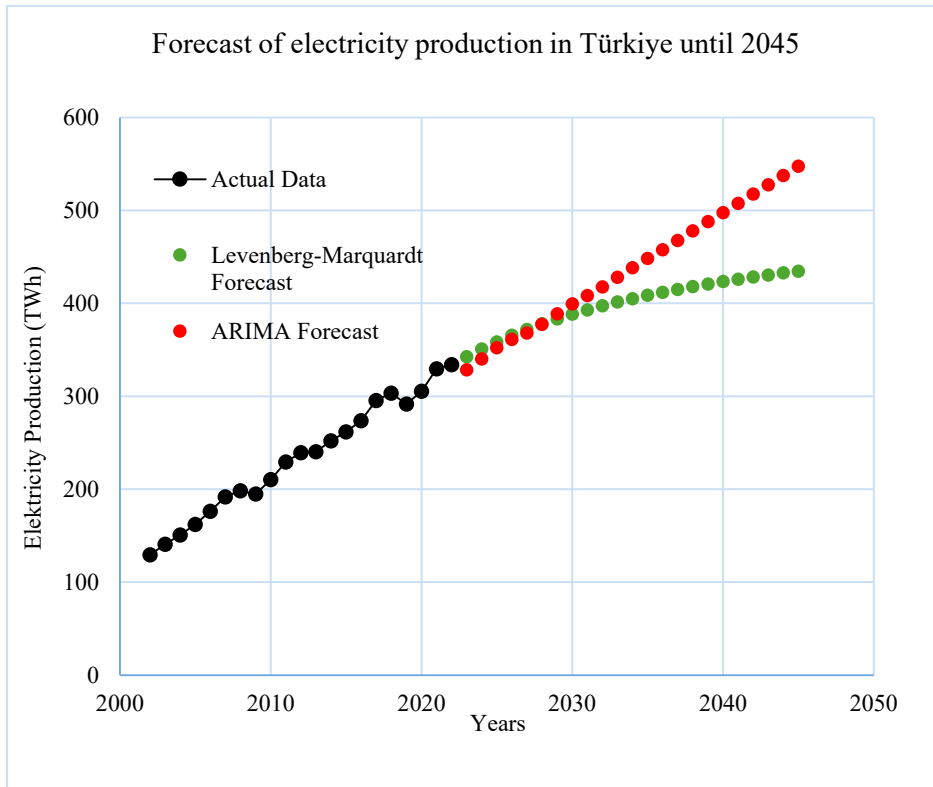
Models/ Metrics	MSE	RMSE	SSE	MAPE	R ²
ANN	77,5	8,8	202,5	1,7	0,9980
ARIMA	37,5	6,1	862,6	2,3	0,9993

3.4. Türkiye'nin Elektrik Üretimini 2045 Yılına kadar Tahmini ve Kıyaslanmalı Analizi

Şekil 5 'te yer alan grafikte gerçek değerler ile (2002-2022) tahmin değerleri (2023-2045) yer almaktadır. Grafikte, Türkiye'nin 2002-2022 yılları arasındaki elektrik üretim verileri gerçek değerler olarak gösterilmiş ve 2023-2045 dönemi için yapay sinir ağları (ANN) ve ARIMA modelleri kullanılarak tahminler yapılmıştır. Gerçek verilere bakıldığında, 2002 yılından itibaren elektrik üretiminde istikrarlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu eğilim, Türkiye'nin elektrik üretim kapasitesinde sürekli bir büyüme trendi izlediğini göstermektedir.

2023-2045 dönemi için yapılan tahminlerde ise ANN ve ARIMA modelleri arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Levenberg-Marquardt algoritması ile tahmin edilen ANN modeli, 2023'ten itibaren daha ılımlı ve dengeli bir büyüme öngörmektedir. ANN tahminleri, daha muhafazakâr bir yaklaşım sergileyerek gelecekteki elektrik üretim artışını nispeten daha düşük seviyelerde tahmin etmiştir. Buna karşın, ARIMA modeli 2023'ten itibaren daha hızlı ve daha büyük bir artış öngörmektedir. ARIMA tahminlerine göre elektrik üretimi, ANN modeline kıyasla daha agresif bir büyüme trendi izleyecektir. Sonuç olarak Türkiye'de elektrik üretimi 2045 yılında ARIMA model 547,5 TWh iken ANN modele göre 434,8 TWh olacaktır.

Bu iki modelin projeksiyonları, Türkiye'nin elektrik üretiminin geleceği hakkında farklı perspektifler sunmaktadır. ANN modeli, daha istikrarlı bir büyüme beklentisi ortaya koyarken, ARIMA modeli hızlı bir artış öngörmektedir. Her iki tahmin de kendi içinde tutarlı olmakla birlikte, Türkiye'nin gelecekteki enerji politikalarının ve üretim kapasitesinin gelişimine bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabilir.

**Şekil 5.** Türkiye'nin elektrik üretim tahmini ve karşılaştırmalı grafiği

4. Sonuç

Bu çalışma, Türkiye'nin elektrik üretiminin 2045 yılına kadar olan dönemi için Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modelleri kullanılarak yapılan tahminleri karşılaştırmalı bir şekilde sunmuştur. Elektrik üretimi gibi stratejik öneme sahip bir alanda doğru tahminler yapmak, enerji arz-talep dengesini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Çalışma kapsamında kullanılan iki modelin performanslarına baktığımızda, her iki modelin de yüksek doğrulukla çalıştığı görülmüştür.

YSA modelinin sonuçlarına göre Türkiye'nin 2045 yılında elektrik üretimi yaklaşık 434,8 TWh olarak tahmin edilmiştir. YSA modelinde daha ılımlı bir büyüme öngörülmekte olup, daha muhafazakâr bir tahmin sunduğu gözlemlenmiştir. Bu modelde yapılan hata performans analizleri, özellikle SSE ve MAPE açısından daha düşük hata oranları sunarak, tahminlerdeki isabet oranının yüksek olduğunu göstermiştir.

Buna karşılık, ARIMA modeli 2045 yılında elektrik üretiminin 547,5 TWh'ye ulaşacağını öngörmektedir. ARIMA modeli, YSA'ya kıyasla daha hızlı ve agresif bir büyüme tahmini yapmış olup, özellikle R² ve MSE değerleri açısından YSA modelinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak SSE açısından daha yüksek hata birikimine sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, ANN modeli Türkiye'nin elektrik üretimi için daha dengeli ve sürdürülebilir bir büyüme öngörüsünde bulunurken, ARIMA modeli ise hızlı bir artış öngörmekte ve gelecekteki üretimin daha agresif bir şekilde artacağını tahmin etmektedir. Bu iki modelin sonuçları, Türkiye'nin enerji stratejilerinde farklı yaklaşımların benimsenmesine yönelik önemli ipuçları sunmakta ve uzun vadeli enerji politikalarının belirlenmesinde katkı sağlayacak değerli öngörüler sunmaktadır. Her iki modelin de doğruluk oranı yüksek olmakla birlikte, enerji talep yönetimi ve yatırım planlaması süreçlerinde bu modellerin kıyaslanarak kullanılması, daha isabetli kararların alınmasına yardımcı olacaktır.

Kaynaklar

- Aguilar Madrid, E., & Antonio, N. (2021). Short-term electricity load forecasting with machine learning. *Information*, 12(2), 50.
- Ahmadi, A., Assad, M. E. H., Jamali, D., Kumar, R., Li, Z., Salameh, T., . . . Ehyaei, M. (2020). Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122950.
- Ang, B. W., & Su, B. (2016). Carbon emission intensity in electricity production: A global analysis. *Energy Policy*, 94, 56-63.
- Cheng, L., Zang, H., Wei, Z., Zhang, F., & Sun, G. (2022). Evaluation of opaque deep-learning solar power forecast models towards power-grid applications. *Renewable Energy*, 198, 960-972.
- Çolak, H., & Çolak, E. Türkiye'de Cinsiyete göre Obezite Öncesi Yüzdeleri Dağılımının Yapay Sinir Ağı ve Zaman Serileri ile Tahmini. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1340-1359.
- da Costa, N. L., de Lima, M. D., & Barbosa, R. (2021). Evaluation of feature selection methods based on artificial neural network weights. *Expert Systems with Applications*, 168, 114312.
- DEKTMK. (2000). *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi*. <https://www.worldenergy.org.tr/>.
- DrDataStat. (2024). DrDataStat. www.drdatastats.com.
- Fan, G.-F., Han, Y.-Y., Li, J.-W., Peng, L.-L., Yeh, Y.-H., & Hong, W.-C. (2024). A hybrid model for deep learning short-term power load forecasting based on feature extraction statistics techniques. *Expert Systems with Applications*, 238, 122012.
- Guerra, R. R., Vizziello, A., Savazzi, P., Goldoni, E., & Gamba, P. (2024). Forecasting LoRaWAN RSSI using weather parameters: A comparative study of ARIMA, artificial intelligence and hybrid approaches. *Computer Networks*, 243, 110258.
- Gulay, E., Sen, M., & Akgun, O. B. (2024). Forecasting electricity production from various energy sources in Türkiye: a predictive analysis of time series, deep learning, and hybrid models. *Energy*, 286, 129566.
- Jamil, R. (2020). Hydroelectricity consumption forecast for Pakistan using ARIMA modeling and supply-demand analysis for the year 2030. *Renewable Energy*, 154, 1-10.

- Kamalov, F., Sulieman, H., Moussa, S., Avante Reyes, J., & Safaraliev, M. (2024). Powering Electricity Forecasting with Transfer Learning. *Energies*, 17(3), 626.
- Li, X., Wang, Z., Yang, C., & Bozkurt, A. (2024). An advanced framework for net electricity consumption prediction: Incorporating novel machine learning models and optimization algorithms. *Energy*, 296, 131259.
- Ma, Y., Mi, J., Yang, X., Sun, Z., & Liu, C. (2024). *Prediction model and sensitivity analysis of ultimate drift ratio for rectangular reinforced concrete columns failed in flexural-shear based on BP-Garson algorithm*. Paper presented at the Structures.
- Piotrowski, P., Baczyński, D., Kopyt, M., & Gulczyński, T. (2022). Advanced ensemble methods using machine learning and deep learning for one-day-ahead forecasts of electric energy production in wind farms. *Energies*, 15(4), 1252.
- Saxena, N., Kumar, R., Rao, Y. K., Mondloe, D. S., Dhapekar, N. K., Sharma, A., & Yadav, A. S. (2024). Hybrid KNN-SVM machine learning approach for solar power forecasting. *Environmental Challenges*, 14, 100838.
- Schmitz, F., & Sedaghat, S. (2024). Diagnostic Value of Magnetic Resonance Imaging Radiomics and Machine-learning in Grading Soft Tissue Sarcoma: A Mini-review on the Current State. *Academic Radiology*.
- Siddique, M. A. B., Mahalder, B., Haque, M. M., Shohan, M. H., Biswas, J. C., Akhtar, S., & Ahammad, A. S. (2024). Forecasting of tilapia (*Oreochromis niloticus*) production in Bangladesh using ARIMA model. *Heliyon*, 10(5).
- Şenol, H., Çakır, İ. T., Bianco, F., & Görgün, E. (2024). Improved methane production from ultrasonically-pretreated secondary sedimentation tank sludge and new model proposal: Time series (ARIMA). *Bioresource technology*, 391, 129866.
- Şenol, H., Çolak, E., & Oda, V. (2024). Forecasting of biogas potential using artificial neural networks and time series models for Türkiye to 2035. *Energy*, 131949.
- Şenol, H., Dereli, M. A., & Özbilgin, F. (2021). Investigation of the distribution of bovine manure-based biomethane potential using an artificial neural network in Turkey to 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111338.
- TEİAŞ. (2024). Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi. www.teias.gov.tr.
- TİM. (2024). Türkiye İhracatçılar Meclisi www.tim.org.tr.
- TÜİK. (2024). Türkiye İstatistik Kurumu. www.tuik.gov.tr.
- Ünlü, R. (2019). A comparative study of machine learning and deep learning for time series forecasting: a case study of choosing the best prediction model for Turkey electricity production. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 635-646.
- Yasmin, S., & Moniruzzaman, M. (2024). Forecasting of area, production, and yield of jute in Bangladesh using Box-Jenkins ARIMA model. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101203.
- Ye, L., Du, P., & Wang, S. (2024). Industrial carbon emission forecasting considering external factors based on linear and machine learning models. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140010.
- Zhang, L., Huang, M., Liu, C., Du, Z., Cui, T., & Guo, X. (2024). Problem-Independent Machine Learning-enhanced structural topology optimization of complex design domains based on isoparametric elements. *Extreme Mechanics Letters*, 102237.

FOUNDATIONS OF OFFSHORE WIND FARMS: HISTORICAL DEVELOPMENTS AND FUTURE OUTLOOK**Zeynep H. OZKUL BIRGOREN, PhD, PE**

Assist. Prof., Ankara Yildirim Beyazit University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering Department, Ankara-Türkiye, ORCID: 0000-0002-9500-886X

Yavuz Selim DEMIREL

Civil Engineer, Ankara Yildirim Beyazit University, Institute of Science, Civil Engineering Department, Ankara-Türkiye (Responsible Author), ORCID: 0009-0005-4143-7692

Abstract

Wind energy plays a pivotal role in addressing global energy demands, as concerns for the environment necessitate the replacement of increasingly larger percentages of fossil fuels with renewable energy sources. This paper examines the historical development and future potential of wind energy, particularly in the context of offshore wind farms (OWFs). The transition from onshore to offshore wind energy brings with it new challenges that must be overcome. Among the many advances and design needs in OWF technology, the design of the turbine foundations is paramount. It is both technically challenging (due to the complex loading regime) and financially challenging (since a significant portion of project costs are foundation-related). The geotechnical design of these structures can benefit from experience gained from offshore oil and gas facilities. This study reviews the viable offshore foundation types, both fixed and floating. The study also reviews the innovative potential future foundation types proposed in the literature. A table of OWFs that have been constructed to date and those that are currently in the planning phase is presented. The use of different design methods, such as limit equilibrium (LE), upper bound plastic limit analysis (PLA), and finite element analysis (FEA), in the design of offshore wind turbine foundations is reviewed. In this context, several design aids specifically developed to optimize the deep foundation design process are presented: the 'Suction Caisson Analysis Under Inclined Load' (FALL16), a macro-based spreadsheet tool, and the 'Web Apps for Engineers', a browser-based tool. This paper discusses current options and challenges associated with the design of foundations for OWFs.

Keywords: Renewable Energy, Offshore Wind Farms (OWFs), Offshore Geotechnics, Offshore Foundation Design, Mooring Systems, Anchors.

Introduction

Offshore wind energy has the potential to revolutionize the energy sector, as the demand for renewable energy sources to replace fossil fuels increases. Advancements in wind energy technology have significantly reduced costs and increased large-scale installations. Onshore wind farms currently dominate the sector, generating approximately nine times more energy than offshore wind farms (OWFs). However, interest in offshore wind energy is rapidly increasing, especially in regions with abundant wind resources that promise long-term energy supply (GWEC, 2024). The Paris Agreement's target of achieving 2000 GW of global offshore wind capacity aligns with the projected parity of onshore and offshore wind farms by 2050 (DNV-ETO, 2024).

The development of new methodologies and aids for the design of offshore wind turbines is supporting the increasing recognition of offshore wind as a competitive and viable energy source on an international scale. Advances in design techniques, particularly in turbine foundation design, are driving cost reductions and improving efficiency. Factors driving cost reduction in the offshore wind sector include supportive policy and regulatory frameworks, competitive auctions, economies of scale, availability of cheap capital, and technology innovation in turbine size and efficiency. From a foundation perspective, the development of improved methods and aids in offshore wind turbine design has driven cost reduction, resulting in streamlined design processes, optimized material usage, and reduced installation costs, thereby contributing to the broader economic viability of offshore wind energy (Rhodri James, 2018).

Offshore wind energy presents new challenges in foundation design, particularly in turbine foundations. These foundations are dynamically sensitive structures, requiring precise and multidisciplinary approaches. The process integrates various disciplines, including aerodynamics, machine engineering, hydrodynamics, structural engineering, material science, and geotechnical engineering. Geotechnical engineers significantly contribute to the design of offshore wind turbines through integrated load analyses, foundation design, and design verification. They estimate foundation responses to ensure alignment with structural and environmental loads, address various limit states to maintain stability under offshore conditions, and monitor the foundation's response and validate assumptions with field measurements. This process closes the gap between predictions and real-world performance, ensuring the reliability of offshore wind turbines (Skau et al., 2018). Despite advancements, discrepancies between theoretical predictions and field measurements persist, emphasizing the need for ongoing innovation. Leveraging expertise from the offshore oil and gas sector, such as suction piles and drag anchors, geotechnical engineering methods have evolved to address these challenges effectively. Before developing foundation systems, evaluating critical features of pile and soil behavior under complex offshore conditions is essential. The sustainable development of OWFs underscores the necessity of continued advancements in foundation design, meeting the growing global demand for renewable energy sources and driving the economic feasibility of offshore wind projects (Gourvenec et al., 2022).

This paper reviews the historical development and future perspectives of OWFs, with a focus on foundation types, design methods, and the role of design aids in optimizing foundation design procedures. By addressing the technical challenges, such as complex loading regimes, this study highlights the pivotal role of future and advanced engineering solutions in ensuring the sustainable growth of offshore wind energy.

Offshore Wind Farm Development: Past and Future Projects

The history of wind energy dates back to the sixth century BC, when the Persians constructed the earliest known wind-powered turbines to grind grain, pump water, and press oil. In 1885, the first onshore wind turbine, the windmill, was built in Askov, Denmark, to generate electricity. Prof. Dr. William E. Heronemus developed concepts for OWFs, leading to the construction of the world's first offshore wind turbine in Sweden in 1990. The Nogersund Turbine, located 250 meters off Nogersund in 6 meters of water, was built as a test turbine to examine environmental and operational factors. In 1991, the first large commercial OWF was constructed at Vindeby, Denmark, using gravity base foundations. Since then, offshore electricity generation from wind energy has rapidly expanded. The Netherlands followed Denmark in developing OWFs; it built its first OWF at Lely in 1994. The Lely Project opted for monopiles, which require more powerful machinery for installation (Nikolaos, 2004). The offshore wind industry has shifted toward floating foundations due to their lower installation, maintenance, and decommissioning costs. These structures, such as suction or plate anchors, are easier to install in deep waters, which make up a significant portion of the world's oceans and present significant energy opportunities for countries. The first floating wind farm was constructed in 2017 by the Hywind Scotland Project in Peterhead, Scotland. Currently, joint industry projects are conducting research and development on the dynamic interaction between the seabed, foundation, and turbine for floating foundation systems. These projects are carried out in collaboration with academia. This collaboration ensures the continued development of floating foundation systems in offshore installations and plays a crucial role in advancing the field of offshore wind energy (Gourvenec, 2024).

Numerous pioneering projects have marked the development of OWFs, shaping technical and engineering advancements in the field. Table 1 (Milestones in OWF Development), created as part of the Time Capsule Project initiated by the Offshore Geotechnics Technical Committee (TC209) under the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), documents and highlights historically significant projects that have contributed to the evolution of OWFs. It serves as a valuable resource, providing insight into key developments that continue to shape the future of offshore wind energy.

Table 1. Milestones (Pioneering Projects) in OWFs Development (*Offshore Geotechnics Technical Committee page*)

Wind Farm	Number of Wind Turbine	Gross Capacity (MW)	Year	Location	Water Depth (m)	Foundation Type	Comments
Nogersund Svante 1	1	0.22	1990	Sweden	6	Tripods	The world's first offshore wind turbine / Decommissioned in 2008
Vindeby	11	4.95	1991	Denmark	4	Gravity Based	The world's first commercial offshore wind farm / Decommissioned in 2017
Lely	4	2	1994	Holland	3-4	Monopile	The first monopile/ Decommissioned in 2016
Bockstigen	5	2.5	1998	Sweden	5-6	Monopile	A demonstration project with drilled monopiles
Utgrunden	7	10	2000	Sweden	6-15	Monopile	Decommissioned in 2018
Yttre Stengrund	5	10	2001	Sweden	6-8	Monopile	The world's first offshore wind farm to be decommissioned (in November 2015)
Horns Rev 1	80	160	2002	Denmark	6-14	Monopile	The world's first large-scale offshore wind farm
Arklow Bank Phase 1	7	25.2	2003	Ireland	5-10	Monopile	The first offshore wind farm in Ireland
Beatrice	84	588	2007	United Kingdom	5-10	Tripods	The first tripod substructure with pin pile foundation
Donghai Bridge	34	102	2010	China	7	High Rise Pile Cap	The first commercial offshore wind farm in China
Trianel Borkum	40	200	2012	Germany	33	Tripods	The first wind turbines founded on tripod foundations and pin piles
Sakiyama	1	2	2013	Japan	106.5	Suction Anchors	The first floating wind turbine in Japan
VolturnUS	1	6	2013	United States	46	Suction Anchors	The first floating offshore wind turbine in the United States
Borkum Riffgrund Phase 1	78	312	2014	Germany	25	Tripods	The first tripod substructure with suction bucket foundation
Guishan	34	198	2016	China	8-11	Quadpods	The first quadpod jacket structure on pile foundations
Block Island	5	30	2016	United States	30	Tripods	The first US offshore wind farm, piled jacket turbines
Xiangshui	55	202	2017	China	8-12	Bucket Foundations	The first integrated floating foundation-tower-turbine
Hywind Scotland	5	30	2017	United Kingdom	95-120	Suction Anchors	The world's first commercial deep water floating wind farm
Fryslân	89	382.7	2021	Holland	3-6	Monopile	The largest lake based offshore wind farm in the world
Shapa Phase 3	1	5.5	2021	China	28	Suction Anchors	The first floating offshore wind turbine in China
Coastal Virginia	2	12	2021	United States	22-38	Monopile	The first monopile foundations in US
Saint-Brieuc	62	496	2023	France	38	Tripods	The first offshore wind project in France
Seagreen	114	1075	2023	United Kingdom	58	Tripods	The largest offshore wind farm in Scotland
Hollandse Kust (Noord) V	69	759	2023	Holland	15-28	Monopile	Operational
Hollandse Kust (Zuid) I-IV	139	1529	2024	Holland	18-28	Monopiles	Operational
Greater Changhu (1 & 2A)	111	900	2024	Taiwan	34-44	Tripods	Operational

The offshore wind industry is planning several key projects to significantly increase offshore wind capacity as it strives to meet the global carbon neutrality targets by 2050. The following table summarizes some of the major upcoming projects that will contribute to achieving these goals, focusing on scaling up offshore wind technology, utilizing larger turbines, and advancing floating platforms and mooring systems.

Table 2. Proposed (Largest Projects) in OWFs Development

Wind Farm	Capacity (MW)	Projected Completion	Location	Consents
Park City Wind	804	2025	United States	Connecticut DEEP
East Anglia Hub	3100	2026	United Kingdom	Anticipated project start in 2022. Project completion anticipated in 2026.
Baltic Power	1140	2026	Poland	ORLEN Group and Northland Power
Nordlicht I	980	2027	Germany	Vattenfall
Thor	1008	2027	Denmark	RWE
Baltic Sea Energy Island I	700	2028	Lithuania	Expected to be finished by 2028. Several investors who submitted bids are currently under evaluation by Lithuanian government.
Ijmuiden Ver Alpha	2000	2029	Netherlands	Netherlands Enterprise Agency
Sinan Korea Offshore	8200	2030	South Korea	Project approved in 2021. Estimated cost: €36 billion.
Med Wind	2800	2030	Italy	Floating offshore wind farm. Scoping procedure completed in 2021. Construction to start in 2025. Expected project completion in 2030.
Baltic Sea Energy Island II	700	2030	Lithuania	Expected to be finished by 2030 after first wind park completed
South Coast Wind	2,400 in two phases	TBA	United States	BOEM

The efforts range from implementing innovative floating wind turbine technology to establishing large-scale wind farms capable of providing significant portions of national energy needs.

Foundation Design in Offshore Wind Farms

Offshore wind turbine foundations are integral to the stability and performance of wind turbines, securing them to the seabed and resisting environmental forces such as wind, waves, and currents. These foundations vary depending on water depth, seabed conditions, and the type of turbine structure. Typically, shallower waters (less than 70 meters) employ fixed-bottom solutions, which comprise a continuous structure from the turbine tower to the seabed. In deeper waters, floating platforms anchored with mooring lines and seabed anchors are necessary (Gourvenec, 2024).

Figure 1 illustrates a range of foundation solutions, including gravity base, shallow skirted foundations, monopiles, high-rise pile caps, suction anchors, and drag anchor foundation types.

- Gravity-based foundations rely on their self-weight to provide stability.
- Monopiles, the most common foundation type, are hollow steel tubular piles.
- Tripods, often referred to as pin piles or bucket foundations, provide stability through their skirt design.
- High-rise pile cap foundations are typically used in groups to secure jacket structures.
- Suction anchors and drag anchors are well-known in floating wind systems.

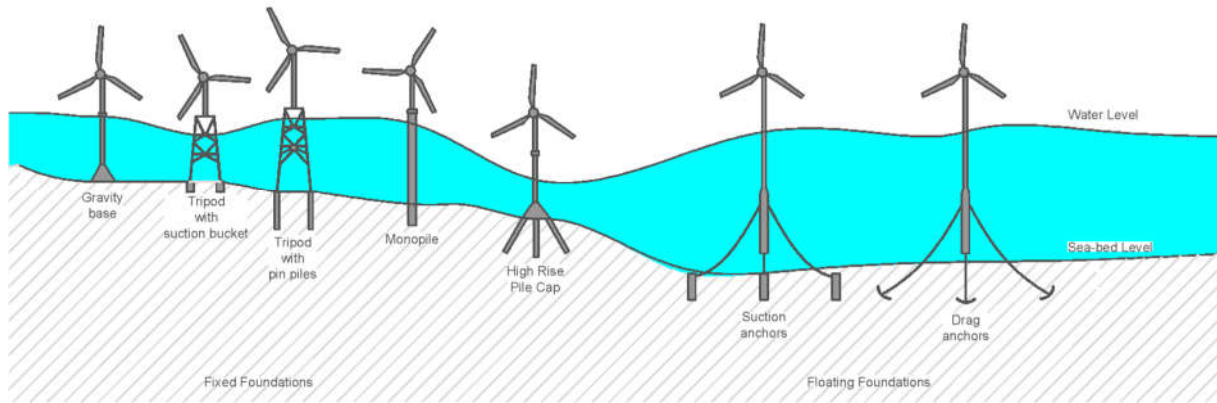


Figure 1. Common Offshore Wind Turbine Foundation Types

Table 3 summarizes the water depths and geological conditions suitable for various foundation types.

Table 3. Geological Conditions and Foundation Type (BOEM 2020-041, OCS Study)

Foundation Type	Maximum Water Depths (m)	Geological Conditions
Gravity Base	30	- Sand, medium to stiff clays, bedrock, and strata with cobbles, boulders, or coarse gravel. - May not be suitable for very soft soils or weak clays.
Tripods	50	With Piles: - Stiff clays and medium to dense sands preferred. - Possible in softer silts and clay, and in very soft sediments overlying stiffer soils or bedrock. - Less well suited for locations with many boulders. With Suction Buckets: - Medium stiff clays and fine to medium sand preferred. - Not suitable for strata with cobbles, boulders, or coarse gravel layers or in very soft soils.
Monopile	50	- Sand and clays preferred. - Not suitable for shallow bedrock or strata with boulders, cobbles, or coarse gravel.
High Rise Pile Cap	100	- Hard bottom conditions, stiff clays, and medium to dense sands preferred. - Possible in softer silts and clay, and in very soft sediments overlying stiffer soils or bedrock.
Floating	220	- Medium stiff clays, fine to medium sands, coarse Sand, and gravel. - Less well suited for locations with many boulders.

As offshore wind energy continues to evolve, these foundation solutions are challenged by dynamic loading regimes, deeper water installation issues, and cost considerations. The early adoption of technologies from the oil and gas sector has shaped current designs, yet innovative solutions remain essential to address future demands.

Challenges of OWF Foundations and Research Efforts

The early applications of OWF projects included gravity-based and monopile-type foundation solutions. The foundation loads, represented by moment, M , and horizontal load, H , are cyclic in nature, as shown in Figure 2-A. The foundation's response to these cyclic loads (M and H) are horizontal displacements, denoted u_M and u_H , and rotations, f_M and f_H , as shown in Figure 2.

The response of soil, horizontal displacement, is nonlinear and can be represented by the hysteresis diagram as shown in Figure 1-C. This response involves soil damping. Such a complex loading regime requires FEA

to adequately predict displacement and horizontal resistance. Early monopile foundation solutions have established the effectiveness of using such designs.

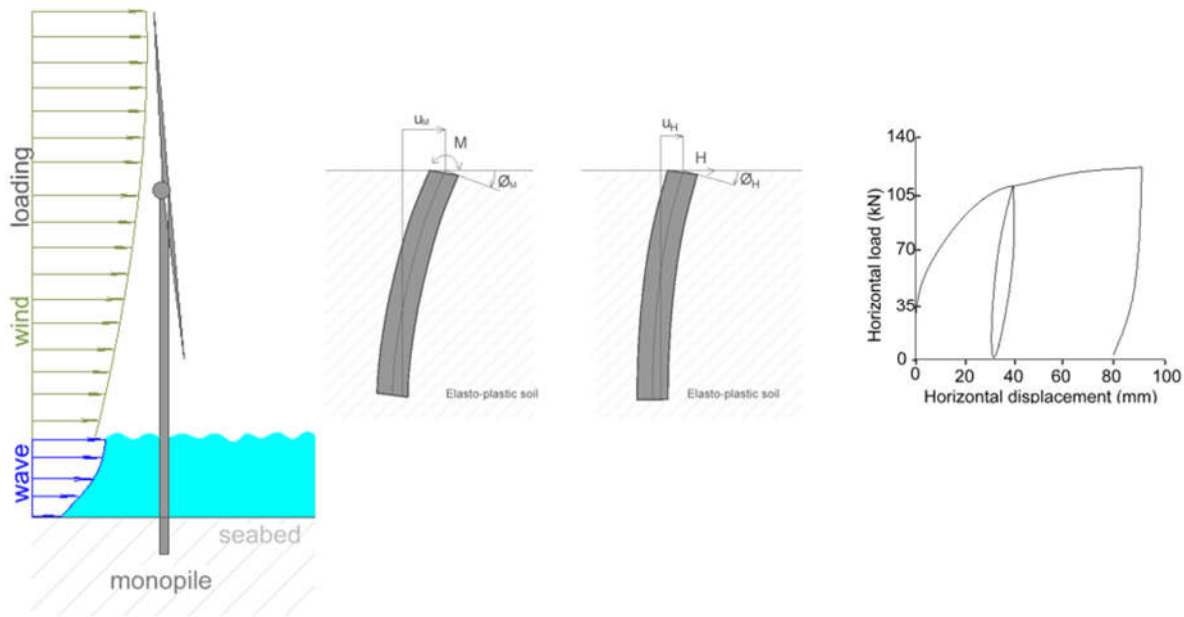


Figure 2. Foundation Loads and Responses

With the turn of the century, there has been a dramatic increase in the number of turbines and the gross capacity of the farms. This has led to the creation of new farm layouts, necessitating the placement of more foundations across a significantly larger project site. Therefore, the costs associated with foundations, which include subsurface investigation and the design of each individual foundation, now constitute a significant portion of the total project cost. The need to cut costs while maintaining safe foundation designs has prompted the creation of new foundation design strategies, the result of several collaborative industry projects that have now been successfully completed.

The REDWIN projects, which ran from 2015 to 2018, established a way to use a 1D computer model that is calibrated against site-specific p-y curves from 3D FEA analysis to design each foundation in an OWF, even when the thickness of the different soil layers varies from site to site.

The PISA (Pile Soil Analysis) project (2017-2022) was conducted to improve the design of monopile foundations for offshore wind turbines. Improved soil reaction curves were developed for different soil types and loading conditions for 1D finite element computation models. The results of this project were incorporated into a 1D Plaxis Monopile Designer tool for use by industry.

The REDWIN 2 project (2019-2021) built upon the advancements of REDWIN (2015–2018) with a deeper focus on refining monopile foundation design for offshore wind turbines. To make 1D finite element computation models better, the project used soil reaction curves from the PISA (Pile Soil Analysis) initiative. These developments were incorporated into tools such as the Plaxis Monopile Designer, facilitating practical application in industry. This project also improved the understanding of soil-structure interaction, especially for complex loading regimes.

The REDWIN and PISA projects are specifically focused on the design of monopile foundations. In deeper water, floating systems rather than fixed foundation solutions are more feasible. Traditional anchor designs for floating structures are anchor piles and suction anchors. Other foundation types that are in the development stage include helical piles, dynamically embedded anchors, dynamically embedded plate anchors (DEPLA), and suction-embedded plate anchors (SEPLA).

Suction piles have been used for decades in the offshore oil and gas industry. Figure 3 illustrates different conceptual uses of suction piles for floating offshore wind farms (FOWF). Fontana (2018) illustrates the single-line system concept shown in Figure 3 (a) and the promising multi-line anchoring systems shown in Figure 3 (b) and (c). When using multi-line floating systems in OWF projects, there are two problems: (a) there is a

chance that a shared anchor will fail, causing other anchors to fail too; and (b) it's hard to make accurate interaction diagrams that show how anchors will behave under combined, multi-directional cyclic loading. The response of the suction pile to this kind of loading scheme is yet unknown. These factors have led to the initiation of joint industry projects. These included the Mutualized Anchors for Offshore Wind Farms (MUTANC) and Shared Anchors for Floating Wind Turbines (ShareWind). These projects aim to develop shared anchor systems that can support multiple floating wind turbines, thereby reducing the total number of anchors required. The project aims to: (a) create anchor designs that can withstand cyclic and multidirectional loading; (b) create strong solutions to lower the risk of cascading failure; (c) create tools to predict anchor performance under complex loading conditions; and (d) lower CAPEX costs by reducing the amount of material used and the time needed to install anchoring systems.

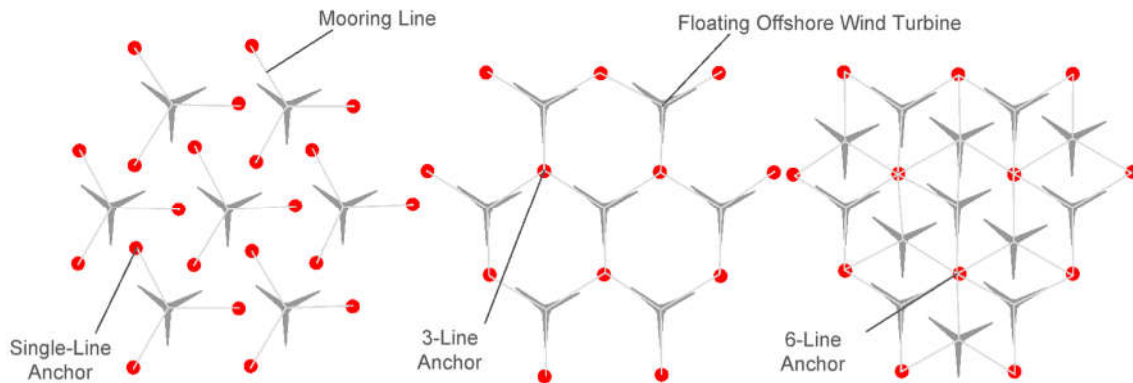


Figure 3. Different conceptual layout of suction piles in OWF (a) single line system (b) and (c) multi-line system configurations

Overcoming challenges will require collaborative efforts between governments, industries, and researchers. Offshore wind farm projects are a crucial component of a sustainable energy future. To meet the 2050 global carbon neutrality targets, offshore wind farms must scale up capacity by utilizing larger turbines, innovative floating platforms, and advanced mooring systems.

Design Methods and Aids

Several design methods are used to evaluate the stability and performance of foundations under various loading conditions. These methods include traditional limit equilibrium (LE) methods, upper bound plastic limit analysis (PLA) methods, and advanced finite element analysis (FEA) methods.

Geotechnical engineers widely use LE methods to assess the stability of soil structures by analyzing the forces acting on a system in static equilibrium. These methods estimate the load that will cause failure based on a series of assumptions (regarding soil conditions and failure mechanisms) and trial-and-error approaches. Calculation of the uniaxial capacity and settlement of a foundation are two examples of typical LE methods. LE methods typically assume that soil is a homogeneous material. They also simplify complex soil structure interactions by assuming a specific shape for the failure surface and for the distribution of stresses along it. While LE methods can provide reasonable solutions for relatively simple stability problems, they have notable limitations. The reliance on assumptions and the simplified nature of these models can lead to conservative results, especially in more complex or nonlinear scenarios. In the offshore industry, where loads and structures are already large and installation limitations exist (i.e., vessel crane capacity), it is not desirable to accommodate highly conservative factors of safety.

Furthermore, the LE methods typically apply to specific loading schemes where only one or two loading directions hold significance. In the case of suction anchors embedded in clay, the load is applied from a chain connected to a padeye located some distance below the mudline. The loading scheme consists of horizontal and upward vertical components (depending on the angle at the padeye) as well as an imposed overturning

moment. Such a complex loading scheme requires a solution based on either a finite element analysis or a specially developed simplified solution, such as the foundation analysis by the Limit Load Method (FALL16).

Drucker and Prager (1952) initially developed the Plastic Limit Analysis (PLA) method, and Murff and Miller (1977) expanded it. PLA applies plasticity theory and assumes a collapse mechanism within a complete velocity field that meets kinematic constraints. Specifically designed for suction caissons embedded in soft clay, the FALL16 tool incorporates the PLA method. Developed by Don Murff, Chuck Aubeny, Seungwoon Han, and Yuqing Wu, FALL16 uses the upper bound plasticity theory to estimate the failure mechanism, simplifying the analysis of lateral loading conditions. This approach offers a more reliable and accurate tool for evaluating the stability of suction caissons, which enhances the effectiveness of foundation designs.

This method gives a less conservative estimate of the ultimate limit state and is especially useful for looking at suction piles under different types of loads from catenary mooring systems and angled loads from taut moorings.

Professor Susan Gourvenec designed "Web Apps for Engineers," a browser-based platform, as one of several simplified tools using LE methods to facilitate teaching and research dissemination.

FEA is an advanced numerical methodology that offers significant advantages over traditional methods like LE and PLA. Unlike these methods, FEA does not require pre-assumed failure mechanisms, enabling a more realistic determination of failure modes, given the use of an adequate continuum model and sufficiently discretized mesh. However, FEA is costly, time-consuming, and requires highly skilled users to interpret the results effectively. While it can accurately simulate the interaction between soil and piles under combined or inclined loads, the method is still subject to assumptions and limitations, such as the accuracy of the soil model and mesh discretization. Even with these problems, FEA is still an important tool for designing complicated offshore foundation systems. Well-designed FEA models can teach us a lot, but because there are so many turbines and the analysis is so complicated, it is not possible to do a new FEA for each of the multiple, cyclic foundations in an OWF.

By employing these design methods, geotechnical engineers can ensure the stability and reliability of offshore wind turbine foundations, contributing to the sustainable growth of wind energy infrastructure.

Conclusion

This study highlights the pivotal role of offshore wind farms (OWFs) in meeting global renewable energy demands, especially as concerns over the usage of fossil fuels grow. As the offshore wind sector transitions from onshore to offshore installations, significant challenges, particularly in foundation design, arise. The design of OWF turbine foundations is technically complex due to multiple and cyclic loading conditions, and financially demanding since subsoil conditions are likely to differ for turbine foundation locations across a project site.

In this study, the historical development of offshore wind farms and the challenges associated with their foundation design were reviewed. The goals and findings of a number of joint industry projects, both completed and ongoing, were presented.

Multiline anchoring systems, offer promising solutions for cost reduction and scalability in OWF projects (Fontana, 2018). However, their optimization for larger turbines and deeper water conditions remains a key challenge. Future research should focus on improving these systems, integrating advanced materials, and utilizing computational tools like the "Suction Caisson Analysis Under Inclined Load" (FALL16) to refine design processes and improve performance.

In addition to technical challenges, cyclic loading and geotechnical considerations in different seabed subsurface soil conditions require further innovation to ensure the reliability and longevity of floating foundations. Achieving the targeted global offshore wind capacity will require overcoming these hurdles. It is important that interdisciplinary collaboration continues between academia, industry, and other stake holder so that further developments in design strategies may be achieved. This will enable reaching the ambitious 2050 renewable energy targets and make the offshore wind sector a crucial part of the transition to a sustainable energy future.

References

- Aubeny, C., & Murff, J. D. (2003). Simplified limit solutions for undrained capacity of suction anchors. *Deepwater Mooring Systems: Concepts, Design, Analysis, and Materials*, 76-90.
- BOEM 2020-041. (2020). Comparison of environmental effects from different offshore wind turbine foundations. Bureau of Ocean Energy Management (BOEM).
- Drucker, D. C., & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 10(2), 157-165.
- DNV - Group. (2024). Energy Transition Outlook 2024 dataset: DNV's global and regional forecast data of the energy transition to 2050. Det Norske Veritas (DNV).
- Fontana, C. M., Hallowell, S. T., Arwade, S. R., DeGroot, D. J., Landon, M. E., Aubeny, C. P., ... & Ozmutlu, S. (2018). Multiline anchor force dynamics in floating offshore wind turbines. *Wind Energy*, 21(11), 1177-1190. <https://doi.org/10.1002/we.2250>
- France Energies Marines. (n.d.). Mutanc project. Retrieved: December 1, 2024, from <https://www.france-energies-marines.org/projets/mutanc/>
- Gourvenec, S. (2024). Offshore geotechnical challenges of the energy transition. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 39, 100584. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100584>
- Gourvenec, S., Sturt, F., Reid, E., & Trigos, F. (2022). Global assessment of historical, current and forecast ocean energy infrastructure: Implications for marine space planning, sustainable design and end-of-engineered-life management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111794. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111794>
- GWEC. (2024). *Global Wind Report 2024*. The Global Wind Energy Council (GWEC).
- Murff, J. D., & Miller, T. W. (1977). Foundation stability on nonhomogeneous clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(10), 1083-1095.
- NGI. (n.d.). REDWIN: REDucing cost in offshore WINd by integrated structural and geotechnical design. Retrieved: December 1, 2024, from <https://www.ngi.no/en/Projects/REDWIN>
- NGI. (n.d.). REDWIN 2 project. Retrieved: December 1, 2024, from <https://www.ngi.no/en/projects/redwin-2/>
- Nikolaos, N. (2004). Deep water offshore wind technologies. University of Strathclyde, Glasgow.
- Offshore Geotechnics Technical Committee. (n.d.). Offshore geotechnics technical committee. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Retrieved: December 1, 2024, from <https://www.issmge.org/committees/technical-committees/applications/offshore>
- Rhodri, J. (2018). Cost reduction: Are we on track? REDWIN final workshop.
- SHARE-Wind. (n.d.). SHARE-Wind project. Retrieved: December 1, 2024, from <https://www.share-wind.com/home>
- Skau, K. S., Page, A. M., Kaynia, A. M., Løvholt, F., Norén-Cosgriff, K., Sturm, H., ... & Eichler, D. (2018). REDWIN–REDucing cost in offshore WINd by integrated structural and geotechnical design. *Journal of Physics: Conference Series*, 1104(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012029>
- University of Oxford. (n.d.). PISA project: Offshore foundations. Retrieved: December 1, 2024, from <https://eng.ox.ac.uk/geotech/research/offshore-foundations/pisa-project/>
- WebAppsForEngineers. (n.d.). Retrieved: December 1, 2024, from <https://webappsforengineers.com/>

**FARKLI ÇEKİRDEK SAYISINA SAHİP YÜKSELTİLMİŞ BİNA TASARIMLARININ YAYA SEVİYESİNDEKİ RÜZGAR ORTAMINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ****Tekmile CÜREBAL**

Araştırma Görevlisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon-Türkiye, (Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0002-9156-5917

Yücel ÖZMEN

Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon-Türkiye, ORCID: 0000-0003-1127-1060

ÖZET

Bu çalışmada, tek, iki ve üç çekirdek ile yerden yükseltilmiş üç farklı yükseltilmiş bina modeli etrafındaki akış alanları, farklı rüzgar geliş açıları için (0° , 45° ve 90°) üç boyutlu olarak modellenmiştir. Geometriye uygun ağ yapısı ICEM CFD ile oluşturulmuş, sayısal analizler ise ANSYS-FLUENT paket programında ve Realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, benzer boyutlardaki yükseltilmiş bina tasarımına sahip olmayan normal bina modeline ait rüzgar ortamı ile karşılaştırılarak, farklı rüzgar geliş açıları için çekirdek sayısının yaya seviyesi rüzgar konforuna etkisi incelenmiştir. Analizler, farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafındaki yaya seviyesi rüzgar ortamının, normal bina modeline kıyasla belirgin şekilde farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bir binanın yerden yükseltilmesinin özellikle Düşük Rüzgar Hızı (Low Wind Speed, LWS) ve Yüksek Rüzgar Hızı (High Wind Speed, HWS) bölgelerinin boyut ve büyüklüklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Özellikle, köşe akımlarının etkili olduğu HWS bölgeleri, normal bina modeline kıyasla daha geniş alanlara yayılmakta; en geniş HWS bölgesi ise, $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında ve tek çekirdekli yükseltilmiş bina modeli etrafında gözlenmektedir. Sonuçlar, çekirdek sayısının uygun şekilde ayarlanmasıyla yükseltilmiş alandan geçen rüzgar akışının kontrol edilebileceğini, böylece yükseltilmiş bina çevresindeki rüzgar konforunun iyileştirilebileceğini ortaya koymakta; bu etkinin de büyük ölçüde gelen rüzgar yönüne bağlı olduğunu göstermektedir.

Keywords: Yükseltilmiş bina, yaya konforu, hesaplamalı akışkanlar mekaniği, türbülanslı akış.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE IMPACT OF LIFT-UP BUILDING DESIGNS WITH DIFFERENT CORE NUMBERS ON PEDESTRIAN-LEVEL WIND ENVIRONMENT**ABSTRACT**

In this study, the flow fields around three different lift-up building models, elevated from the ground with one, two, or three cores, were modeled in three dimensions for various wind approach angles (0° , 45° , and 90°). The mesh structure suitable for the geometry was generated using ICEM CFD, and numerical analyses were conducted using the ANSYS-FLUENT software package with the Realizable k- ϵ turbulence model. The obtained results were compared with the wind environment of a normal building model of similar dimensions without a lift-up design, and the impact of the number of cores on pedestrian-level wind comfort was analyzed for different wind approach angles. The analyses revealed that the pedestrian-level wind environment around lift-up building models with varying core numbers differs significantly from that of a normal building model. It was observed that elevating a building notably influences the size and extent of Low Wind Speed (LWS) and High Wind Speed (HWS) regions. Specifically, High Wind Speed (HWS) regions, influenced by corner flows, expand over larger areas compared to the normal building model. The largest HWS region is observed at a wind approach angle of $\theta = 0^\circ$ around the single-core lift-up building model. The results demonstrate that adjusting the number of cores appropriately can help control wind flow passing through the lift-up area, thereby improving wind comfort around the lift-up building. This effect is shown to depend significantly on the incoming wind direction.

Keywords: Lift-up building, pedestrian comfort, computational fluid dynamics, turbulent flow.

GİRİŞ

Küresel ölçekte nüfusun yoğunlaşarak metropol olarak bilinen büyük şehirlerde yönelmesi, yaya seviyesindeki hava sirkülasyonunu kısıtlayan birbirine yakın yüksek binaların inşasını ve kullanımını hızla artırmaktadır. Yüksek binaların sebep olduğu bu hava sirkülasyonu eksikliği, kirleticilerin zeminde birikmesine ve yaya konforu için uygun olmayan ısı koşullarına sahip alanların oluşmasına neden olmaktadır. Binaların geometrik özelliklerinin, çevrelerindeki hava akışını önemli ölçüde şekillendirmesi nedeniyle, yaya seviyesindeki düşük rüzgar hızlarını iyileştirmek amacıyla özel tasarımlar geliştirilmektedir. Bu doğrultuda, bir binanın kullanım alanlarından ödün vermeden, çekirdek, kolon veya perde duvarlar ile desteklenerek yerden bir miktar yükseltilmesiyle oluşturulan yükseltilmiş bina tasarımı (lift-up building), yüksek binalar çevresindeki tıkanık hava akışını düzenlemeye ve düşük rüzgar hızlarını artırmaya yönelik alternatif bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Binanın yerden yükseltilmesiyle ana yapı altında yer alan ve çekirdek (core) olarak adlandırılan bölümün çevresinde oluşan boşluk, havanın bina çevresinde daha etkin ve daha az engelle akışını mümkün kılacak bir geçirgenlik sunmaktadır. Xia vd. (2015), düşük rüzgar hızı bölgelerine sahip tekli bir bina, bir dizi bina ve podyumlu bina dizisi olmak üzere üç farklı yükseltilmiş bina tasarımı için yaya seviyesindeki rüzgar ortamını deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, yükseltilmiş bina tasarımının tekli bir bina ve bir dizi bina düzenlerinde yaya konforu açısından hava hareketini iyileştirmede etkili olduğunu, ancak podyumlu bina düzenlerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Tse vd. (2017), farklı çekirdek yükseklikleri ve genişliklerine sahip 9 yükseltilmiş bina modelinin etrafındaki yaya seviyesi rüzgar ortamını deneysel olarak incelemişler ve düşük ve yüksek rüzgar hızı bölgelerini en çok etkileyen parametrenin çekirdek yüksekliği olduğunu tespit etmişlerdir. Du vd. (2017), Hong Kong Politeknik Üniversitesi (HKPolyU) kampüsünde yer alan “-”, “L”, “U” ve “□” şeklindeki dört farklı yükseltilmiş bina tasarımının yaya seviyesi rüzgar ortamına etkisini farklı rüzgar yönleri için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, yaya seviyesi rüzgar akışının büyük ölçüde gelen rüzgar yönüne bağlı olduğunu ve özellikle 45° açılı rüzgar akışına maruz kalan yükseltilmiş bina tasarımlarının etrafında daha iyi rüzgar konforu sağlandığı belirtilmiştir. Liu vd. (2017), yükseltilmiş tasarıma sahip olan ve olmayan izole bir bina modeli etrafındaki yaya seviyesi rüzgar ortamını, Detached Eddy Simulation (DES), kararlı durumdaki RANS (SRANS) ve kararsız durumdaki RANS (URANS) yöntemleriyle sayısal olarak incelemiş ve bu sayısal yöntemlerin hassasiyetlerini değerlendirmişlerdir. Du vd. (2017), bir üniversite kampüsünde bulunan yükseltilmiş bir binanın yaya seviyesindeki rüzgar ve ısı konforu üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla rüzgar tüneli deneyleri ve yerinde ölçüm çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Araştırma sonuçları, yükseltilmiş bina tasarımının yaya seviyesindeki rüzgar ortamını önemli ölçüde iyileştirebileceğini ortaya koymuştur. Zhang vd. (2017, 2018), farklı köşe modifikasyonları (pahlı, yuvarlatılmış ve girintili) uygulanan farklı en-boy oranlarına sahip yükseltilmiş bina tasarımlarının yaya seviyesi rüzgar ortamı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişler ve optimum kaldırma tasarımının belirlenebilmesi için binanın boyutları ve merkezi çekirdek geometrisinin sistematik bir şekilde birleştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Sha vd. (2018), bina modellerinin sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü katlarının kaldırılmasıyla oluşturulmuş yükseltilmiş bina tasarımının, şehir sakinlerinin taşıt kaynaklı CO maruziyeti üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişler ve yükseltilmiş bina tasarımlarının, yükseltme alanında oluşturduğu rüzgar yolları sayesinde bina yüzeyindeki CO konsantrasyonu önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Chen ve Mak (2021), farklı konfigürasyonlara sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafında yaya seviyesindeki rüzgar etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Yükseltilmiş tasarımın, bir binanın yaya seviyesindeki rüzgar konforunu önemli ölçüde artırabileceğini ve rüzgar konforunun rüzgar geliş açısına, bina konfigürasyonuna ve yükseltilmiş bölge büyüklüğüne bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Literatür incelendiğinde, yükseltilmiş bina tasarımlarının etrafındaki rüzgar etkilerini ele alan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Yükseltilmiş bina tasarımının yaya seviyesindeki rüzgar alanı üzerindeki karmaşık ve bütüncül etkilerinin yeterince anlaşılması, bu tasarımın kentsel alanlarda uygulanmasını büyük ölçüde sınırlamaktadır. Bu çalışmada, tek, iki ve üç çekirdek ile yerden yükseltilmiş üç farklı yükseltilmiş bina modeli etrafındaki hız dağılımlarının sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Binalar etrafındaki akış alanı, gelen rüzgar yönüne büyük ölçüde bağlı olduğundan, sayısal çalışmalar 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç tipik rüzgar yönü için gerçekleştirilmiştir.

SAYISAL ÇALIŞMA

Matematiksel Model

Bu çalışmada, yükseltilmiş tasarıma sahip olan ve olmayan bina modelleri etrafındaki türbülanslı hava akışı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sıkıştırılamaz türbülanslı akış şartları için hava akışını karakterize eden süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i \quad (2)$$

Bu çalışma kapsamındaki sayısal çözümler, ANSYS-FLUENT 18.0 ticari yazılımında ve Realizable k-ε türbülans modelinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut araştırmalar, Realizable k-ε modelinin türbülanslı akışların hassas ve güvenilir bir şekilde modellenmesinde yüksek performans sergilediğini göstermektedir (Zhang vd., 2005; Blocken vd., 2012; Zheng vd., 2016; Meng vd., 2018). Shih vd., (1995) tarafından önerilen Realizable k-ε türbülans modeline ait transport denklemleri

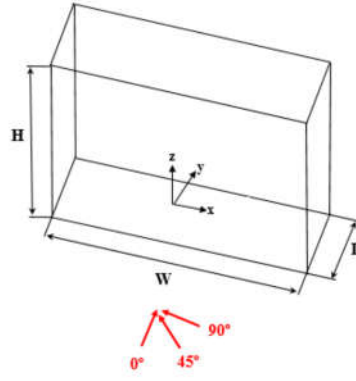
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \overline{G_k} - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

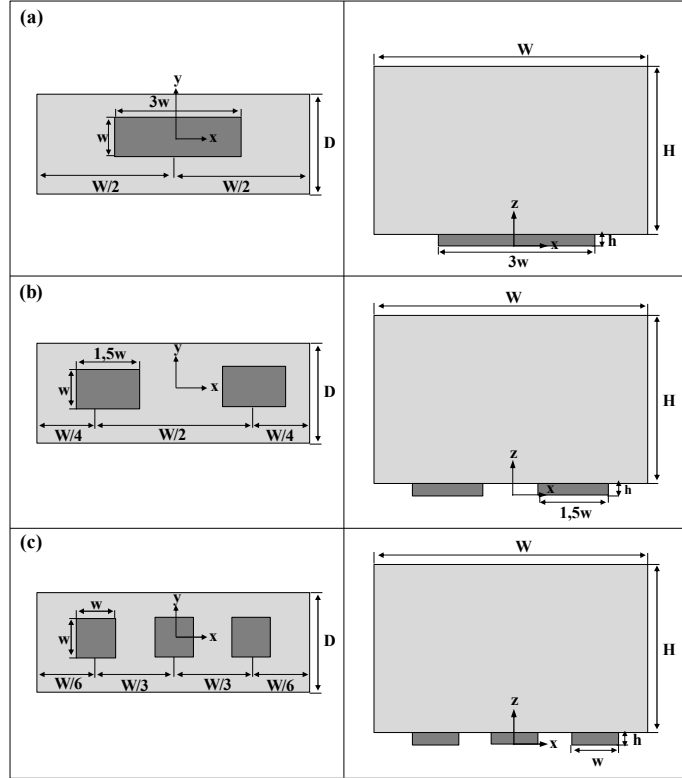
şeklinindedir. Burada; G_k ortalama hız gradyanına bağlı oluşan türbülans kinetik enerji üretimini, G_b kaldırma kuvveti nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerji üretimini, S_k ve S_ω , k ve ω için kaynak terimlerini, Y_k sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki dalgali genişlemeyi, Y_ω ve D_ω , k ve ω için tanımlanan türbülans Prandtl sayılarını ve C_{e1} , C_2 model sabitlerini ifade etmektedir. Realizable k-ε türbülans modelinde, $C_{e1}=1.44$, $C_2=1.9$ ve $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\omega=1.2$ olarak alınmaktadır.

Bina Modelleri

Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçların doğruluğu Liu vd. (2016) tarafından yürütülen çalışmadaki deneysel verilerle karşılaştırılacaktır. Bu doğrultuda, yükseltilmiş tasarıma sahip olmayan normal bina boyutları Liu vd. (2016)'in çalışmalarında olduğu gibi, tam ölçekte, bina kenar uzunluğu $W=75$ m, bina genişliği $D=25$ m ve bina yüksekliği $H=50$ m olarak alınmıştır (Şekil 1). Du vd. (2018)'in çalışmaları referans alınarak, normal bina modelinin Şekil 2' de gösterildiği gibi, her birinin genişliği $w=8$ m ve yüksekliği $h=3,5$ m olan, farklı uzunluklara sahip yapısal sütunlar ile desteklenmesiyle tek, iki ve üç çekirdekli olmak üzere üç farklı konfigürasyona sahip yükseltilmiş bina modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, $\theta=0^\circ$, 45° ve 90° olmak üzere farklı rüzgar geliş açıları dikkate alınarak dokuz farklı durum için ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bina kenar uzunluğunu (W) ifade eden yan yüzeye dik olarak gelen rüzgar yönü $\theta=0^\circ$ olarak alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Yükseltilmiş tasarıma sahip olmayan normal bina modeli

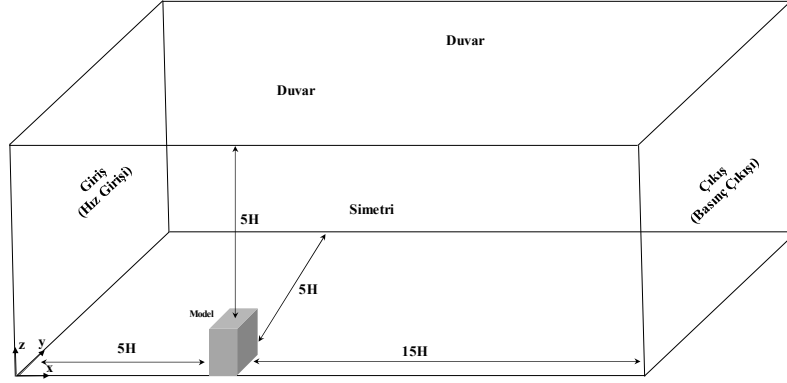


Şekil 2. a) tek, b) iki, c) üç çekirdek ile yükseltilmiş bina modelleri

Akış Alanı, Ağ yapısı ve Sınır Şartları

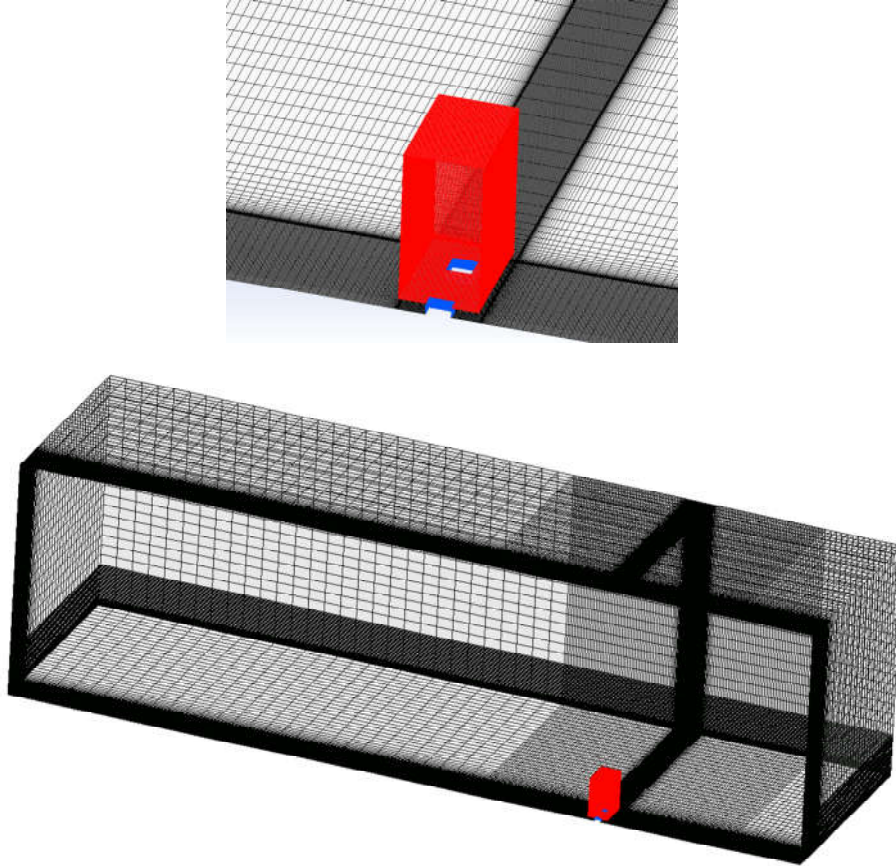
Sayısal çalışmalarda kullanılan bina modelleri, tam ölçekteki bina boyutlarının 1/200 oranında küçültülmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 3'te, normal bina modelinin üç boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni ve sınır koşullarının belirtildiği bir hesaplama alanı şeması gösterilmektedir. Bina modelleri orta eksininden simetrik olduğundan, $\theta=0^\circ$ ve 90° rüzgar geliş açıları için akış alanı yarım model ile oluşturulmuştur. $\theta=45^\circ$ rüzgar geliş açısında ise yarım model ile simetri koşulu sağlanamadığından dolayı, akış alanı tam model olarak oluşturulmuştur. Akış alanı boyutları Franke (2006)'nin model yüksekliğine göre önerdiği mesafeler referans alınarak yaklaşık olarak $5,125 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$ şeklinde belirlenmiştir. Sınır koşulları, girişte ve çıkışta sırasıyla hız giriş koşulu (velocity-inlet) ve basınç çıkış koşulu (pressure-outlet), simetri özelliğinin uygulandığı yüzeyde simetrik koşulu (symmetry), diğer yüzeylerde ise duvar koşulu (wall) şeklinde uygulanmıştır. Özmen (2006) tarafından TSI IFA-100 Kızgın Tel Anemometresi kullanılarak ölçülmüş ve kentsel arazi için oluşturulmuş ortalama hız ve türbülans profilleri, "User Defined Function (UDF)" özelliği kullanılarak giriş sınır koşulu olarak verilmiştir. Sayısal çözümlerde, Realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılmış ve sınır tabakanın çözümlenmesinde duvar yaklaşımı olarak "Enhancement Wall Functions" esas alınmıştır. İteratif

çözücü olarak “SIMPLEC” algoritması kullanılmıştır. Basınç interpolasyonu için “Standard”, diğer değişkenlerin ayrıklaştırılmasında ise “Second Order Upwind” yöntemi uygulanmıştır ve yakınsama kriteri 10^{-5} olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 3. Normal bina modelinin üç boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni ve sınır koşulları

Akış alanına uygun ağ yapısı, ICEM CFD 18.0 ile oluşturulmuştur. Rüzgar geliş açısının 0° olduğu durumda, üç çekirdek ile yükseltilmiş bina modeli için oluşturulmuş örnek ağ yapısı Şekil 4’te verilmektedir. Burada, bina modelleri etrafında ve yükseltme alanında sıklaşan bir düzende, bina modelinden uzak bölgelerde ise daha seyrek olacak şekilde bir ağ düzeni tercih edilmiştir. Diğer tüm bina modelleri için benzer düzene sahip bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Sayısal çözümler yaklaşık 4300000 ağ yoğunluğunda gerçekleştirilmiş ve model yüzeylerindeki $y^+ \approx 5$ olarak alınmıştır.



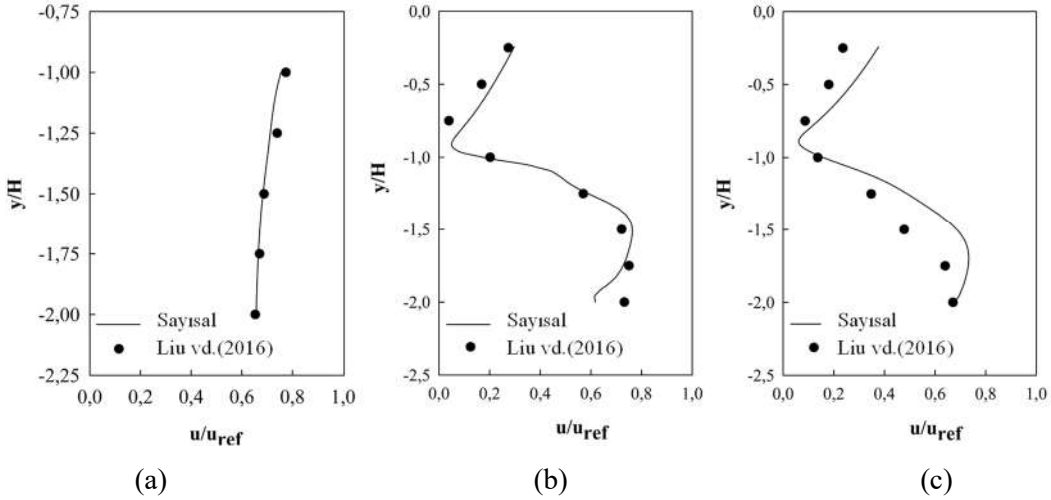
Şekil 3. Üç çekirdek ile yükseltilmiş bina modeli etrafındaki örnek ağ yapısı

Sayısal Modelin Doğrulanması

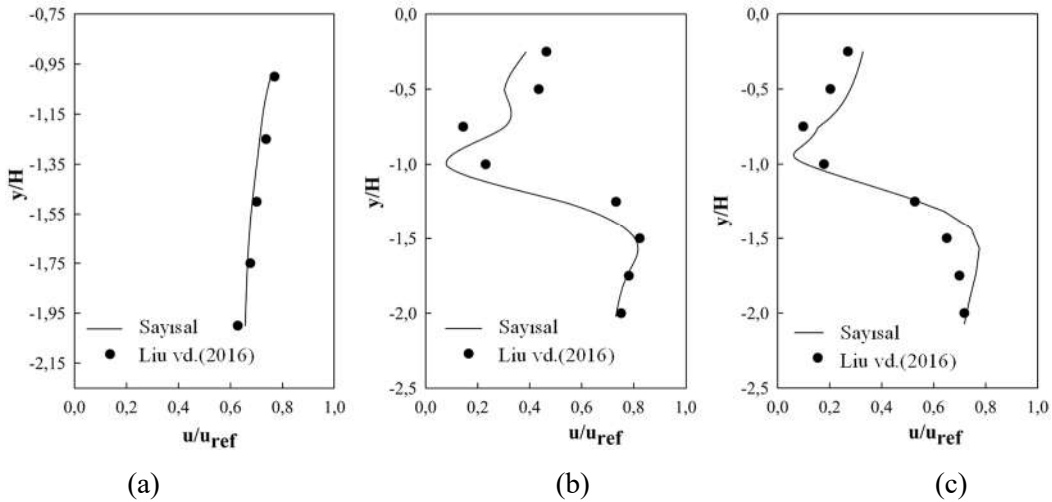
Çalışmada, yaya seviyesi rüzgar konforunu değerlendirmek için Ortalama Rüzgar Hızı Oranı (Mean Wind Velocity Ratio, MVR) olarak bilinen, boyutsuzlaştırılmış ortalama rüzgar hızı ifadesi kullanılmıştır. Ortalama Rüzgar Hızı Oranı

$$MVR = \frac{u}{u_{ref}} \quad (5)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada u herhangi bir noktadaki yerel rüzgar hızını, u_{ref} ise 15 m/s değerindeki referans rüzgar hızını ifade etmektedir. Sayısal yöntemin doğrulanması, Liu vd. (2016) tarafından yürütülen çalışmadaki deneysel veriler referans alınarak yapılmıştır. Normal ve üç çekirdek ile yükseltilmiş bina modelleri için belirlenen farklı istasyonlarda, yaya seviyesi yüksekliğinde hesaplanan boyutsuzlaştırılmış ortalama rüzgar hızlarının deneysel verilerle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’de verilmiştir. İlgili grafiklerde, tüm ölçüm noktalarında hesaplanan boyutsuzlaştırılmış ortalama rüzgar hızlarının deneysel verilerle genel olarak iyi bir şekilde uyduğu görülmektedir.



Şekil 4. Normal bina modeli etrafında farklı istasyonlardaki ortalama rüzgar hızları
a) $x/H=-0,25$, b) $x/H=0,75$ ve c) $x/H=2,0$



Şekil 5. Yükseltilmiş bina modeli etrafında farklı istasyonlardaki ortalama rüzgar hızları
a) $x/H=-0,25$, b) $x/H=0,75$ ve c) $x/H=2,0$

BULGULAR

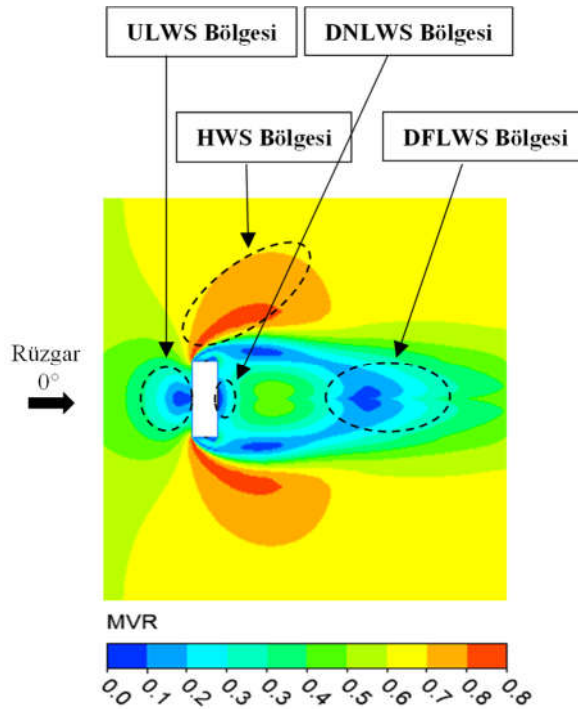
Yapılar etrafında yaya seviyesindeki rüzgar hızlarının dağılımı, bu alanları kullanan bireylerin konforunu ve güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Yüksek rüzgar hızları ise yayaların yürürken dengelerini kaybetmelerine

neden olmakta ve hatta uçuşan nesnelere dolaylı yayaların ciddi şekilde yaralanmalarına neden olmaktadır. Düşük rüzgar hızları ise, yetersiz doğal havalandırmaya sebep olmakta ve kirletici maddelerin zeminde birikmesine yol açarak kullanıcıların ısı konforunu olumsuz etkilemektedir (Zhang, 2018). Ayrıca, hava sirkülasyonunun yetersizliği Koronavirüs, SARS ve MERS gibi virüslerin hızla yayılması için elverişli koşullar oluşturmaktadır ve yaya sağlığı için risk teşkil etmektedir. Bu nedenle, yaya seviyesinde ideal rüzgar koşullarının sağlanabilmesi için binalar çevresindeki rüzgar hızlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Şekil 6'da, yükseltilmiş tasarıma sahip olmayan normal bina modeli etrafında akış yönünde yaya seviyesi yüksekliğindeki yatay düzlemde elde edilen ortalama rüzgar hızı oranı dağılımı verilmektedir. Bu düzlemdeki rüzgar ortamını daha iyi değerlendirmek amacıyla, Tsang vd. (2012) ve Tse vd. (2017)'nin önerdiği şekliyle akış alanı genel olarak dört bölgeye ayrılmıştır:

- Rüzgar Geliş Tarafındaki Düşük Rüzgar Hızı (Upstream Low Wind Speed, ULWS) bölgesi;
- Yüksek Rüzgar Hızı (High Wind Speed, HWS) bölgesi;
- Model Arkası Yakın Alan Düşük Rüzgar Hızı (Downstream Near-Field Low Wind Speed, DNLWS) bölgesi ve
- Model Arkası Uzak Alan Düşük Rüzgar Hızı (Downstream Far-Field Low Wind Speed, DFLWS) bölgesi.

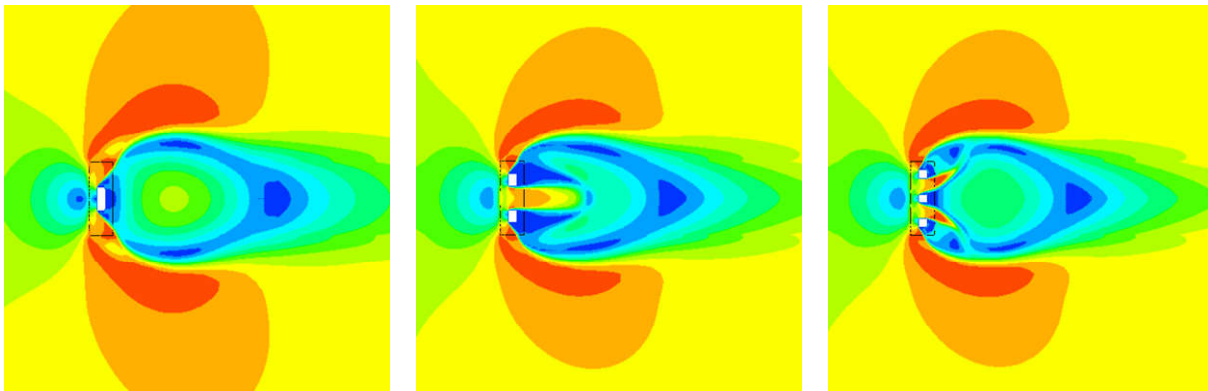
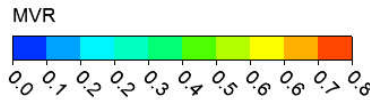
Bina modelinin ön tarafında, rüzgar geliş tarafında gözlemlenen düşük rüzgar hızları, akışın binanın rüzgar alan ön cephesine çarpmasıyla meydana gelen aşağı akım etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu bölge, modelin ön cephesi ve zemin arasında kalan durgun bir alanda yer almaktadır. Akışın bina modelinin ön kenarlarından ayrılmasıyla ise model yan yüzeyler boyunca, köşe akımlarının etkili olduğu yüksek rüzgar hızı bölgeleri oluşmaktadır. Bina modelinin hemen arkasındaki iz bölgesinde binanın blokaj etkisinden kaynaklanan yakın alan düşük rüzgar hızı bölgesi, modelden uzak bölgede ise uzak alan düşük rüzgar hızı bölgesi oluşmaktadır. Model arkasındaki bu düşük basınç bölgeleri yatay ve dikey düzlemlerdeki girdap yapılarından etkilenmektedir (Tsang vd.,2012; Xia vd., 2015, Cürebal, 2024).



Şekil 6. Normal bina modeli etrafında yaya seviyesi yüksekliğinde yatay düzlemdeki boyutsuz ortalama rüzgar hızı oranı dağılımları

Binalar çevresindeki akış yapısı, büyük ölçüde binaların geometrisi, gelen akışın hızı ve yönünden etkilenmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada normal bina modeli ile tek, iki ve üç çekirdek ile yerden

yükseltilmiş üç farklı yükseltilmiş bina modeli etrafındaki hız dağılımları, farklı rüzgar geliş açıları için analiz edilmiştir. Şekil 7'de, $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında, farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafında yaya seviyesi yüksekliğindeki yatay düzlemde elde edilen ortalama rüzgar hızı oranı dağılımı verilmektedir. Farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafındaki hız dağılımları incelendiğinde, yükseltilmiş bina tasarımının, Şekil 6'da gösterilen aynı yükseklikteki normal binaya kıyasla, yaya seviyesindeki rüzgar ortamını belirgin şekilde etkilediği görülmektedir. Yükseltilmiş bina tasarımının, özellikle bina modeli etrafında oluşan düşük rüzgar hızı (LWS) ve yüksek rüzgar hızı (HWS) bölgelerinde belirgin değişikliklere yol açtığı görülmektedir. Köşe akımlarının etkili olduğu HWS bölgeleri, normal bina modeline kıyasla daha geniş alanlara yayılmakta; $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısındaki en geniş HWS bölgesi ise tek çekirdekli yükseltilmiş bina modeli etrafında gözlenmektedir. Öte yandan, iki ve üç çekirdekli yükseltilmiş bina modellerinde, iki çekirdek arasından geçen akışta oluşan Venturi etkisinden dolayı, akışın bu bölgelerden geçerken hızlandığı ve binanın arkasında kalan iz bölgesinde de yüksek rüzgar hızı bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısı için yapılan incelemelerde, Tüm bina modelleri arasında, rüzgar geliş tarafındaki en geniş ULWS bölgesinin normal bina modelinde oluştuğu gözlemlenmektedir. Yükseltilmiş bina modellerinde, modele yaklaşan akışın çekirdek etrafından geçmesi, blokaj etkisini azaltmakta ve modelin ön yüzeyinde oluşan ters akışı zayıflatmaktadır. Bu durum, yükseltilmiş bina modellerinde rüzgar geliş tarafındaki ön yüzeyin merkezinde görünen ULWS bölgelerinin, normal binaya kıyasla çok daha dar bir alanda oluşmasına ve bu bölgedeki rüzgar hızlarının bir miktar artmasına yol açmaktadır. Yükseltilmiş bina modelleri arasında ise, rüzgar geliş tarafındaki en geniş ULWS bölgesinin tek çekirdekli yükseltilmiş bina modelinde oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum, tek çekirdekli yükseltilmiş bina modelinin daha geniş bir çekirdeğe sahip olması nedeniyle akışa daha fazla blokaj etkisi göstermesinden kaynaklanmaktadır. Son olarak, farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modellerinde, akışın yükseltilmiş alandan geçerek art izi bölgesine ulaşmasıyla, DNLWS bölgelerinin kapsamında da değişiklikler gözlemlenmiştir. Buna karşın, DFLWS bölgesinde, test edilen farklı çekirdek sayıları için belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



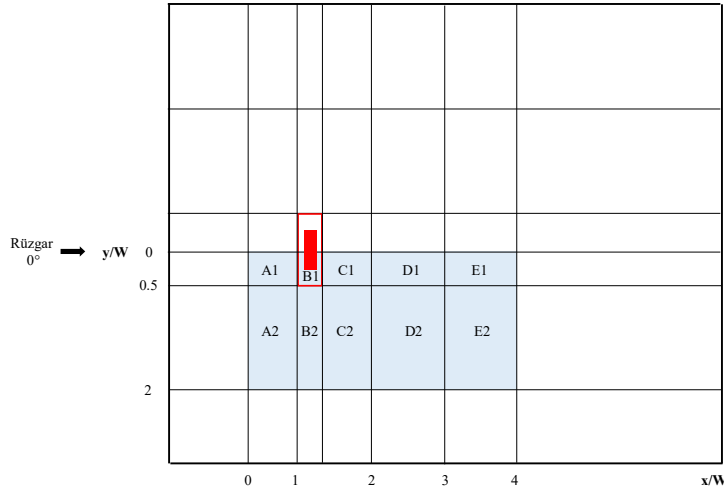
(a)

(b)

(c)

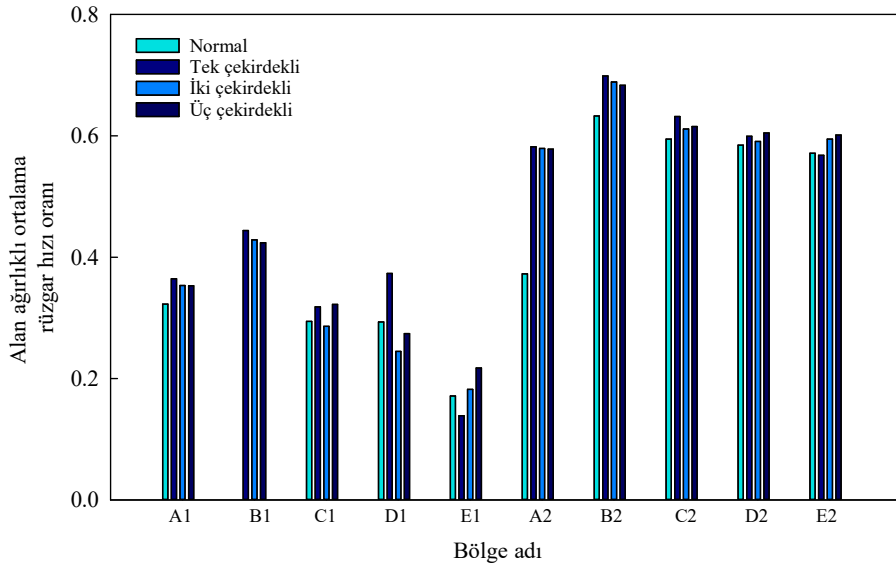
Şekil 7. $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında, a) tek, b) iki ve c) üç çekirdekli yükseltilmiş bina modelleri etrafında yaya seviyesi yüksekliğinde yatay düzlemdeki boyutsuz ortalama rüzgar hızı oranı dağılımları

$\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında, yükseltilmiş bina tasarımının yaya seviyesindeki rüzgar ortamına olan etkisini daha nicel olarak değerlendirmek için, normal ve farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafındaki akış alanları 10 bölgeye ayrılmış ve bu bölgelerde alan ağırlıklı ortalama hız oranları hesaplanmıştır. Bu durum, normal ve yükseltilmiş bina modelleri etrafındaki rüzgar etkilerini doğrudan karşılaştırma imkanı sağlamaktadır. Şekil 8'de $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında tek çekirdekli yükseltilmiş bina modelleri etrafında alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranlarının hesaplandığı örnek akış bölgeleri görülmektedir. Modeller etrafında tanımlanan bölgelerin büyüklükleri, bina genişliğine (W) referans alınarak belirlenmiştir.



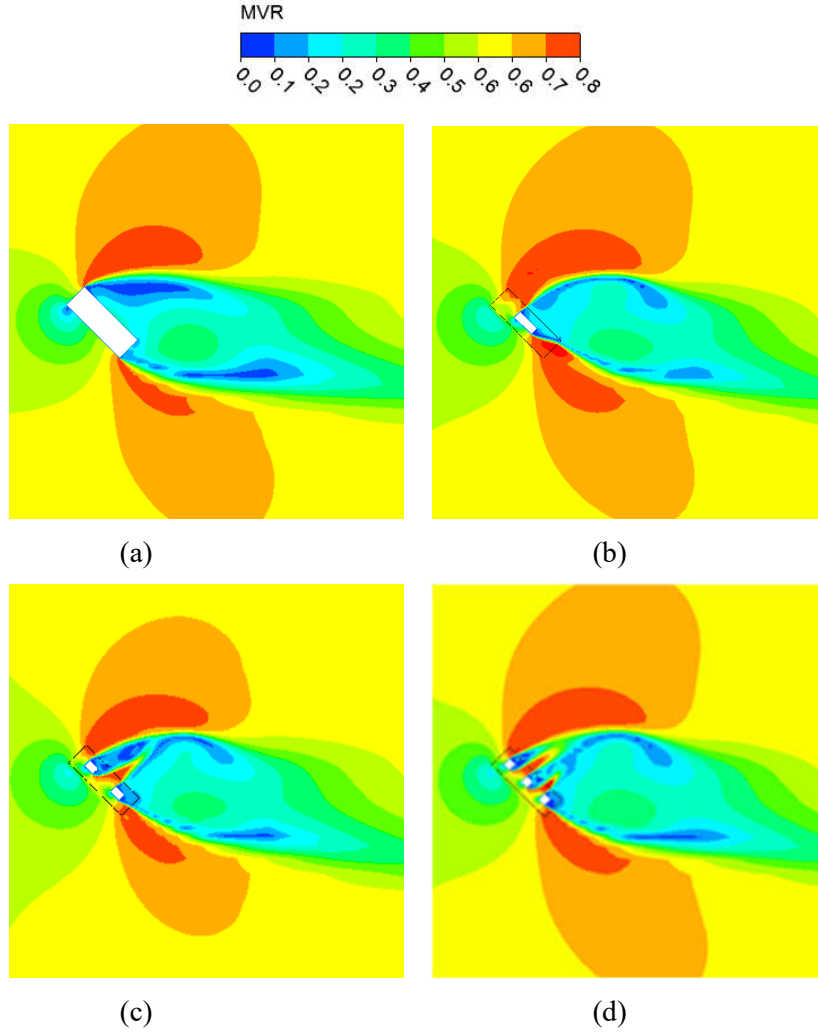
Şekil 8. Alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranlarının hesaplandığı örnek akış bölgeleri

$\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında, normal ve farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafında belirlenen 10 bölgede hesaplanan alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranları Şekil 9'da gösterilmektedir. Farklı çekirdek sayılarına sahip tüm yükseltilmiş bina modelleri etrafında, normal bina modeline kıyasla, genel olarak daha yüksek alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranı değerleri oluşmaktadır. Ayrıca, bina modelleri etrafında yaya seviyesi yüksekliğinde yatay düzlemde hesaplanan boyutsuz ortalama rüzgar hızı oranı dağılımlarından, yükseltilmiş bina modellerinin, rüzgar geliş tarafındaki ULWS bölgelerinde ve model yanlarında oluşan HWS hız değerlerini arttığı yukarıda belirtilmişti. Bu durumun bir sonucu olarak, model önünde düşük rüzgar hızlarının hakim olduğu A1 numaralı bölgede ve model yanlarında yüksek rüzgar hızlarının hakim olduğu A2, B2 ve C2 numaralı bölgelerde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranlarının, normal bina modeline kıyasla yükseltilmiş bina modellerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranları için en yüksek artış ise, yaklaşık %56 oranıyla tek çekirdekli yükseltilmiş bina modelinde ve A2 numaralı bölgede meydana gelmektedir. Bu durum, binalara uygulanan yükseltilmiş bina tasarımının uygun bir şekilde tasarlanmasının ve konumlandırılmasının, yaya konforu açısından yetersiz termal şartlara sahip ortak alanlarda zemin seviyesindeki doğal havalandırmayı iyileştirebileceğini göstermektedir.



Şekil 9. Alan ağırlıklı ortalama hız oranı değerlerinin karşılaştırılması

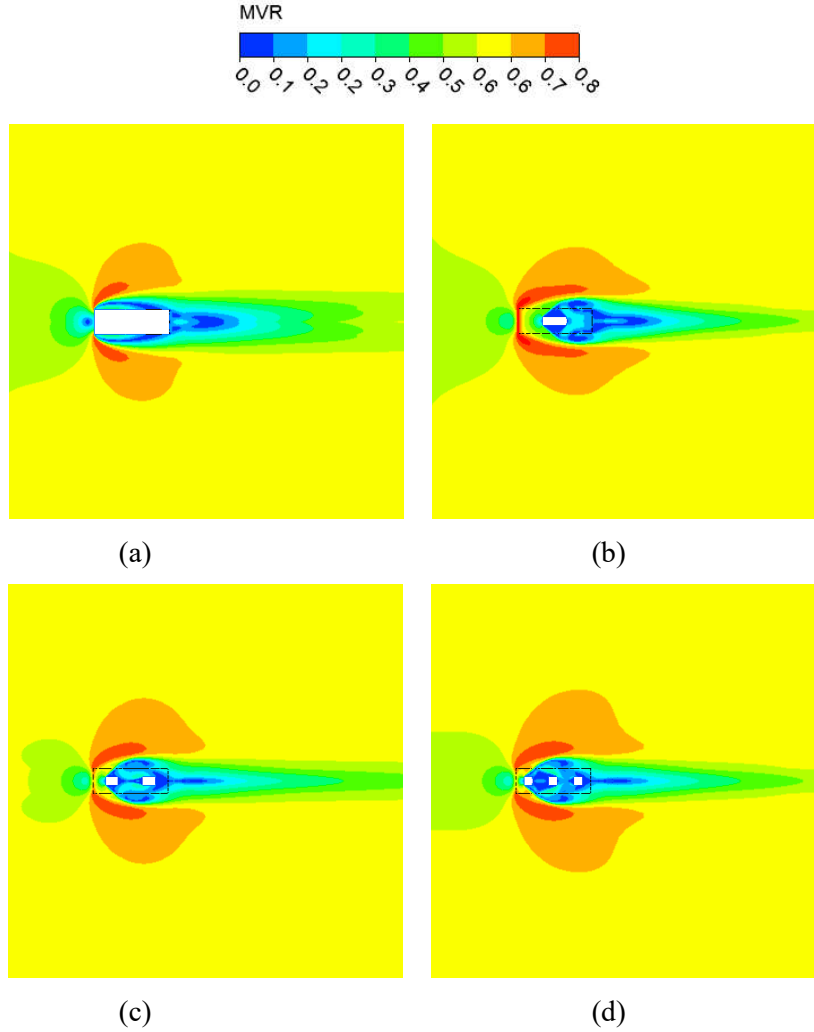
Şekil 10'da, $\theta=45^\circ$ rüzgar geliş açısında, normal bina modeli ve farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafında yaya seviyesi yüksekliğindeki yatay düzlemde elde edilen ortalama rüzgar hızı oranı dağılımları verilmektedir. Bu durumda, $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısına kıyasla hız dağılımlarının simetrik olmadığı ve farklı bir yapı sergilediği görülmektedir. Özellikle, $\theta=0^\circ$ geliş açısında model ön yüzünün merkezinde gözlenen ULWS bölgesinin, $\theta=45^\circ$ geliş açısında model üst köşe noktası yakınında olduğu ve bu bölgenin kapsamının azalarak, burada daha yüksek hız değerlerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, $\theta=45^\circ$ rüzgar geliş açısında, farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modellerinin, model üst köşe noktası yakınında oluşan düşük rüzgar hızı (ULWS) bölgesi ve köşe akımlarının etkili olduğu HWS bölgelerindeki hız değerlerinde bir miktar artışa neden olduğu görülmektedir. En geniş HWS bölgesi ise, $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısına benzer şekilde tek çekirdekli yükseltilmiş bina modeli etrafında gözlenmektedir. Model arkasındaki art izi bölgesi incelendiğinde ise, $\theta=45^\circ$ geliş açısında daha yüksek hız değerlerine sahip LWS bölgelerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, model arkasındaki düşük hızlara sahip simetrik iki akışın birleşerek oluşturduğu DFLWS bölgesinin $\theta=45^\circ$ geliş açısında oluşmadığı dikkat çekmektedir.



Şekil 10. $\theta=45^\circ$ rüzgar geliş açısında, a) normal bina modeli ve b) tek, c) iki ve d) üç çekirdekli yükseltilmiş bina modelleri etrafında yaya seviyesi yüksekliğindeki yatay düzlemdeki boyutsuz ortalama rüzgar hızı oranı dağılımları

Şekil 11'de, $\theta=90^\circ$ rüzgar geliş açısında normal bina modeli ve farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri etrafında, yaya seviyesi yüksekliğindeki yatay düzlemde elde edilen ortalama rüzgar hızı oranı dağılımı verilmektedir. Diğer rüzgar geliş açılara kıyasla, $\theta=90^\circ$ rüzgar geliş açısındaki tüm durumlarda, model ön yüzüne gelen akışın daha kısa bir yüzey alanıyla karşılaşmasından dolayı, hem rüzgar önü hem de rüzgar arkası bölgelerinde akışın daha dar bir alanı etkilediği görülmektedir. Diğer geliş açılara benzer şekilde, farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modellerinin, model ön yüzündeki ULWS

bölgelerinde ve yan taraflarda gözlemlenen HWS bölgelerinde hız değerlerinde bir miktar artışa neden olduğu görülmektedir. $\theta=90^\circ$ rüzgar geliş açısında, en dar HWS bölgesi normal bina modeli etrafında oluşurken, en geniş HWS bölgesi üç çekirdeğe sahip yükseltilmiş bina modeli etrafında oluşmaktadır. Buna karşın, test edilen tüm çekirdek sayılarına sahip modellerde, yükseltilmiş alan ve model arkasındaki art izi bölgelerinde oluşan düşük rüzgar hızı bölgelerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



Şekil 11. $\theta=90^\circ$ rüzgar geliş açısında, a)normal bina modeli ve b)tek, c)iki ve d)üç çekirdekli yükseltilmiş bina modelleri etrafında yaya seviyesi yüksekliğinde yatay düzlemdeki boyutsuz ortalama rüzgar hızı oranı dağılımları

SONUÇLAR

Bu çalışmada, normal bina modeli ile tek, iki ve üç çekirdek ile yerden yükseltilmiş üç farklı yükseltilmiş bina modeli etrafındaki hız dağılımları farklı rüzgar geliş açıları (0° , 45° ve 90°) için sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizlerde, çekirdek sayısının ve rüzgar yönünün bina etrafındaki hız dağılımlarına etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak, ANSYS-FLUENT paket programı üzerinden detaylı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın önemli sonuçları şu şekilde sıralanabilir:

- Tüm rüzgar geliş açılarında, farklı çekirdek sayılarına sahip yükseltilmiş bina modelleri, aynı yükseklikteki normal bina ile karşılaştırıldığında, bina çevresinde oluşan düşük (LWS) ve yüksek rüzgar hızı (HWS) bölgelerinde belirgin değişikliklere neden olmaktadır. Yükseltilmiş bina modelleri, rüzgar geliş tarafındaki düşük rüzgar hızı (ULWS) bölgelerinin etki alanı azaltırken, yüksek rüzgar hızı (HWS) bölgelerinin etki alanı artırmaktadır.

- En geniş HWS bölgesi $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısındaki ve tek çekirdekli yükseltilmiş bina modeli etrafında gözlemlenmiştir.
- $\theta=45^\circ$ rüzgar geliş açısında, ULWS bölgesinin model ön yüzeyinin merkezinden üst köşe noktalarına kaymakta ve bu bölgede daha yüksek hız değerleri oluşmaktadır. Ayrıca, model arkasındaki düşük hızlara sahip simetrik iki akışın birleşerek oluşturduğu DFLWS bölgesinin $\theta=45^\circ$ geliş açısında oluşmadığı görülmüştür.
- $\theta=90^\circ$ rüzgar geliş açısındaki tüm durumlarda, model ön yüzeyine gelen akışın daha kısa bir yüzey alanıyla karşılaşmasından dolayı, akışın daha dar bir alanı etkilediği ve HWS bölgelerindeki hız artışlarının diğer rüzgar geliş açılara kıyasla daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir.
- $\theta=0^\circ$ rüzgar geliş açısında, normal bina modeline kıyasla, farklı çekirdek sayılarına sahip tüm yükseltilmiş bina modelleri etrafında genel olarak daha yüksek alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranı değerleri hesaplanmıştır.
- Alan ağırlıklı ortalama rüzgar hızı oranları incelendiğinde, en yüksek artış, yaklaşık %56 oranıyla tek çekirdekli yükseltilmiş bina modelinde ve A2 numaralı bölgede meydana gelmiştir.

REFERANSLAR

- Blocken, B., Janssen, W.D. & van Hooff, T. (2012). CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 30, 15-34.
- Chen, L. & Mak, C. M. (2021). Numerical evaluation of pedestrian-level wind comfort around “lift-up” buildings with various unconventional configurations. *Building and Environment*, 188, 107429.
- Cürebal, T. (2024). Kare ve dairesel kesitli normal ve yükseltilmiş bina modelleri etrafındaki rüzgar etkilerinin incelenmesi. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Du, Y., Mak, C.M. & Li, Y. (2018). Application of a multi-variable optimization method to determine lift-up design for optimum wind comfort. *Building and Environment*, 131, 242-254.
- Du, Y., Mak, C.M., Huang, T. & Niu, J. (2017). Towards an integrated method to assess effects of lift-up design on outdoor thermal comfort in hong kong. *Building and Environment*, 125, 261-272.
- Du, Y., Mak, C.M., Liu, J., Xia, Q., Niu, L. & Kwok, K.C.S. (2017). Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configurations under three wind direction, *Building and Environment*, 117, 84-99.
- Franke J. (2006). Recommendations of the COST Action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. *The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Yokohama.
- Liu, J., Niu, L., Mak, C.M. & Xia, Q. (2017). Detached eddy simulation of pedestrian-level wind and gust around an elevated building. *Building and Environment*, 125, 168-179.
- Meng F.Q., He B. J., Zhu J., Zhao D. X., Darko A. & Zhao, Z. Q. (2018). Sensitivity analysis of wind pressure coefficients on CAARC standard tall buildings in CFD simulations. *Journal of Building Engineering*, 16:146-158.
- Özmen, Y. (2006). Farklı çatı tipleri ve eğimlerdeki binalar üzerinde rüzgar etkilerinin deneysel ve teorik incelenmesi. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Sha, C., Wang, X., Lin, Y., Fan, Y., Chen, X. & Hang, J. (2018). The impact of urban open space and 'lift-up' building design on building intake fraction and daily pollutant exposure in idealized urban models. *Science of the Total Environment*, 633, 1314-1328.
- Tsang, C.W., Kwok, K.C.S. & Hitchcock, P.A. (2012). Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. *Building and Environment*, 49, 167-181.

- Tse, K.T., Zhang, X., Weerasuriya, A.U., Li, S.W., Kwok, K.C.S., Mak, C.M. & Niu, J.L. (2017). Adopting 'lift-up' building design to improve the surrounding pedestrian-level wind environment. *Building and Environment*, 117, 154-165.
- Xia, Q., Liu, X., Niu, J. & Kwok, K.C.S. (2015). Effects of building lift-up design on the wind environment for pedestrians. *Indoor and Built Environment*, 26(9), 1214-1231.
- Zhang, A., Gao, C. & Zhang, L. (2005). Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12), 891-904.
- Zhang, X. (2018). Wind circulation and pedestrian wind comfort near buildings with a 'lift-up' design. HKUST, İnşaat Mühendisliği, Doktora Tezi, Hong Kong.
- Zhang, X., Tse, K.T., Weerasuriya, A.U., Kwok, K.C.S., Niu, J., Lin, Z. & Mak, C.M. (2018). Pedestrian-level wind conditions in the space underneath lift-up buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 58-69.
- Zhang, X., Tse, K.T., Weerasuriya, A.U., Li, S.W., Kwok, K.C.S., Mak, C.M., Niu, J. & Lin, Z. (2017). Evaluation of pedestrian wind comfort near 'lift-up' buildings with different aspect ratios and central core modifications. *Building and Environment*, 124, 245-257.
- Zheng, C., Li, Y. & Wu, Y. (2016). Pedestrian-level wind environment on outdoor platforms of a thousand-meter-scale megatall building: Sub-configuration experiment and wind comfort assessment. *Building and Environment*, 106, 313-326.

DESIGN OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR FOR WIND POWER PLANTS AND INCREASING ITS EFFICIENCY WITH GENETIC ALGORITHM**Emir ALACA***

PhD.Student, Marmara University, Institute of Pure and Applied Science, Electrical & Electronic Engineering, Istanbul-Türkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-6567-803X

Seçil VARBAK NEŞE

Assis. Prof., Marmara University, Faculty of Technology, Department of Electrical & Electronic Engineering, Istanbul-Türkiye, ORCID: 0000-0002-1118-5085

Abstract

Today, synchronous machines and asynchronous machines are mostly used in wind power plants for electricity generation. As an alternative to these machines, Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSG), which are among the new generation machines frequently used in electric vehicles, can be used. Permanent magnet synchronous generator does not require additional excitation due to the magnets within it. Also, PMSG is a highly efficient, quiet, compact and reliable machine that does not have the losses caused by slip in asynchronous machines and the losses caused by brushes in direct current machines. In this way, it is considered as a machine with advantages such as high efficiency, high power density, high torque, lower loss. PMSG has become more popular and useful with the decreasing magnet costs and the development of power electronics. For this reason, just as it is the most preferred electric machine in electric vehicles, it can also be preferred in wind power plants. In this study, an internal rotor PMSG with channel mounting embedded magnets was designed using ANSYS/Maxwell and ANSYS/RMxprt software. Three levels optimization were made to this designed to increase efficiency. Parametric optimization was applied in the first stage, and genetic algorithm was applied separately in the next two stages, and efficiency increases were achieved at the same volume in each stage. In order to improve efficiency, stator winding spiral counts, magnet thickness and length, and stator slot structure are optimized. Generator efficiency was increased from 83.827% to 95.74% in stages through optimizations. Copper loss was reduced from 89.867 W to 8.426 W. The total loss was reduced from 105,868 W to 24,427 W. Additionally, successful results were obtained for cogging torque and thermal load.

Keywords: Wind generator, surface PM, embedded PM, channel PM, PMSG, inner rotor.

Introduction

We can categorize electrical machines as classical machines that require excitation current structurally, and new generation machines that do not require excitation current due to the permanent magnets they contain. Electrical energy production is generally carried out by synchronous generators. In wind turbines, synchronous generators, asynchronous generators and direct current generators are preferred. Today, as an alternative to these machines, permanent magnet machines eliminate disadvantages such as brushes, commutation, rings and additional excitation. The absence of these disadvantages provides advantages such as less heat, arc-free structure, lower friction, and, if desired, much higher speed. Thus, efficiency increases greatly (Kıyılı & Bilge 2021). However, rotor size decreases and machine can be made in smaller sizes (Patil & Dhamal, 2019). In addition, as rotor weight decreases, inertia moment is lower and a machine with a higher torque/volume ratio is obtained.

The advantages of PMSG and switched reluctance generator have been studied in the literature on this topic (Apata & Oyedokun 2017). PMSG design is made as direct drive gearless (Fandi et al. 2017). In addition to simulation studies on PMSG, experimental studies have also been carried out (Yamashita & Nishikata 2016). A study is conducted on PMSG with surface magnets for sensorless control purposes (Xing et al. 2019). With double rotor magnetless generator design, an efficiency of around 88-89% is achieved (Ullah et al. 2024). A small power PMSG is designed with Matlab/Simulink (Ben et al. 2017). Artificial neural network method is used for PMSG design (Rhaili et al. 2018). Optimization of PMSM with V-shaped permanent magnets has been carried out (Levent et al. 2020). In another study, effects of slot type, magnet type and pole structure on

permanent magnet motors are investigated (Karnavas et al. 2018). In addition, advantages and disadvantages of many electric motors have been taken into consideration and how to choose a motor has been studied (Patil & Dhamal 2019). PMSM types with internal rotor embedded magnets and synchronous reluctance motors were compared (Huynh & Hsieh 2018). In another study, PMSM types with internal rotor embedded magnets are compared (Liu et al. 2016). There is also a study comparing PMSM and asynchronous motor (Yetis & Goktas 2020).

In this study, an internal rotor PMSG with channel mounting embedded magnets was designed using ANSYS/Maxwell and ANSYS/RMxprt software. Three levels optimization were made to this design to increase efficiency. Parametric optimization was applied in the first stage, and genetic algorithm was applied separately in the next two stages, and efficiency increases were achieved at the same volume in each stage. In order to improve efficiency, stator winding spiral counts, magnet thickness and length, and stator slot structure are optimized.

Materials and Methods

I. Mathematical Model of PMSG

D-axis λ_d and q axis λ_q fluxes are expressed as in (1).

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\lambda_d}{dt} &= V_d - R_s \cdot i_d + w_e \cdot \lambda_q \\ \frac{d\lambda_q}{dt} &= V_q - R_s \cdot i_q - w_e \cdot \lambda_d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

D-axis i_d and q-axis i_q currents equations are given as (2).

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{\lambda_d - \lambda_{af}}{L_d} \\ i_q &= \frac{\lambda_q}{L_q} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Electromechanical torque T_e can be calculated by (3).

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot [(\lambda_d \cdot i_q) - (\lambda_q \cdot i_d)] \quad (3)$$

Rotor mechanical angular velocity w_m is expressed as (4).

$$\frac{d}{dt} w_m = \frac{(T_e - T_L - B \cdot w_m)}{J} \quad (4)$$

Where P is the number of poles, rotor electrical angular speed w_e and, rotor RPM n_r are calculated by (5).

$$\left. \begin{aligned} w_e &= w_m \frac{P}{2} \\ n_r &= w_m \frac{30}{2\pi} \cdot P \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

II. Modelling of PMSG

In this study, a synchronous generator with a 24-slot double layer fully mold wound stator and a channel mounted embedded magnet rotor was designed. The stator and rotor view in ANSYS/RMxprt software is given in Figure 1. This machine is designed as a 3-phase with an internal rotor.

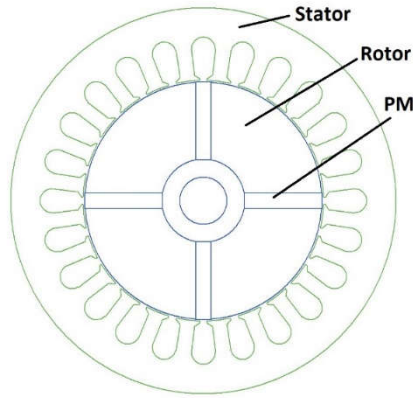


Figure 1. Inner rotor channel mount magnet PMSG

In Figure 2, machine stator structure is given including ABC 3 phase 24 slot full mold winding scheme.

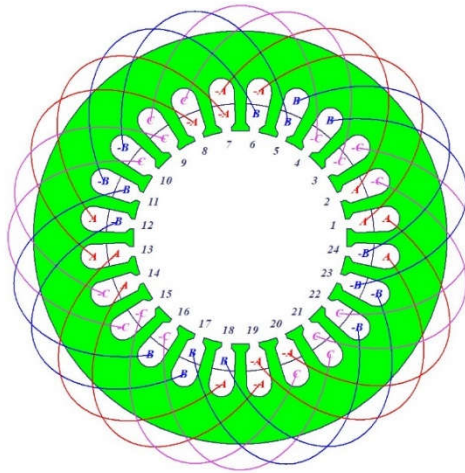


Figure 2. PMSG stator winding diagram

Steel_1008 type steel was preferred in stator and rotor because it has high magnetic permeability and also economical. In rotor, neodymium iron boron (NdFe30) magnet type with high power density was preferred as permanent magnet. Table 1 shows important generator input data.

Table 1. Input parameters

INPUT DATA	PMSG	INPUT DATA	PMSG
Rotor Position	Inner Rotor	Stator Slot Type	2
Magnet Position	Embedded	Stator Skew Width	0
Number of Poles	4	Rotor Outer Diameter	74 mm
Frictional Loss	8 Watt	Rotor Inner Diameter	26 mm
Reference Speed	1500 rpm	Rotor Length	65 mm
Control Type	AC	Rotor Steel Type	Steel 1008
Circuit Type	Y3	Rotor Stacking Factor	0.95
Stator Outer Diameter	120 mm	Rotor Magnet Type	NdFe30
Stator Inner Diameter	75 mm	Load Type	Infinite Bus
Stator Length	65 mm	Rated Output Power	550 Watt
Stator Stacking Factor	0.95	Rated Voltage	220 V
Stator Steel Type	Steel_1008	Rated Speed	1500 rpm
Stator Number of Slots	24	Operating Temperature	75 °C

Efficiency of the model that created with input data in Table 1 is 83.827%. Obtained data from the model are given in Table 2.

Table 2. Output parameters

OUTPUT DATA	PMSG	OUTPUT DATA	PMSG
RMS Line Current	4,234 A	Total Loss	105,87 Watt
Armature Thermal Load	139,871 A ² /mm ³	Output Power	548,736 Watt
Specific Electric Loading	21,562 A/mm	Input Power	654,604 Watt
Armature Current Density	6,489 A/mm ²	Efficiency	83,827 %
Frictional Loss	8 Watt	Apparent Power	1623,82 VA
Iron-Core Loss	0,0004 Watt	Synchronous Speed	1500 rpm
Armature Copper Loss	97,867 Watt		

Findings and Discussion

Firstly, for stator windings, parametric optimization was performed using cross-section and turn number of stator coil conductors. At this stage, 94.64% efficiency was obtained and the 10 most efficient variations are given in Figure 3. Here Cps is the number of turns per slot.

Variation	cps	EfficiencyParameter
37	71	94.64
36	70	94.51
35	69	94.35
34	68	94.16
33	67	93.93
42	76	93.9
43	77	93.89
41	75	93.88
44	78	93.86
40	74	93.84

Figure 3. The 10 most efficient stator winding variations

As a result of parametric optimization performed for stator, winding data in Figure 4 was obtained.

Data: Stator Winding			
	Name	Value	Units
1	Number of Conductors per Slot	71	
2	Number of Strands	1	
3	Wire Diameter	0.9116	mm
4	Wire Wrap	0	mm
5	Average Coil Pitch	5	slot
6	Stator Slot Fill Factor	73.6334	%
7	Coil Half-Turn Length	136.448	mm

Figure 4. PMSG stator optimized winding data

Then, genetic algorithm was applied to stator slot dimensions. The stator slot structure and dimensions subject to optimization are given in Figure 5.

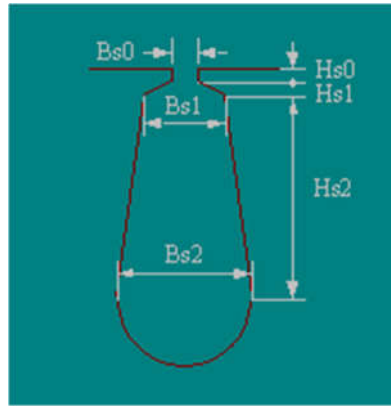


Figure 5. PMSG stator slot structure

The efficiency of model created with dimensions that have the highest efficiency obtained with GA increased to 95.404%. This increase in efficiency, which occurs only by changing dimensions, does not cause additional costs. The 10 different stator slot sizes and efficiency values providing the best efficiency are given in Figure 6.

Evaluation	Bs0	Bs1	Bs2	Hs0	Hs1	Hs2	Cost
1470	1.366mm	5.431mm	8.962mm	0.282mm	0.6149mm	8.816mm	-95.404
1210	1.719mm	5.267mm	8.983mm	0.3387mm	0.5885mm	8.744mm	-95.399
1258	1.269mm	4.791mm	9.009mm	0.3138mm	0.5109mm	9.239mm	-95.395
524	1.633mm	4.908mm	8.831mm	0.2891mm	0.5894mm	9.182mm	-95.391
582	1.318mm	5.495mm	8.863mm	0.3848mm	0.5801mm	8.882mm	-95.385
1090	1.44mm	4.981mm	8.757mm	0.297mm	0.5888mm	9.287mm	-95.381
555	1.571mm	5.226mm	9.145mm	0.3877mm	0.6327mm	8.697mm	-95.371
811	1.348mm	5.143mm	8.93mm	0.3mm	0.5547mm	9.185mm	-95.37
1793	1.621mm	5.132mm	9.024mm	0.2851mm	0.5313mm	9.032mm	-95.368
1239	1.565mm	5.61mm	9.083mm	0.3577mm	0.5325mm	8.417mm	-95.363

Figure 6. The most efficient stator slot dimensions obtained with GA

In stator slot dimensions given in Table 3, the first column shows values before GA application and second column shows the most efficient values obtained as a result of GA.

Table 3. Stator slots dimensions

Slot dimensions (mm)	Without GA	With GA
Hs0	0,5	0,282
Hs1	1	0,615
Hs2	8,2	8,816
Bs0	2,5	1,366
Bs1	5,6	5,431
Bs2	7,6	8,962

Lastly, when the magnet widths and lengths are included in GA, the 10 different magnet sizes with the highest efficiency are given in Figure 7.

Evaluation	Mag_T	Mag_W	Cost
1193	6.985mm	21.96mm	-95.743
819	6.954mm	21.96mm	-95.74
891	6.872mm	21.99mm	-95.734
282	6.838mm	22mm	-95.731
330	6.958mm	21.86mm	-95.73
216	6.924mm	21.88mm	-95.729
782	6.842mm	21.95mm	-95.726
928	6.864mm	21.79mm	-95.712
176	6.772mm	21.88mm	-95.711
1114	6.769mm	21.87mm	-95.709

Figure 7. High efficiency magnet dimensions obtained with GA

In magnet dimensions given in Table 4, the first column shows values before GA application and second column shows the most efficient values obtained as a result of GA.

Table 4. Magnet dimensions

Magnet dimensions (mm)	Without GA	With GA
Magnet Thickness (Mag_T)	5	6,985
Magnet Width (Mag_W)	22	21,96

The 95.743% efficiency is obtained modelling with dimensions in Table 4. The efficiencies provided by 1260 individuals obtained as a result of GA are given in Figure 8. As seen in Figure 8, the efficiency varies between 92.682% and 95.743%.

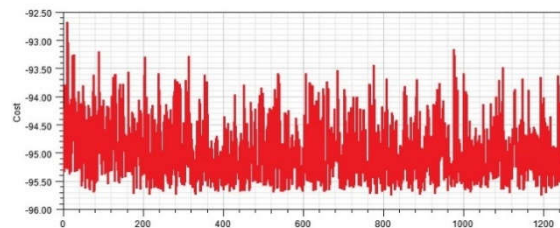


Figure 8. The obtained efficiencies by all GA individuals

The average flux density in tesla of model providing the highest efficiency is given in Figure 9. According to Figure 9, the flux density is high in places where the stator is close to the magnets and less in other places.

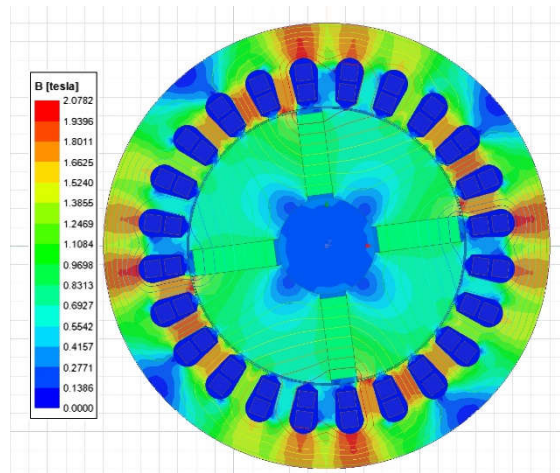


Figure 9. PMSG magnetic flux density

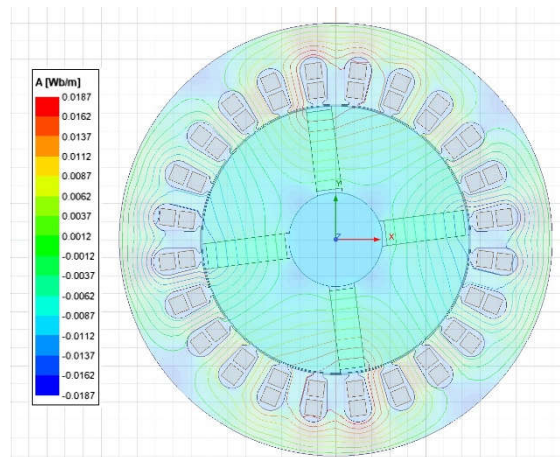


Figure 10. PMSG magnetic flux lines

From the magnetic flux lines in Figure 10, it is seen that the magnetic connection between the stator and rotor shows regularly distribution.

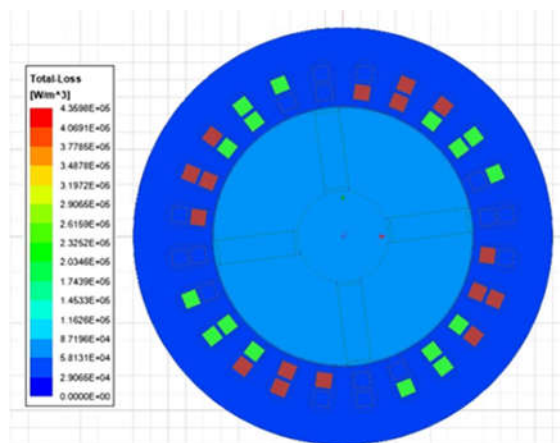


Figure 11. PMSG total loss distribution

The total loss distribution in Figure 11 shows that the losses are extremely low where the magnets are close to the stator, and are higher in other places. The location of losses will also change regularly during movement.

Magnetic flux density vector distribution and current density distribution are given in Figure 12 and Figure 13, respectively.

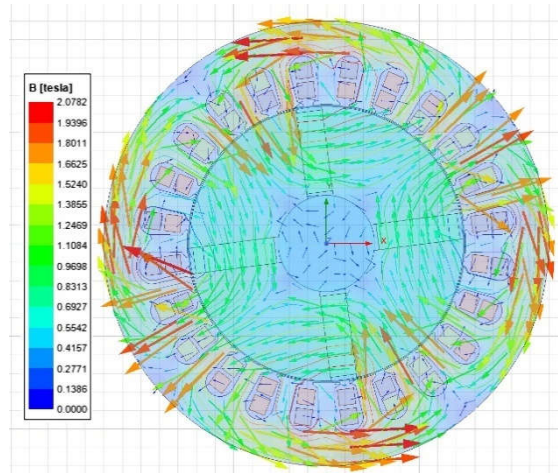


Figure 12. PMSG B vector distribution

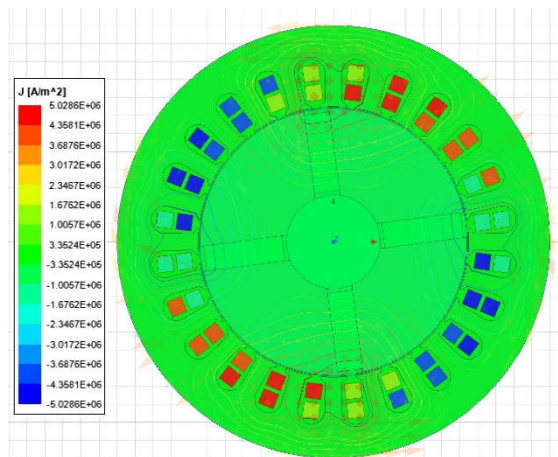


Figure 13. PMSG current density distribution

When all the data are examined, it is seen that the efficiency of PMSGs can reach high levels. Higher efficiency can be achieved by including different components of the machine in the optimization. No special material was used in this study; commercially available steel, copper and magnet materials were used. If special materials are used without cost concerns, the efficiencies achieved in transformers can also be achieved in a rotational electrical machine.

Conclusion and Recommendations

In this study, PMSG was designed using ANSYS/RMxprt and ANSYS/Maxwell software, unlike conventional generators commonly used in wind power plants. Three stages of optimization were applied to the implemented design. Firstly parametric optimization and in the following stages, efficiency increases were achieved with GA. In order to improve efficiency, the stator windings in the first stage, the stator slot structure in the second stage, and the magnets in the third stage were optimized respectively. The following results were obtained with these optimizations.

- Generator efficiency was increased from 83.827% to 95.74% in stages through optimizations.
- Copper loss was reduced from 89.867 W to 8.426 W. Also, the total loss was reduced from 105,868 W to 24,427 W.

- The cogging torque, which causes vibration and speed fluctuation in electric machines, has been reduced from 0.730 Nm to 0.322 Nm.
- The armature thermal load has been reduced from 139,871 A²/mm³ to 23,545 A²/mm³.

In this study, GA was used to increase efficiency of same machine without changing dimensions. In future studies, optimizations can be made for cost reduction or any other purpose.

References

- Ali, R.B., Schulte, H. and Mami, A. (2017). Modeling and simulation of a small wind turbine system based on PMSG generator. *Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, Ljubljana, Slovenia, pp. 1-6, doi: 10.1109/EAIS.2017.7954833.
- Apata, O. & Oyedokun, D.T.O. (2017). Wind turbine generators: Conventional and emerging technologies. *IEEE PES PowerAfrica*, Accra, Ghana. pp. 606-611, doi: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991295.
- Fandi, G, Igbinovia, F.G., Ahmad, I., Svec, J. and Muller, Z. (2017). Modeling and simulation of a gearless variable speed wind turbine system with PMSG. *IEEE PES PowerAfrica*, Accra, Ghana, pp. 59-64, doi: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991200.
- Huynh, T.A. & Hsieh, M.F. (2018). Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*, 11(6), 1385.
- Karnavas, Y.L., Chasiotis, I.D., and Gkiokas, A.D. (2018). An Investigation Study Considering the Effect of Magnet Type, Slot Type and Pole-Arc to Pole-Pitch Ratio Variation on PM Brushless DC Motor Design. *5th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI)*, IEEE, pp.7-13.
- Kıyılı, S. & Bilge H.Ş. (2021). Modeling Brushless Direct Current Motor Of A Guided System. *29th Signal Processing and Communications Applications Conference*, IEEE, pp(1-4).
- Levent, A.H., Lordoglu, A., and Aydeniz, M.G. (2020). Design and Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications. *2nd Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2020)*, October 20-23, IEEE, pp.148-151.
- Liu, X., Chen, H., Zhao, J. And Belahcen, A. (2016). Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), 3533-3545.
- Patil M.S., Dhamal, S.S. (2019). A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System. *Third International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC 2019)*, IEEE, pp.679-684.
- Rhaili, S.E., Abbou, A., El Hichami, N. and Marhraoui, S. (2018). A New Strategy Based Neural Networks MPPT Controller for Five-phase PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine. *7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Paris, France, pp. 1038-1043, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566822.
- Ullah, W., Selama, A., Khan, F. (2024). Design and comparative analysis of dual rotor wound field excited flux switching generator for household DC microgrid system with rooftop wind turbine. *Applied Energy*, 357, 122464, ISSN 0306-2619
- Xing, N., Xia, J., Cao, W., Lin, Z. and Gadoue, S. (2019). A Sensorless and Adaptive Control Strategy for a Wind Turbine Based on the Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator and PWM-CSC. *26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, Moscow, Russia, IEEE, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWED.2019.8664302.
- Yamashita, K.I. & Nishikata, S. (2016). A simulation model of a self-excited three-phase synchronous generator for wind turbine generators. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Capri, Italy, IEEE, pp. 1363-1368, doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525986.
- Yetis, H., & Goktas, A. (2020). Comparative Design of Permanent Magnet Synchronous Motors for low-power industrial applications. *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 8(3), pp.218-224.

THERMAL AND FLOW OF A VACUUM TUBE SOLAR COLLECTOR USING COMPUTATIONAL METHODS**Ali Onur ÇOŞKUN**

Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Sinem KESKİN

PhD. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)

ORCID: 0009-0001-0134-4695

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)

ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

In this study, the process of obtaining hot water using solar energy through collectors was investigated. The energy radiated from the sun is absorbed by the collector surfaces, with the absorber element being responsible for this process. The type of collector analyzed is a liquid-fluid vacuum tube collector. These collectors feature an outermost vacuum tube, inside which there is a straight pipe for heat transmission. First, a solar collector was designed as part of the study. The collector components were drawn and assembled. The designed collector was then imported into ANSYS software. Mesh structures were created, and heat transfer and water flow analyses were performed using a suitable and detailed mesh structure. The fluid was introduced into the pipe at a velocity of 0.6 m/s. The inlet temperature was 20°C, the outlet temperature was 35°C, and the ambient temperature was 15°C. The heat transfer pipe material was copper, and the working fluid was water. As a result of the analyses, the flow rate of water in the pipe, as well as the temperature and pressure distribution on the surfaces, were determined. Streamlines along the pipe and velocity vector distributions at the inlet and outlet of the pipe were also analyzed. It was observed that velocity vectors were more concentrated at the turning and connection points of the pipe. At the pipe outlet, the pressure was calculated to be approximately 3.573×10^3 Pa, and the temperature was around 293.2 Kelvin.

Keywords: Solar energy; Solar collector; Heat transfer analysis.

Introduction

Renewable energy sources are becoming increasingly vital in addressing the global energy crisis and mitigating the adverse effects of climate change. Solar energy, as one of the most abundant and sustainable sources of energy, has gained significant attention due to its ability to provide clean and inexhaustible power (Kabeel et al., 2017, Skoplaki & Palyvos, 2009). Among the various solar energy technologies, vacuum tube solar collectors (VTSCs) have emerged as an efficient solution for harnessing solar energy for domestic and industrial applications, particularly for water heating and space heating systems.

Vacuum tube solar collectors operate on the principle of reducing heat losses by creating a vacuum environment around the absorber tube, minimizing convection and conduction losses. This makes them highly efficient compared to conventional flat plate collectors, especially in colder climates and during low solar radiation conditions (Yu et al., 2024). Despite their advantages, optimizing the thermal performance of VTSCs remains a challenging task due to the complex interactions between heat transfer mechanisms and flow dynamics within the collector system.

Recent advancements in computational methods, particularly Computational Fluid Dynamics (CFD), have provided powerful tools to analyze and optimize the performance of solar collectors (Badar et al., 2012). By simulating thermal and flow behavior, CFD enables detailed insights into the efficiency of heat transfer

processes, pressure drops, and overall system performance under various operational conditions (Raj et al., 2019). This computational approach reduces the need for extensive experimental setups, saving both time and resources. Tuncer et al. [9] redesigned PV/T-air units with grooved absorber surfaces, resulting in a 15.77% increase in exit temperature above the standard system. A study was conducted to compare vacuum-assisted solar drying with open sun drying under the weather conditions of Montreal, Canada. The drying kinetics of tomato slices with different thicknesses (4, 6, and 8 mm) were evaluated, and it was found that the vacuum-assisted solar dryer provided shorter drying times (360, 480, 600 minutes) and superior quality in terms of color retention and rehydration ratio (Rajkumar et al., 2007).

This study aims to perform a thermal and flow analysis of a vacuum tube solar collector using computational methods. The primary objectives are to investigate the thermal and flow characteristics, evaluate flow dynamics within the collector, and identify design parameters that enhance performance. By leveraging CFD, this research seeks to bridge the gap between theoretical modeling and practical implementation, contributing to the development of more efficient and sustainable solar energy systems.

Materials and Methods

Figure 1 shows a vacuum tube solar collector design. This collector has 15 panels. From outside to inside, there is a vacuum tube, inside it is an inner tube made of glass and a heat transfer pipe. The heat energy coming from the sun is transferred to the outer vacuum tube by radiation, while from the vacuum tube to the inner pipes by convection. Thus, heat transfer is provided. The aim here is to heat the fluid and use this heated fluid in certain areas (home, workplace, etc.). The water heated in various collectors can also be used for electricity generation.

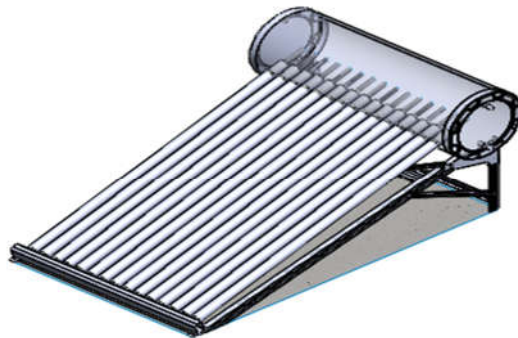


Figure 1. Designed solar collector

In the mesh process, the part is divided into small finite sections that can be calculated, and the analysis result is reached by solving it with the help of equations. We can see the detailed mesh view of the heat transfer pipe turning and connection points.

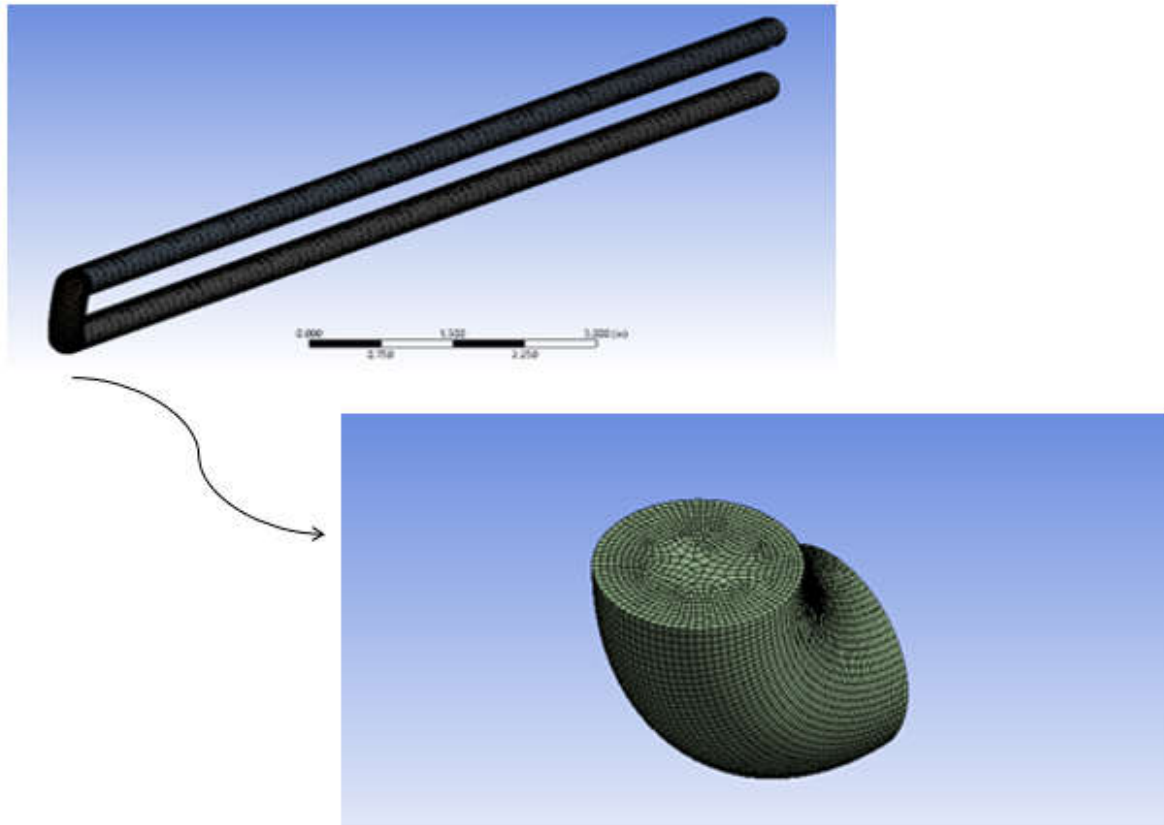


Figure 2. Mesh structure.

Findings and Discussion

The temperature distribution along the collector tube appears relatively uniform, with slight variations observed at the inlet and outlet regions. These temperature differences could result from heat transfer along the tube, changes in fluid velocity, or temperature variations at the inlet conditions. Overall, the tube's thermal conductivity and the effective transport of the fluid indicate efficient heat transfer performance (Figure 3).

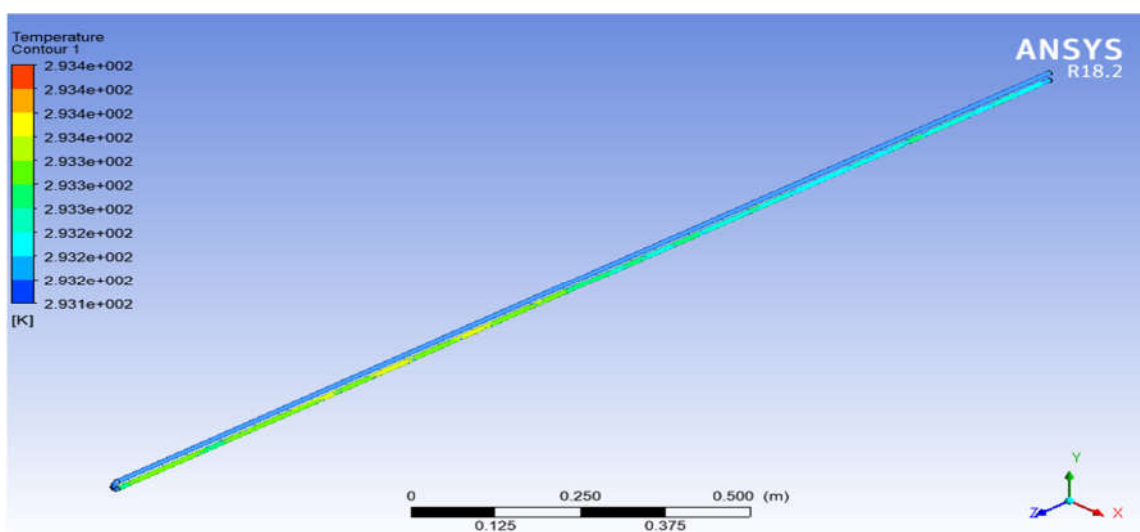


Figure 3. Temperature distribution.

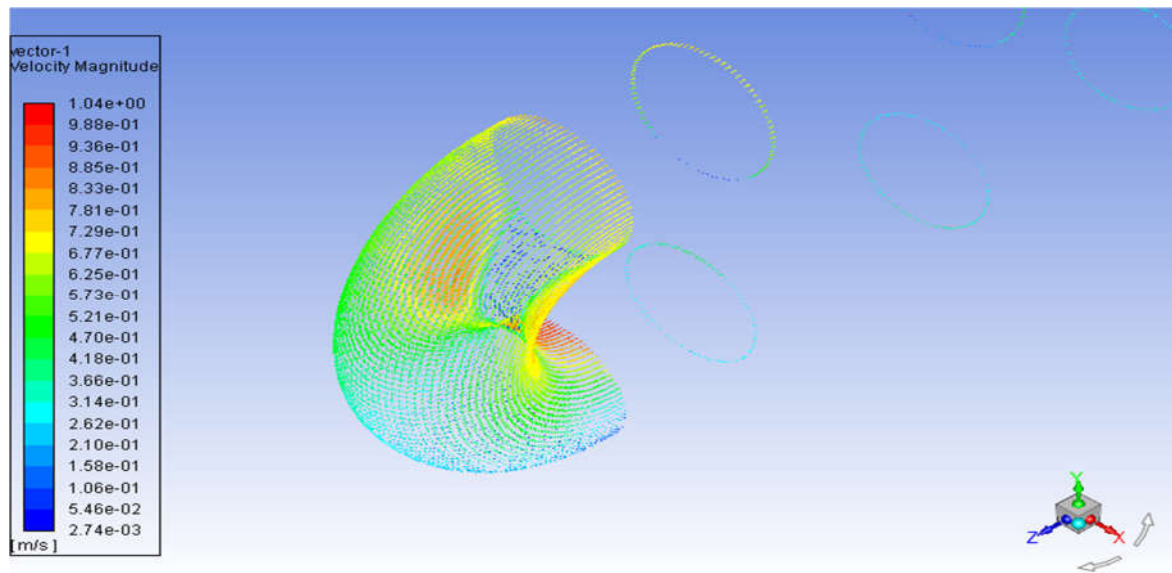


Figure 4. Velocity vectors at turning region of the pipe.

The vectors formed at the turning point show that the flow is quite regular. Because there is a uniform flow in the pipe. We can see that the vector density is higher in this region. Because this region is both a turning point and a connection point.

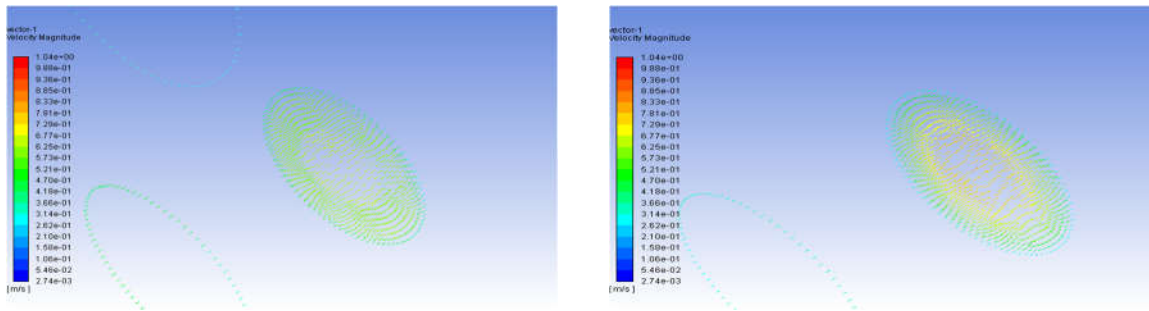


Figure 5. Velocity vectors at the pipe inlet and outlet

There are also dense vectors at the heat transfer pipe inlet and outlet. We can see that the colors change at the pipe outlet. The difference here is due to the temperature difference at the inlet and outlet. Our goal is to heat the fluid. Therefore, the temperature at the pipe outlet should be higher. As a result, the fluid was given to the rotating heat transfer pipe (installation pipe) to be heated. Then, the solar energy coming from the sun through radiation was converted into heat energy, and the resulting heat energy was transferred to the fluid in the pipe through heat transfer. Thus, the water was heated.

Conclusion and Recommendations

A liquid-fluid vacuum tube solar collector was designed and simulated using ANSYS software. Detailed mesh structures were created for accurate heat transfer and fluid flow analysis.

- Simulations showed that the water flow rate was 0.6 m/s, with an inlet temperature of 20°C, an outlet temperature of 35°C, and an ambient temperature of 15°C.

- The temperature distribution on the collector surfaces was relatively uniform, with an outlet temperature of approximately 293.2 K and an outlet pressure of 3.573×10^3 Pa.
- Flow analysis revealed that velocity vectors were more concentrated at the pipe curves and connection points, indicating higher vector intensity in these regions.
- Overall, the study demonstrated that the solar collector efficiently converts solar energy into usable heat, with the design showing good thermal performance through the fluid flow and heat transfer analysis.

Thanks and Information Note

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Kabeel, A. E., Khalil, A., Shalaby, S. M., & Zayed, M. E. (2017). Improvement of thermal performance of the finned plate solar air heater by using latent heat thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 123, 546-553.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- Yu, Q., Chan, S., Chen, K., Zhao, B., Ren, X., & Pei, G. (2024). Numerical and experimental study of a novel vacuum Photovoltaic/thermal (PV/T) collector for efficient solar energy harvesting. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121580.
- Badar, A. W., Buchholz, R., Lou, Y., & Ziegler, F. (2012). CFD based analysis of flow distribution in a coaxial vacuum tube solar collector with laminar flow conditions. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3, 1-15.
- Raj, A. K., Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2019). CFD modeling of macro-encapsulated latent heat storage system used for solar heating applications. *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 88-104.
- Tuncer, A. D., Khanlari, A., Afshari, F., Sözen, A., Çiftçi, E., Kusun, B., & Şahinkesen, İ. (2023). Experimental and numerical analysis of a grooved hybrid photovoltaic-thermal solar drying system. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119288.
- Rajkumar, P., Kulanthaisami, S., Raghavan, G. S. V., Gariépy, Y., & Orsat, V. (2007). Drying kinetics of tomato slices in vacuum assisted solar and open sun drying methods. *Drying Technology*, 25(7-8), 1349-1357.

INTEGRATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND BLOCKCHAIN FOR CARBON EMISSION MANAGEMENT A CASE STUDY AT ERCIYES UNIVERSITY**Koray Alp ARSLAN**

Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Rafet Kerem ALBAYRAK

Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Sinem KESKİN

PhD. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye
ORCID: 0009-0001-0134-4695

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

In this study, an approach is presented to ensure that carbon emissions are calculated and managed accurately, reliably and effectively. In the study, historical carbon emission data obtained from Erciyes University were analyzed with artificial intelligence algorithms. These analyses not only provide the data more meaningful but also established a strategic foundation for future applications. The results were securely recorded using blockchain technology. The blockchain ensured the protection of the data against manipulation and made it verifiable by all stakeholders. This approach enabled companies to manage their carbon emissions faster and more accurately, while also simplifying compliance with legal regulations. Compared to manual methods, the system provided significant advantages in terms of speed, accuracy, and ease of use. The project not only contributed to achieving environmental sustainability goals but also demonstrated how innovative technologies such as artificial intelligence and blockchain can be effectively utilized in environmental management. In this context, it serves as a practical tool and strategic guide to help companies reduce their carbon emissions. The study highlights the potential of technology to develop solutions for environmental challenges.

Keywords: Carbon Emission Management; Artificial Intelligence; Blockchain Technology; Environmental Sustainability.

Introduction

Reducing carbon emissions is critically important in the fight against global warming and climate change today (NASA,2020). Since the Industrial Revolution, the amount of greenhouse gases released into the atmosphere has significantly increased. The emission of carbon dioxide (CO₂) and other greenhouse gases into the atmosphere has enhanced the greenhouse effect, causing the average temperature of the Earth to rise. This situation has led to various environmental issues such as the melting of glaciers, the disruption of ecological balance, and inconsistencies in weather patterns. In light of this information, reducing carbon emissions is vital both environmentally and to ensure the world remains a livable place for future.

To combat climate change, many global corporations are transferring their carbon reduction strategy (Theißen & Spinler, 2014, Alonso et al., 2021). Financial technologies (Fintech) aim to provide innovative solutions by transforming the state of financial services in a digitalizing world (Shih et al., 2023). Fintech is also crucial for monitoring carbon emissions and taking measures related to these emissions. It offers real-time data analysis opportunities through sensors and data monitoring systems.

Kocabaş et al. (Kocabaş et al., 2023) developed prediction models for carbon dioxide (CO₂) emissions from road transportation, which is one of the main causes of global warming. The study covers all provinces in Turkey and utilizes a 20-year dataset from 2001 to 2020. Variables such as Motor Vehicle Count (MKTS), Vehicle Kilometers (TK), Passenger Kilometers (YK), and Road Length (KU) were used as inputs, while the emitted carbon dioxide was taken as the output. The prediction models used in the study include Multiple Linear Regression (MLR), Interaction-Multiple Regression (I-MR), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), and Fuzzy Logic-SMRGT methods. The performance of these models was compared using metrics such as the coefficient of determination (R²), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE). In Özhan's study (Özhan, E., 2020), the focus was on time series forecasting of Turkey's greenhouse gas emissions. Using a 55-year dataset from the World Bank database, analyses were conducted with artificial neural networks (ANN) and exponential smoothing methods. The dataset was transformed into a time series format and divided into training and testing datasets. The ANN model provided more accurate predictions with a lower RMSE value compared to Holt's linear trend model. According to the study's results, Turkey's equivalent CO₂ emissions for 2021 were predicted. In the study conducted by Üreden and Özden, it was highlighted that greenhouse gas emissions, which cause global climate change, have increased due to industrialization, adversely affecting life worldwide. The literature proposes a three-scope approach for institutional-level carbon footprint calculations: direct greenhouse gas emissions, indirect greenhouse gas emissions, and other emissions related to the institution's activities. (Üreden A, Özden S, 2018)

In this study, it was developed to measure, analyze, and manage carbon emissions of companies. Within the scope of the research process, emission data will be collected using sensors and transferred to artificial intelligence (AI). The AI will then calculate and analyze this data. The obtained data will be securely recorded using blockchain technology. This will ensure both the security of the data and provide companies with strategies to help reduce emissions, facilitated by AI. By reducing their carbon emissions, companies will comply with the legal regulations imposed by our country.

Materials and Methods

Within the scope of the study, data on carbon emissions will be collected using sensors. These sensors will be placed in industrial facilities, production lines, and other critical points to provide a continuous data flow. The collected data will be analyzed using AI algorithms, and emission amounts will be calculated. During this analysis process, AI technologies will quickly and effectively process large datasets, and emission sources and amounts will be detailed in reports. The obtained data will be recorded using blockchain technology. Blockchain provides a decentralized and transparent data recording system, ensuring data security and integrity. This way, carbon emission data will be protected against adverse situations and can be verified by all stakeholders. Blockchain technology will also make carbon credit trading more reliable and transparent.

- Real Time Measurement

It is planned to make real-time measurements with sensors to be placed at critical points of the factory or company. In this way, more accurate and up-to-date data will be obtained compared to today's manual measurements.

- Data Analysis and Emission Calculations

The data we collect will be analyzed using artificial intelligence technology and emission calculations will be made. Easy and fast results will be obtained even in large data groups.

- Emission Calculation Formulas

$$EtCO_{2/yil} = \left\{ \left(\frac{FV_{kWh}}{yil} \times EF_{\frac{kgCO_2}{kWh}} \times I\&DK\% \right) + \left(\frac{FV_{kWh}}{yil} \times EF_{\frac{kgCO_2}{kWh}} \right) \right\} \times 10^{-3} \quad (1)$$

Where:

- EtCO₂ = Amount of emissions in tons of carbon dioxide
- FV = Activity Data (kWh/year) total annual electricity consumption
- EF = Emission Factor (kgCO₂/kWh) (for Turkey, it is taken as 0.4603 kgCO₂/kWh, and detailed information can be obtained from TEİAŞ annual reports) (Anonymous, 2015; Anonymous 2016)
- T&D Loss = Transmission and Distribution Losses (%13.3) (for Turkey, it is taken as an average of %13.3, and detailed information can be obtained from TEİAŞ annual reports) (Anonymous, 2015; Anonymous 2016)
- 10⁻³ = Conversion factor from kilograms to tons (Üreden A, Özden S, 2018)

$$EtCO_2 = \left(\left(\left(\frac{DOY_{\frac{kg}{m^3}} \times DK_{\frac{m^3}{yil}}}{m^3} \right) \times 10^{-3} \right) \times \left(\frac{EF_{\frac{kgCO_2}{TJ}}}{TJ} \times 10^{-3} \right) \times YF_{TJ} \times OF \right) \quad (2)$$

Where:

- EtCO₂ = Total natural gas emissions
- DOYkg/m³ = Average density of natural gas (conversion factor from cubic meters to kilograms of natural gas (Anonymous, 2018b)) (DOY = 0.85)
- DKm³/year = Annual natural gas consumption (in cubic meters per year)
- 10⁻³ = Conversion factor from kilograms to tons
- EFkgCO₂/TJ = Emission Factor (accepted as "3.664" in IPCC guidelines)
- YFTJ = Oxidation Factor (accepted as "1" in IPCC guidelines)
- OF = Oxidation Factor (accepted as "1" in IPCC guidelines) (Üreden A, Özden S, 2018)

$$EtCO_2 = \left(\left(\left(\frac{BOY_{\frac{kg}{m^3}} \times BK_{\frac{l}{yil}}}{m^3} \right) \times 10^{-3} \right) \times \left(\frac{EF_{\frac{kgCO_2}{TJ}}}{TJ} \times 10^{-3} \right) \times YF_{TJ} \times OF \right) \quad (3)$$

Where:

- EtCO₂ = Total gasoline emissions
- BOYkg/m³ = Average density of gasoline (conversion factor from liters to kilograms of gasoline) (Anonymous, 2018b) (BOY = 740)
- BKl/year = Annual gasoline consumption (in liters per year)
- 10⁻³ = Conversion factor from kilograms to tons (Üreden A, Özden S, 2018)
- EFkgCO₂/TJ = Emission Factor (accepted as "3.664" in IPCC guidelines) (Üreden A, Özden S, 2018)
- YFTJ = Oxidation Factor (accepted as "1" in IPCC guidelines)
- OF = Oxidation Factor (accepted as "1" in IPCC guidelines) (Üreden A, Özden S, 2018)

$$EtCO_2 = \left(\left(\left(\frac{MOY_{\frac{kg}{m^3}} \times MK_{\frac{l}{yil}}}{m^3} \right) \times 10^{-3} \right) \times \left(\frac{EF_{\frac{kgCO_2}{TJ}}}{TJ} \times 10^{-3} \right) \times YF_{TJ} \times OF \right) \quad (4)$$

Where:

- $EtCO_2$ = Total diesel emissions
- $MOYkg/m^3$ = Average density of diesel (conversion factor from liters to kilograms of diesel) (Anonymous, 2018b) (MOY = 850)
- $MK\ell/year$ = Annual diesel consumption (in liters per year)
- 10^{-3} = Conversion factor from kilograms to tons
- $EFkgCO_2/TJ$ = Emission Factor (accepted as "3.664" in IPCC guidelines)
- $YFTJ$ = Oxidation Factor (accepted as "1" in IPCC guidelines)
- OF = Oxidation Factor (accepted as "1" in IPCC guidelines) (Üreden A, Özden S, 2018)

$$EtCO_2/yil = (W_{yil} \times F_{kgCO_2} \times EK F_{kgCO_2} \times EF_{kgCO_2}) \quad (5)$$

Where:

- $EtCO_2/year$ = Total waste emissions
- $Wyil$ = Waste amount (tons)
- Fkg/CO_2 = Waste management factor ($F = 0.2 \text{ kgCO}_2/kWh$)
- $EKFkg/CO_2$ = Energy usage factor ($EKF = 0.5 \text{ kgCO}_2/kWh$)
- $EFkg/CO_2$ = Emission factor ($EF = 0.3 \text{ kgCO}_2/kWh$) (Üreden A, Özden S, 2018)

- Data Security

Data security will be ensured by storing the obtained data and calculation results in a secure environment with blockchain technology. In this way, it will be ensured that carbon emission data is protected against manipulations and can be monitored and verified by all partners.

Findings and Discussion

The used regression models (Linear, Lasso, Elasticnet, Ridge) were presented in Figure 1. Monitoring and analyzing carbon emissions are of great importance both in theory and in practice. Theoretically, this study has highlighted the significance of integrating emerging technologies for the accurate and efficient measurement and management of carbon emissions. By combining advanced technologies such as automated sensors, artificial intelligence, and blockchain, emission management processes have become easier, more efficient, and more reliable.

As seen in Figure 2, emission amounts have remained at approximately 40000,000 tCO₂ over the years. A sudden decrease was observed in 2020, when the pandemic was effective.

In practice, these approaches have facilitated companies in achieving their sustainability goals and complying with legal requirements and regulations set by governments. The real-time collection and analysis of data allow companies to quickly identify and implement their future strategies.

The accuracy and reliability of this system depends on the quality of the sensors, the accuracy of the artificial intelligence algorithms, and the reliability of the blockchain infrastructure. Therefore, regular calibration and updates of the system are necessary to maintain its effectiveness.

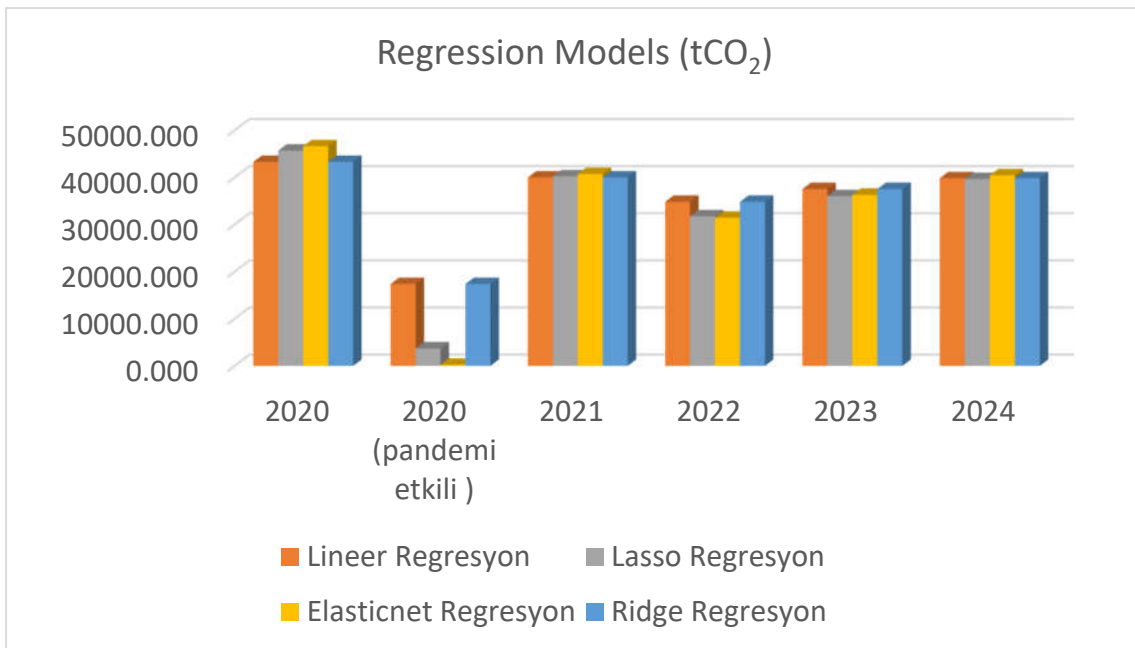


Table 1. Used regression models.

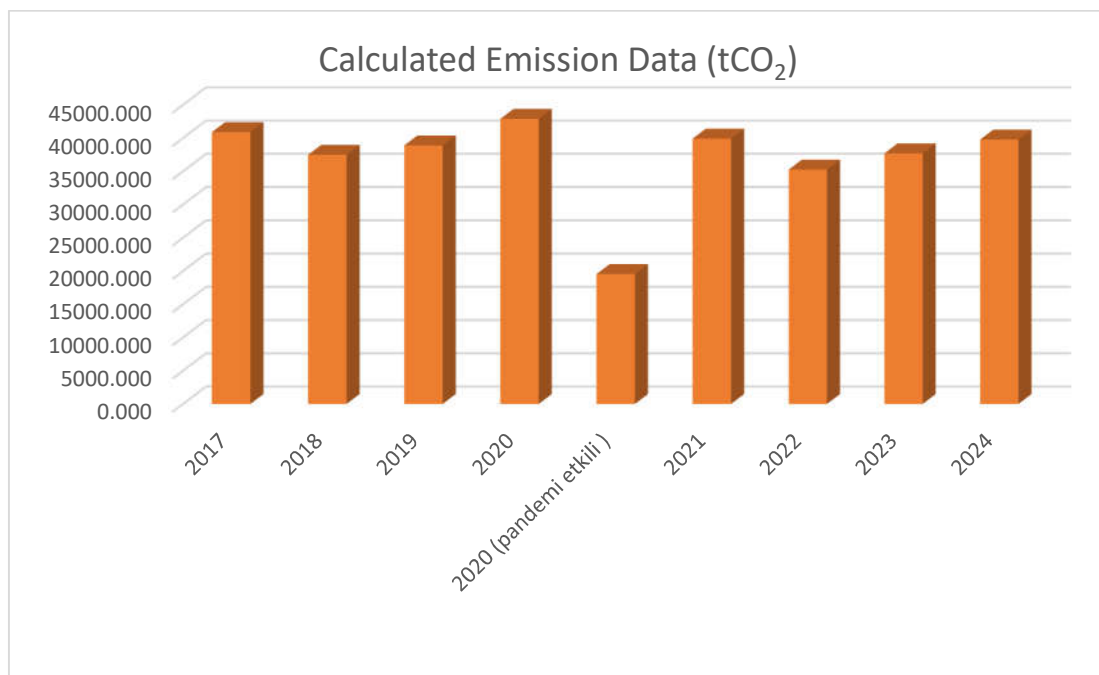


Table 2. Calculated emission data based on regression models over the years.

Conclusion and Recommendations

This study demonstrated the potential of integrating artificial intelligence and blockchain technologies to address environmental challenges, specifically in the management of carbon emissions. By analyzing historical emission data and securely recording the results, the proposed system ensured accuracy, reliability, and efficiency, offering significant advantages over traditional manual methods. The integration of advanced technologies simplified compliance with legal regulations, enhanced data transparency, and provided companies with a robust framework for achieving their sustainability goals. Moreover, the findings underscore the transformative role of technology in environmental management, serving as a strategic tool for future applications aimed at reducing carbon emissions and fostering global environmental sustainability.

Thanks and Information Note

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Shih, C. M., Gwizdalski, A., & Deng, X. (2023). Building a Sustainable Future: Exploring Green Finance, Regenerative Finance, and Green Financial Technology. *World Scientific Annual Review of Fintech*, 1, 2350002.
- NASA. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Available online: <https://climate.nasa.gov/causes/> (accessed on 22 November 2024).
- Theißen, S., & Spinler, S. (2014). Strategic analysis of manufacturer-supplier partnerships: An ANP model for collaborative CO₂ reduction management. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 383-397.
- Alonso, A. A., Álvarez-Salgado, X. A., & Antelo, L. T. (2021). Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123873.
- Kocabaş, H., Üneş, F., Taşar, B., & Cansız, Ö. F. (2023). Türkiye Karayollarındaki Karbondioksit Emisyonunun Yapay Zekâ Yöntemleri ile Tahmini. *Türkiye Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(2), 82-101.
- Özhan, E. (2020). Time series estimation of CO₂ emissions in Turkey using artificial neural networks and exponential smoothing method. *European Journal of Science and Technology*, (19), 282-289.
- Üreden A, Özden S (December 1, 2018) How to Calculate Corporate Carbon Footprint: A Theoretical Study. *Journal of Anatolian Forest Research* 4 2 98–108.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT SHAPES APPLIED TO THE TRAILING EDGE OF THE NACA2415 AIRFOIL ON AERODYNAMIC PERFORMANCE**Nisanur ASLAN**

Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Muhammed HATEM

M.Sc. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye

Sinem KESKİN

PhD. Student, Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0009-0001-0134-4695

Mustafa Serdar GENÇ

Prof. Dr., Wind Engineering and Aerodynamic Research Center, Eciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri-Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0000-0002-6540-620X

Abstract

This study for wind power plants, one of the renewable energy sources that make significant contributions to the energy independence of our country, aims to examine the effect of design changes at the trailing edge of the turbine blades on the performance. By focusing on the lift and drag forces of the blades at different angles, the study aims to evaluate the effects of the changes in the trailing edge geometry on the blade aerodynamic performance. Blunt and curved airfoil geometries were designed. C type mesh process was applied on the flow area created. The mesh process gives us preliminary information about the accuracy and precision of our calculations. As turbulence model, k-omega SST was selected since its advanced wall function capabilities on boundary layer solutions. This model is widely used for complex models of flow. By comparing the lift coefficient (C_L) and drag coefficient (C_D) values for different Reynolds numbers (1×10^5 , 2×10^5 , 3×10^5) and angles of attack (0° - 16° by 2 degrees), we have investigated the effects of these values on aerodynamic performance. From the results of the study, it is observed that different trailing edge geometries may improve the aerodynamic performance of the airfoil at some cases.

Keywords: Lift; Drag; Airfoil; NACA 2415; Fluent.

Introduction

With the increase in the world population, energy demand is also increasing. Renewable energy sources and fossil fuels are used to meet this energy demand. The fact that fossil fuels have a certain lifetime and the damage to the environment increase the importance of renewable energy sources day by day. Wind energy is one of these sources (Chehouri et al., 2015). The airfoil of wind turbines is the most important part of this source. The performance of airfoils is related to the lift (C_L) and drag (C_D) force. C_L/C_D ratio determines aerodynamic performance. The lift force is generated based on Bernoulli's principle. According to this principle, as the velocity of a fluid increases, its pressure decreases. In the airfoil, the fluid velocity on the upper surface is greater than the lower surface. Therefore, a lower pressure is generated from the upper surface than the lower surface. This pressure difference is the main factor that creates the lift force (Tanürün et al., 2020).

Genc et al (2008) carried out an experimental study investigating the flow forces at very low Reynolds numbers around the NACA 2415 airfoil. The results obtained in the study were compared with other studies and experimental methods in the literature. The methods used are PIV experiment, flow visualization with smoke

wire, force measurement, flow visualization with oil, pressure measurement on the blade and hot wire anemometer. As a result of the experiment, it was found that at low Reynolds numbers, with the increase of the angle of attack, the laminar separation bubble moves towards the edge of attack and a short separation bubble is formed.

In this study, NACA 2415 airfoil at different angles of attack for Reynolds numbers of 100,000 – 200,000 and 300,000 were analyzed. The angle of attack (α) is the angle between the streamlines and the chord line of the airfoil in aerodynamics (Yildiz et al., 2015). It is usually between ($\alpha < 15 \sim 20^\circ$). The study will be carried out on normal, blunt and curved airfoils. In a normal wing, as the Reynolds value increases, the lift value increases and only the drag value decreases. The increase in the angle of attack causes an increase in lift values and a decrease in drag values. It can be stated that the blunt rear end of the airfoil is probably lower than the normal wing rear end. However, if it is curved, it may cause an increase in lift values. In addition, the increase in Reynolds number; mostly increases the lift value and decreases the drag value. The reason for the decrease in drag value is that turbulence reduces drag.

Numerical Methods

- Geometry Design

The data for the NACA 2415 profile was obtained from the Airfoil Tools platform and a normal airfoil was created based on this data. The design process was initiated in SolidWorks and aerodynamic analyses were performed in ANSYS-Fluent. The vane length of the normal wing and curved wing analyzed in the study was determined as 1,000 mm, while the vane length of the blunt wing was designed as 750 mm. Geometry designs were completed by applying various angles of attack to these different wing types. Figure 3 shows the visuals of the designed wing geometries at the angle of attack 0°

($\alpha = 0^\circ$).

NACA 2415 profile has a maximum camber of 2%, position of maximum camber 40% of chord and a value of 15% as a ratio of total thickness to chord length. These characteristics were taken as reference in the design and analysis processes of the wing geometries.

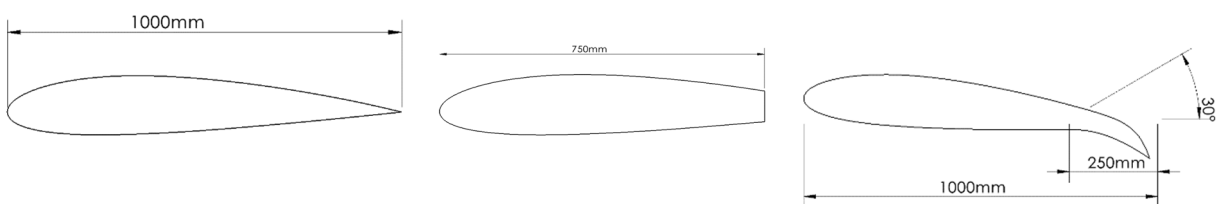


Figure 1. Different Trailing Edge Geometries

- Flow Domain and Mesh Selection

The basic approach used in airfoil analyses is to create a flow field where the flow will occur and to extract the geometry to be analyzed from this field. This is a frequently preferred procedure in fluid dynamics analysis (Radhakrishnan & Dheepthi, 2019). The space formed as a result of this process represents a solid surface to be analyzed and results are obtained by considering the flow characteristics around this surface.

Firstly, a flow field must be designed where the flow will take place. In this study, pre-designed airfoils were transferred to the system using SolidWorks. Then, a flow field was defined for these airfoils by means of

SpaceClaim module in ANSYS-Fluent software. The flow field used in this process was designed to accurately model the flow around the geometry being analyzed and was optimized to increase the accuracy of the analysis.

C-type mesh was preferred for the creation of the flow field. C-type mesh provides an ideal mesh structure with its flexibility and adaptability for airfoils with complex geometries (Witteveen, 2010). C-type mesh stands out as an important parameter that increases the accuracy of the analysis, especially on surfaces with high curvature or detailed geometries.

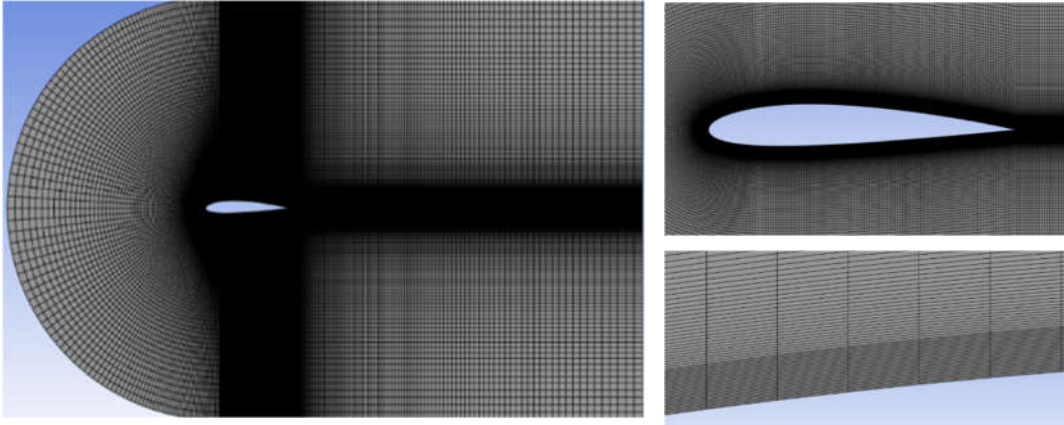


Figure 2. Normal Trailing Edge Wing Mesh Structure

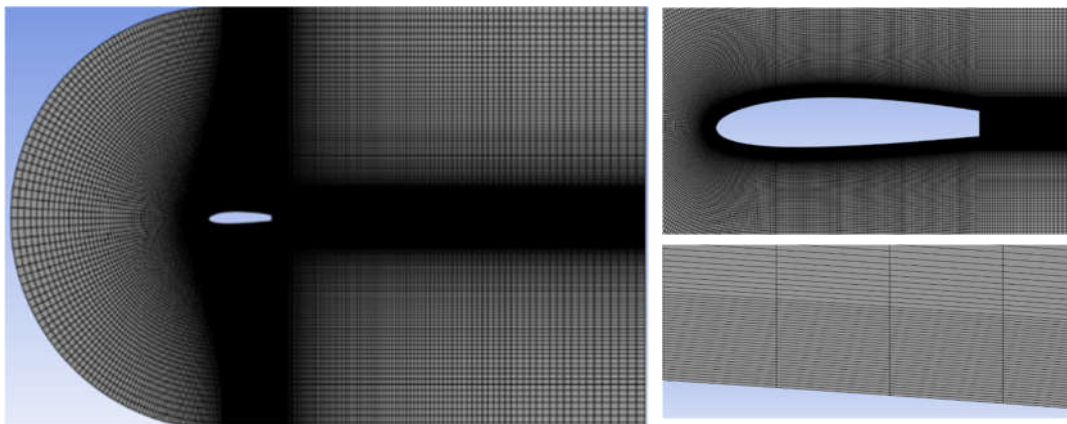


Figure 3. Blunt Trailing Edge Wing Mesh Structure

A distorted mesh structure will significantly reduce the accuracy of the analysis results. The structural mesh specifications used in this study cover a 5,000 mm diameter and 5,000 mm long flow field. These dimensions will be sufficient solution area for the analyses to be performed accurately.

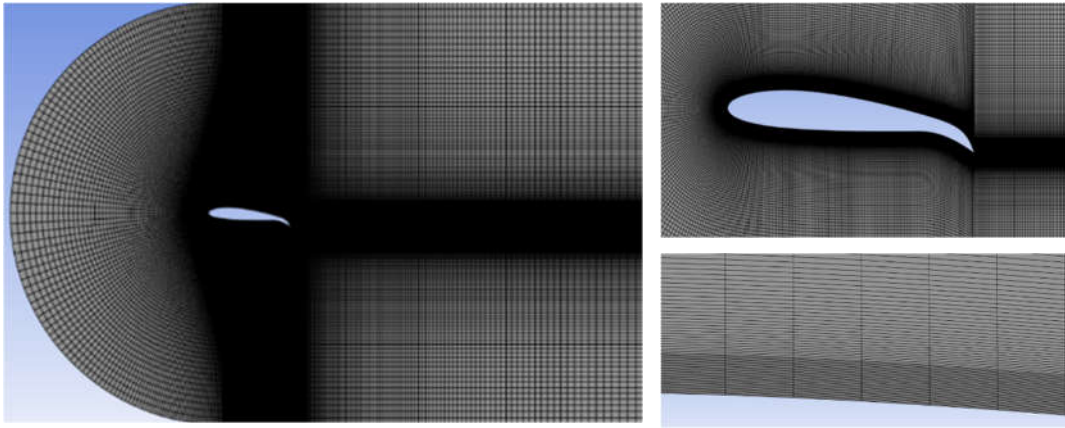


Figure 4. Curved Trailing Edge Wing Mesh Structure

- Turbulence Model

The flow model used in the solution was determined as SST k-omega. The SST k-omega flow model is a RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) model used to describe turbulence in the flow (Malone et al., 1991). This model is based on two equations that describe the turbulence in the flow:

k: Represents the density of energy stored in the turbulent components of the flow.

omega: Represents the dissipation rate of turbulence energy.

The SST k-omega model is an approach developed to accurately model both boundary layer flows and the overall flow behavior at high Reynolds numbers. In this context, it is necessary to determine the appropriate inlet velocities for the analyzed flow. The velocity values corresponding to Reynolds numbers 100,000, 200,000 and 300,000 will be calculated as three different velocities by the following formula (Jones, 2008):

$$Re = \frac{\rho \times V \times x}{\mu} \quad (2.1)$$

Reynolds Number	100000	200000	300000
Characteristic Length [m]	1	1	1
Fluid Density [kg/m ³]	1.225	1.225	1.225
Dynamic Viscosity of the Fluid [Ns/m ²]	0.000017894	0.000017894	0.000017894
Fluid Velocity [m/sn]	1.460734693	2.921469388	4.382204082

Table 1. Values for Normal and Curved Wing Profiles

The decrease in the vet length leads directly to an increase in the flow velocity. Therefore, the velocity values analyzed in this study were determined in accordance with the varying chord length.

Reynolds Number	100000	200000	300000
Characteristic Length [m]	0.75	0.75	0.75
Fluid Density [kg/m ³]	1.225	1.225	1.225
Dynamic Viscosity of the Fluid [Ns/m ²]	0.000017894	0.000017894	0.000017894
Fluid Velocity [m/sn]	1.947646259	3.895292517	5.842938776

Table 2. Values for Blunt Wing Profile

Findings and Discussion

In order for the aerodynamic performance of airfoils to be more efficient, the lift coefficient should be high, and the drag coefficient should be low. An increase in the lift coefficient allows the wing to carry more load or take off at a shorter distance. Also, since every increase in drag coefficient increases fuel consumption, it is desirable to keep this coefficient as low as possible. The lift and drag values obtained for different Reynolds numbers are presented below.

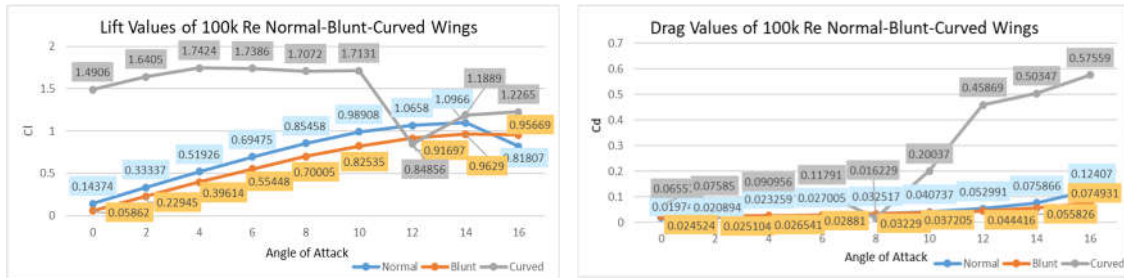


Figure 5. Lift and Drag Values at Re = 100,000

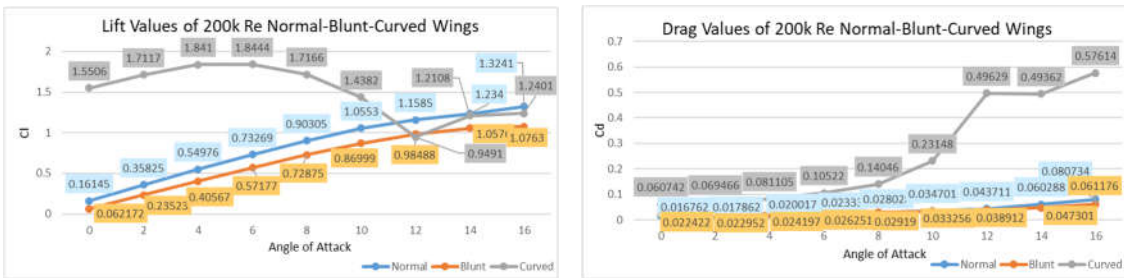


Figure 6. Lift and Drag Values at Re = 200,000

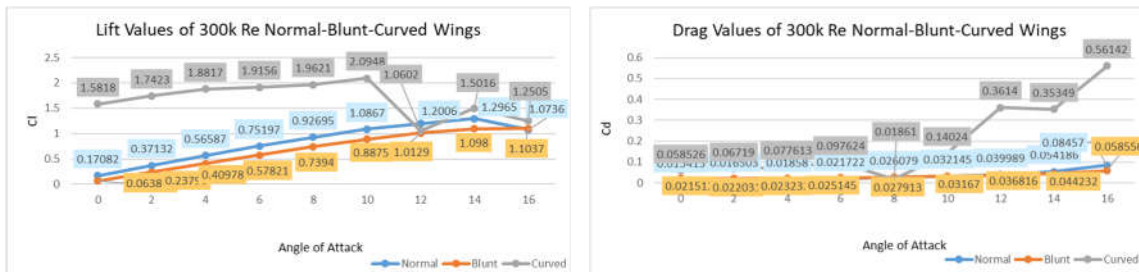


Figure 7. Lift and Drag Values at Re = 300,000

As can be seen from the graphs, the lift and drag values of a blunt trailing edge wing are quite similar to those of a normal wing. However, it is observed that both wings reach stall state at 16 degrees angle of attack. On the other hand, the lift and drag values of the designed curved wing are significantly different from the other two wings. The stall angle of this wing was found to be 6 degrees. This shows that the geometrical changes at the trailing edge of the wing have a significant effect on the aerodynamic performance.

- Pressure Values at 0° and 16° Angles of Attack at 100,000 Reynolds Number

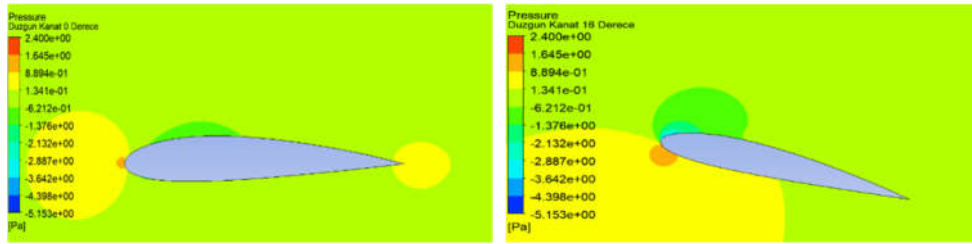


Figure 8. Re=100,000 Pressure Contour for Normal Wing

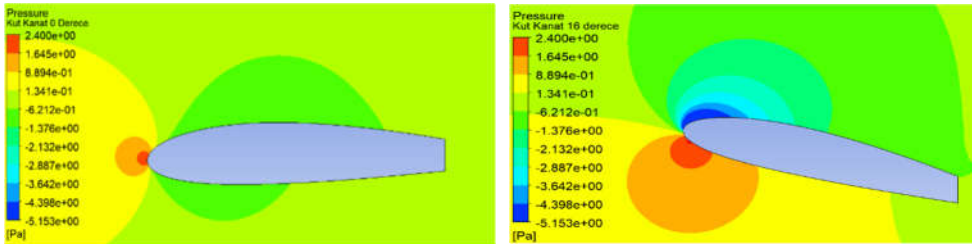


Figure 9. Re=100,000 Pressure Contour for Blunt Wing

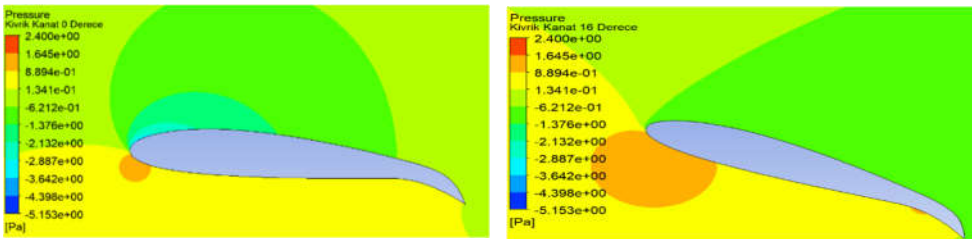


Figure 10. Re=100,000 Pressure Contour for Curved Wing

- Velocity Values at 0° and 16° Angles of Attack at 100000 Reynolds Number

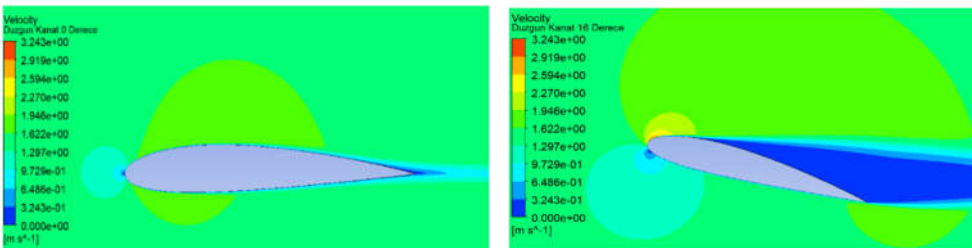


Figure 11. Re=100,000 Velocity Contour for Normal Wing

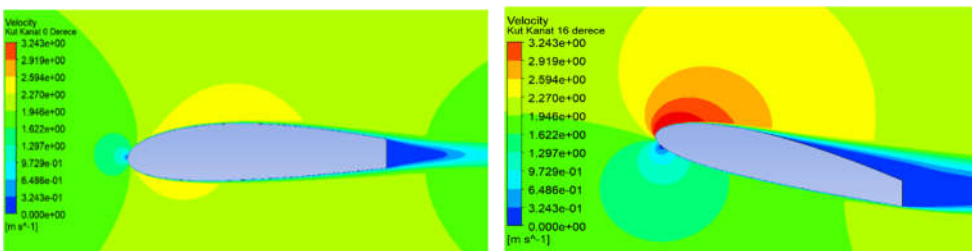


Figure 12. Re=100,000 Velocity Contour for Blunt Wing

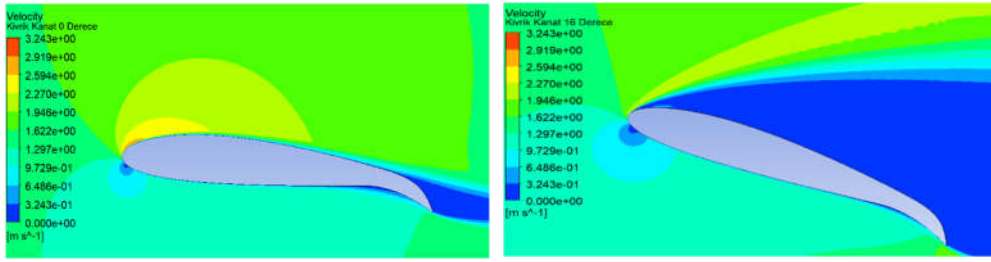


Figure 13. Re=100,000 Velocity Contour for Curved Wing

Conclusion and Recommendations

A striking point among the results is the inverse proportionality between lift and drag forces depending on the change of the angle of attack. As the angle of attack increases, the pressure difference between the upper and lower surfaces of the airfoil increases. This is due to the fact that the air flow velocity on the upper surface increases more than the lower surface and leads to an increase in the lift force. However, when the angle of attack exceeds a certain critical value (stall point), the airflow on the upper surface separates from the airfoil. This separation causes a sudden drop in lift and complex changes in drag. As the angle of attack increases, the interaction of the airflow with the surface becomes complex and the aerodynamic performance is adversely affected. Therefore, aerodynamic behavior up to the critical angle of attack should be taken into account in wing design.

Thanks and Information Note

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- ANSYS, “Ansys Fluent Fluid Simulation Software.” 2023.
- Chehouri, A., Younes, R., Ilinca, A., & Perron, J. (2015). Review of performance optimization techniques applied to wind turbines. *Applied Energy*, 142, 361-388.
- H. E. Tanürün, İ. Ata, M. E. Canlı ve A. Acır, Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 371-381, 2020.
- Genc, M., Lock, G., Kaynak, U. An experimental and computational study of low Re number transitional flows over an aerofoil with leading edge slat. In *The 26th Cong. of ICAS and 8th AIAA ATIO*, 2008; p. 8877.
- Yildiz, F., Turkmen, A. C., Celik, C., & Sarac, H. I. (2015, July). Pitch angle analysis of NACA 2415 airfoil. In *Proceedings of the World Congress on Engineering (Vol. 2, pp. 1-3)*.
- UIUC Airfoil Coordinates Database, “NACA 2415 (naca2415-il),” UIUC Airfoil Coordinates Database.
- Radhakrishnan, P. M., & Dheepthi, M. (2019). CFD Analysis of NACA 2415 and 23012 Airfoil. *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*, 7, 11-17.
- Witteveen, J. (2010, January). Explicit and robust inverse distance weighting mesh deformation for CFD. In *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (p. 165)*.
- Malone, J. B., Narramore, J. C., & Sankar, L. N. (1991). Airfoil design method using the Navier-Stokes equations. *Journal of Aircraft*, 28(3), 216-224.
- Jones, L. E. (2008). Numerical studies of the flow around an airfoil at low Reynolds number (Doctoral dissertation, University of Southampton).

Conlan-Smith, C., Ramos-García, N., Sigmund, O., & Andreasen, C. S. (2020). Aerodynamic shape optimization of aircraft wings using panel methods. *AIAA Journal*, 58(9), 3765-3776.

Sheikh, H. M., Lee, S., Wang, J., & Marcus, P. S. (2023). Airfoil optimization using design-by-morphing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(4), 1443-1459.

**NACA 4415 PROFİLLİ KARBON FİBER KANAT İÇİN TİTREŞİMİN SAYISAL İNCELENMESİ****M. Furkan BEREKET**

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5102-123X>

H. Hakan AÇIKEL

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye
ORCID: 0000-0001-5327-0440

Gamze GENÇ

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye
(Responsible Author), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-2161>

Özet

Bu çalışmada, karbon fiber malzemeden yapılmış küçük güçlü rüzgâr türbinine ait NACA 4415 kanat yapısındaki kanat profilinin yorulmaya bağlı hesaplamaları yapılmıştır. Kanat yapılarında en çok kullanılan malzeme olan karbon fiber'in farklı hızlarda gerilme ve titreşime bağlı gerilme sonuçları karşılaştırılmıştır. Rüzgâr türbini kanatları, aerodinamik verimliliğin artırılması ve yapısal dayanımın optimize edilmesi açısından kritik bir role sahiptir. Bu kapsamda, karbon fiberin hafiflik, yüksek mukavemet ve titreşim davranışı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, farklı rüzgar hızlarında deformasyon ve titreşime bağlı deformasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Sayısal analizler yoluyla titreşimlerin malzeme ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda, malzeme modelleri, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiş, titreşim modları ve frekansları üzerindeki etkiler detaylandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda karbon fiber malzemesinin titreşimle deforme miktarının arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Doğal Frekans, Malzeme Performansı

NUMERICAL ANALYSIS OF VIBRATION FOR NACA 4415 PROFILED CARBON FIBER WING**Abstract**

In this study, fatigue-related calculations were performed for the NACA 4415 blade profile of a small-scale wind turbine made of carbon fiber material. Stress and vibration-induced stress results at different speeds were compared for carbon fiber, the most commonly used material in blade structures. Wind turbine blades have a critical role in increasing aerodynamic efficiency and optimizing structural strength. In this scope, material models were analyzed using the finite element method (FEM), and the effects on vibration modes and frequencies were detailed. In the presented study, deformation and vibration-related deformation results at different wind speeds were evaluated. The effects of vibrations on material life were investigated through numerical analysis. In this context, material models were analyzed using the finite element method (FEM), and the effects on vibration modes and frequencies were detailed. According to the obtained results, it was observed that the amount of deformation of the carbon fiber material with vibration increased.

Keywords: Finite Element Method (FEM), Natural Frequency, Material Performance

Giriş

Enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların çevresel etkilerinin küresel ölçekte bir sorun haline gelmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini giderek artırmaktadır. Rüzgâr enerjisi, temiz, sürdürülebilir ve geniş bir kullanım potansiyeline sahip olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren anahtar teknolojilerden biridir ve bu türbinlerin performansını belirleyen en kritik bileşenlerden biri kanat yapılarıdır.

Rüzgâr türbini kanatları, aerodinamik tasarım, yapısal dayanım ve uzun ömürlü kullanım gibi birçok gereksinimi karşılamalıdır. Kanatların performansı, sadece enerji üretim kapasitesini değil, aynı zamanda türbinin ekonomik ömrünü ve bakım maliyetlerini de doğrudan etkiler. Bu nedenle, kanat malzemelerinin seçimi ve tasarımı, rüzgâr türbini mühendisliğinde büyük önem taşır. Hafiflik, yüksek mukavemet ve çevresel koşullara dayanıklılık özellikleri nedeniyle karbon fiber kompozit malzemeler, kanat yapımında sıkça tercih edilmektedir. Ancak bu malzemelerin yorulma davranışları, özellikle titreşimlerin bu davranışlar üzerindeki etkileri, literatürde henüz tam anlamıyla açıklığa kavuşmamış bir araştırma alanıdır.

Titreşimler genellikle mekanik, elektromanyetik veya akustik etkilerle oluşabilir. Örneğin, bir yayın gerilmesi veya bir sismik dalga gibi mekanik etkiler, bir elektromanyetik alan veya manyetik alan gibi elektromanyetik etkiler, bir ses dalgası veya bir ultrasonik dalga gibi akustik etkiler titreşimlere neden olabilir (Sadiku, 2018). Titreşim, rüzgâr türbinlerinin çalışması sırasında sıklıkla karşılaşılan bir olgudur. Türbin kanatlarının titreşimleri, özellikle uzun süreli kullanımlarda malzemede deformasyona ve yorulmaya neden olarak yapısal dayanımı zayıflatabilir ve ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle, titreşimlerin malzeme davranışı üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Sayısal analiz yöntemleri, bu tür karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde etkili bir araç sunar. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi (FEM), malzemelerin yorulma davranışını ve titreşimlere verdiği tepkileri analiz etmede yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Eldoğan ve Cigeroglu ankastre bir kirişin 10 ila 500 Hz frekans aralığında beyaz gürültü olarak adlandırılan rastgele titreşimlere maruz kalması durumunda yorulma ömrünün farklı analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmişlerdir (Eldoğan & Cigeroglu, 2014). Mrsnik ve ekip arkadaşları frekans tabanlı titreşim kaynaklı yorulma analizi metodolojilerini kullanarak elde edilen sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, Tovo-Benasciutti metodunun, deneysel sonuçlarla en uyumlu tahminleri sağladığı tespit edilmiştir (Mrsnik ve ark., 2013). Capponi ve arkadaşları tanımlı güç olan durağan olmayan ve rastgele titreşimler altında malzemelerin yorulma ömrünü incelemiştir. Bu çalışmada, rastgele titreşimlerin frekans tabanlı yorulma analizi metodlarında nasıl tanımlanacağı büyük önem taşımaktadır (Capponi ve ark. 2017). Aktaş insansız hava aracının kanadının yükler altındaki davranışı ve titreşim özellikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kanadın statik testinden elde edilen deneysel veriler ile analiz sonuçları çekme gerinimlerinin hakim olduğu kanat alt panellerinde nisbeten uygun çıkarken basma gerinimlerinin hakim olduğu üst panellerde test ve analiz gerinimleri arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir (Aktaş, 2012).

Bu çalışmada, küçük ölçekli bir rüzgâr türbinine ait NACA 4415 kanat profilinin karbon fiber kompozit malzemeden üretilmesi durumunda, yorulma davranışı üzerindeki titreşim etkileri incelenmiştir. Çalışmanın amacı, titreşimli ve titreşimsiz koşullarda malzeme performansını karşılaştırarak karbon fiber kompozitlerin yorulma ömrü üzerindeki temel mekanizmaları ortaya koymaktır. Bu bağlamda:

- Karbon fiberin farklı hızlarda ve titreşim koşullarındaki deformasyon özellikleri incelenmiş,
- Doğal frekanslar ve titreşim modları analiz edilerek malzeme davranışı detaylandırılmış,
- Elde edilen veriler, rüzgâr türbini kanatlarının tasarım süreçlerinde kullanılabilir bir bilgi tabanı oluşturmuştur.

Sonuçlar, titreşimlerin karbon fiber kompozit malzemelerin deformasyonunu artırdığını ve malzemenin yorulma ömrünü kısalttığını göstermiştir. Bu veriler, daha dayanıklı ve verimli türbin kanatlarının tasarımı için önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Ayrıca, rüzgâr türbini teknolojisinde kullanılan malzemelerin davranışını anlamaya yönelik gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır.

Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada, karbon fiber kompozit malzemeden üretilmiş küçük ölçekli bir rüzgâr türbinine ait NACA 4415 kanat profili üzerinde titreşim ve yorulma davranışları incelenmiştir. Bu bölümde, kullanılan malzeme özellikleri, analiz yöntemleri ve uygulama süreçleri detaylandırılmaktadır.

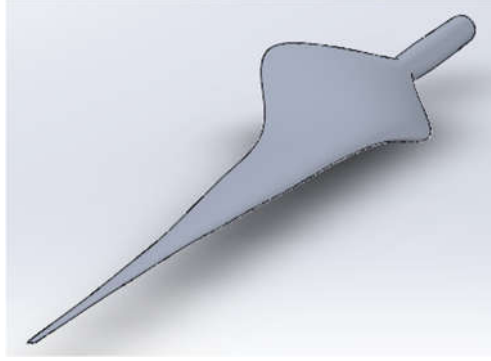
Kanat yapısında kullanılan karbon fiber kompozit malzeme, hafiflik, yüksek mukavemet ve uzun ömür özellikleri ile rüzgâr türbin kanatlarında tercih edilen bir malzemedir. Çalışmada ele alınan karbon fiber kompozit, malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla literatür verilerine dayalı olarak modellenmiştir. Farklı rüzgâr türbinlerine ait frekans özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tasarlanan kanat için

olan doğal frekans 6.09 Hz olarak elde edilmiştir ve bu değer tablodaki değerler ile karşılaştırıldığında küçük rüzgar türbinine ait olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Türbinlere ait Frekans Özellikleri			
Türbin Tipi	Rotor Hızı (RPM)	Temel Çalışma Frekansı (Hz)	Doğal Frekans (Hz)
Küçük Rüzgar Türbini	60-100	1-3 Hz	5-10 Hz
Orta Büyüklükte Rüzgar Türbini	30-60	0.5-1 Hz	2-5 Hz
Büyük Rüzgar Türbini	10-30	0.1-0.5 Hz	0.5-2 Hz

Kanat Tasarımı ve Sayısal Model

NACA 4415 profil geometrisi esas alınarak kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir. CAD tabanlı modelleme için SolidWorks yazılımı kullanılmış, aerodinamik analizlerde temel geometri ve profil detayları oluşturulmuştur. Modellenen kanadın 3D katı modeli Şekil 1’de gösterilmektedir.

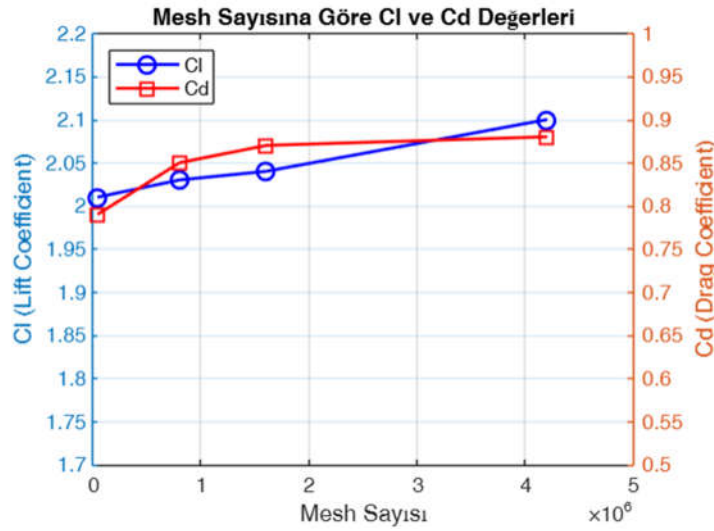


Şekil 1. NACA 4415 profiline sahip kanat modelinin katı modeli

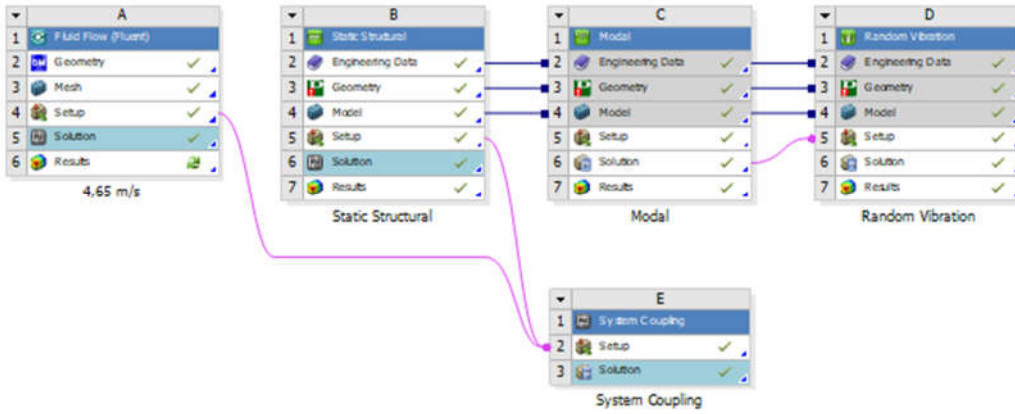
Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemi (FEM), ANSYS yazılımında uygulanmıştır. Kanat modeline ait titreşim ve yorulma analizleri üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir:

- Akış Analizi: Kanadın farklı hızlarda maruz kaldığı aerodinamik kuvvetler hesaplanmıştır.
- Statik Analiz: Kanat üzerindeki gerilme ve deformasyon değerleri, statik yükleme koşullarında değerlendirilmiştir.
- Modal Analiz: Kanadın doğal frekansları ve titreşim modları belirlenmiştir.

Malzeme için uygun analizler gerçekleştirilirken mesh (ağ yapısı) bağımsızlığı çalışması yapıp en uygun mesh yapısına karar vermek için farklı mesh sayılarında farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı mesh sayısına göre kanat aerodinamiği açısından önemli olan C_L ve C_D katsayılarının değişimi incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1600000 mesh yapısı analizlerimiz için en uygun mesh yapısı olarak seçilmiştir. Mesh işlemlerinden sonra Sayısal modellemede kullanılan yapılar Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 2. Farklı mesh sayıları için C_L ve C_D katsayılarının değişimi



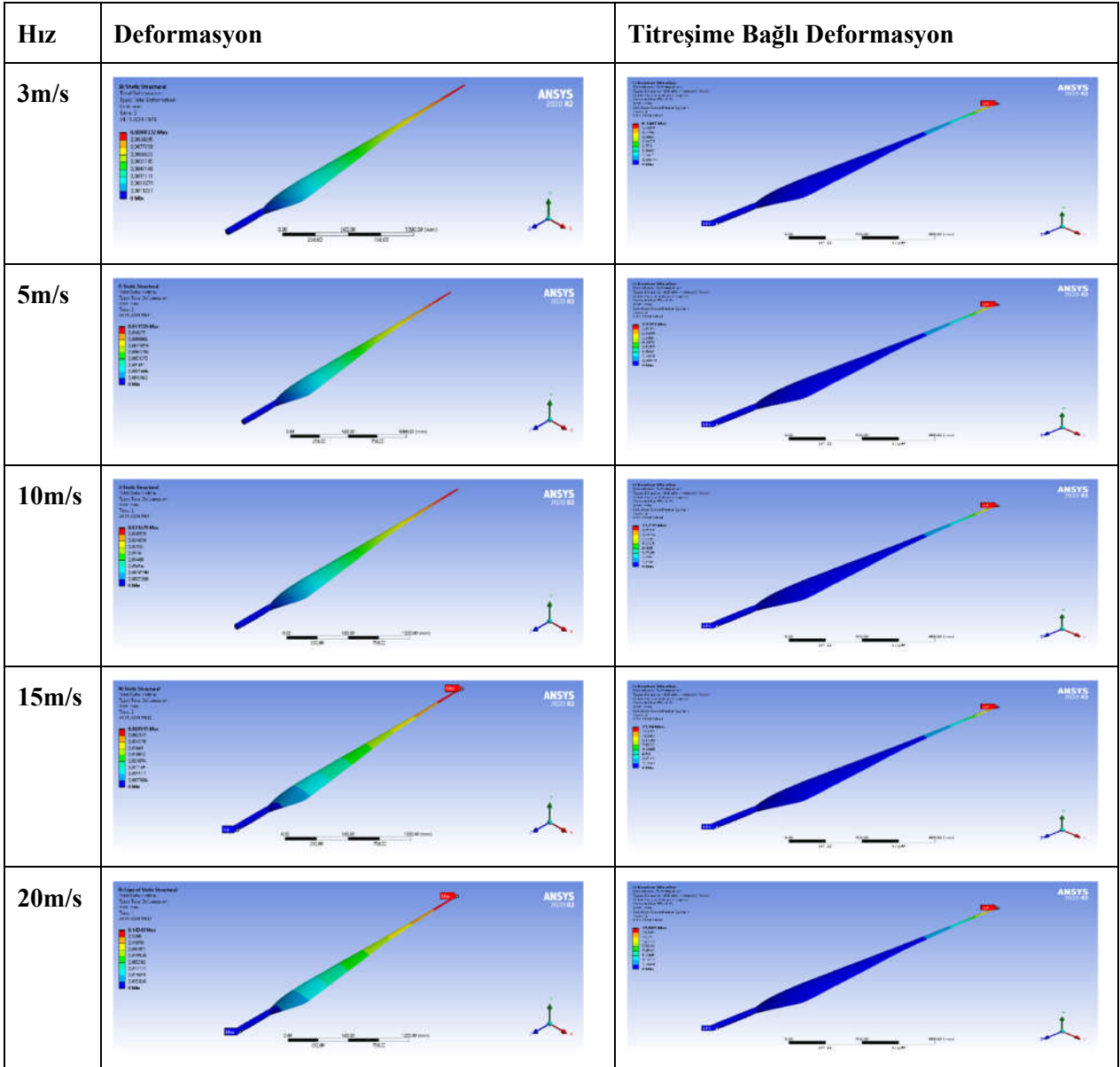
Şekil 3. Sayısal modellemede kullanılan yapılar

Kanatın titreşim altında yorulma ömrü, frekans tabanlı analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Bu amaçla şu metodolojiler kullanılmıştır:

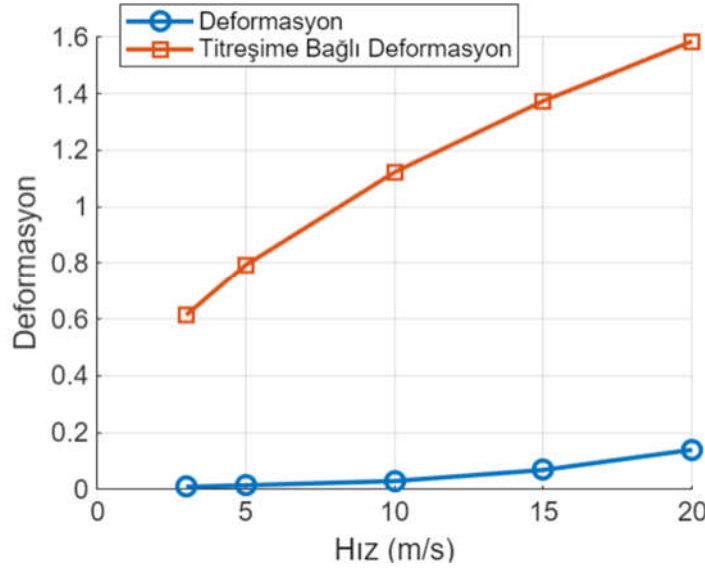
- Narrow-Band Yöntemi
- Wirsching
- Steinberg

Sayısal Sonuçlar

Tasarımı yapılan NACA4415 kanat yapısının deforme sonuçları ve titreşime bağlı deforme sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5’de verilmiştir. Malzemenin deforme miktarı rüzgar hızının artmasıyla her zaman artmıştır. Analizde elde edilen asıl sonuç titreşim ile deforme miktarının artmasıdır.



Şekil 4. Farklı rüzgar hızlarında kanattaki deformasyon ve titreşime bağlı deformasyonların değişimi



Şekil 5. Deformasyon ve titreşime bağlı deformasyonun rüzgar hızına göre değişimi

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, karbon fiber kompozit malzemeden üretilen rüzgar türbini kanatlarının farklı hız ve titreşim koşullarındaki yorulma davranışını anlamaya yönelik kapsamlı bir analiz sunmuştur. Sayısal analizler ve literatür tabanlı veriler ışığında elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

a) Titreşimlerin Malzeme Ömrüne Etkisi:

Modal analizler sonucunda, karbon fiber malzemenin doğal frekanslarının, titreşimli çalışma koşullarında daha yüksek deformasyona yol açtığı görülmüştür. Bu durum, titreşimlerin yorulma ömrünü kısaltan önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle yüksek hızlarda titreşimlerin etkisi daha belirgin hale gelmiştir.

b) Gerilme ve Deformasyon Karşılaştırmaları:

Statik ve titreşimli yükleme koşulları karşılaştırıldığında, titreşimli şartlarda malzemenin daha fazla deformasyona uğradığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, titreşimlerin sadece yorulma ömrü değil, aynı zamanda yapısal stabilite üzerinde de olumsuz bir etkisi olduğunu göstermektedir.

c) Farklı Mesh Yoğunluklarının Analizlere Etkisi:

Mesh yoğunluğunun artırılmasıyla elde edilen sonuçların daha kararlı hale geldiği görülmüştür. Daha yüksek mesh sayılarına sahip modellerde, lift (Cl) ve drag (Cd) katsayılarının hassas değerlerle hesaplandığı tespit edilmiştir. Bu da sayısal analizlerin doğruluğunu artırmak için uygun mesh ayarlarının önemini vurgulamaktadır.

d) Karbon Fiberin Avantajları:

Karbon fiber malzeme, hafifliği ve yüksek mukavemeti sayesinde rüzgar türbin kanatları için ideal bir seçenek olarak öne çıkmıştır. Bununla birlikte, titreşim koşullarında malzemenin performansının optimize edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu, üretim ve tasarım süreçlerinde dikkate alınması gereken bir husus olarak Aerodinamik ve Yapısal Performans: NACA 4415 profil geometrisinin, düşük hızlarda dahi yüksek aerodinamik verimlilik sunduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yapısal dayanım ve aerodinamik performansın bir arada optimize edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, sunulan bu çalışmada, karbon fiber malzemenin titreşim ve yorulma davranışlarını detaylı bir şekilde ele alarak, rüzgar türbini tasarımında önemli bir veri tabanı oluşturmuştur. Gelecekteki çalışmalarda, malzeme optimizasyonuna yönelik deneysel ve sayısal çalışmaların bir arada yürütülmesi önerilmektedir. Ayrıca, farklı çevresel koşulların (sıcaklık, nem, vb.) malzeme performansı üzerindeki etkileri de araştırılabilir.

6. Referanslar

Aktaş, A., 2012. Bir Taktik İnsansız Hava Aracı Kanadının Yapısal Davranışının Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Tez (Yüksek Lisans) -- İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Eldoğan Y., Çigeroğlu, E., 2014. Vibration Fatigue Analysis of a Cantilever Beam Using Different Fatigue Theories. IMAC XXXI: Conference & Exposition on Structural Dynamics (11 - 14 Şubat 2014), Garden Grove, CA; United States.

Mrsnik, M., Slavič, J., Boltezar, M., 2013. Estimating Vibration-Fatigue-Life on Experimentally Acquired Data. Key Engineering Materials, 569. 900-907.

Sadiku, M. N. (2018). Computational electromagnetics with MATLAB. CRC Press.

**BİR ÜNİVERSİTE KAMPÜSÜ İÇİN HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU VE MALİYET ANALİZİ****Kadir AYDIN¹, Hasan Hüseyin ÇOBAN²**¹Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 75002. Ardahan, Türkiye.ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9749-7310>²Bartın Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 74110. Bartın, Türkiye.ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5284-0568>**Özet**

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimal tasarımı, bileşenlerin (güneş panelleri, rüzgar türbinleri, bataryalar, dönüştürücüler ve jeneratörler) uygun şekilde planlanmasını gerektirir. Bu sistemlerin tasarımında, yenilenebilir enerji potansiyelinin maksimum faydası, minimum enerji maliyeti ve minimum emisyon gibi hedefler dikkate alınır. Literatürde çeşitli optimizasyon teknikleri ve simülasyon yazılımları bu amaçla kullanılmaktadır. HOMER, RETScreen ve diğer yazılımlar, hibrit sistemlerin tasarımında yaygın olarak kullanılır ve HOMERPro, kullanım kolaylığı ve kapsamlı veri bilgileri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde maliyet, hibrit sistemlerin tasarımında önemli bir faktördür. Çalışmalar, HOMERPro yazılımının hibrit sistemlerin optimizasyonunda etkili olduğunu göstermektedir. HOMERPro, Ardahan Üniversitesi'nin kampüs binalarına elektrik sağlayacak hibrit sistemlerin tasarımında da kullanılmıştır. Bu çalışma, Ardahan Üniversitesi'nin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için şebekeli ve şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımını içerir. Ardahan ili, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji potansiyeline sahiptir. Güneşlenme süreleri yaz aylarında en yüksek seviyeye ulaşırken, rüzgar enerjisi Çıldır ve Posof ilçelerinde dikkate değer seviyelerdedir. Kura Nehri, hidroelektrik enerji üretimi için potansiyel sunmaktadır. Üniversite kampüsündeki enerji tüketim profili analiz edilerek, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uyumlu hibrit sistemler tasarlanmıştır. HOMERPro programında yapılan simülasyonlar, bileşenlerin en uygun boyutlandırmasını belirleyerek maksimum verimlilik ve sürdürülebilirlik sağlamıştır. Bu çalışma, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin farklı coğrafi ve altyapı koşullarına uyarlanabilirliğini vurgulamakta ve temiz enerji dağıtımına yönelik küresel çabalara katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit enerji sistemleri, Yenilenebilir enerji, HOMERPro, Optimizasyon, Maliyet analizi**OPTIMIZATION AND COST ANALYSIS OF HYBRID ENERGY SYSTEM FOR A UNIVERSITY CAMPUS****Abstract**

In hybrid renewable energy systems, one of the critical issues is the optimal planning of components, such as solar panel arrays, wind turbines, batteries, converters, and generators, to minimize or maximize objective functions while meeting all constraints. The literature on hybrid renewable energy systems is dominated by studies focused on optimal design to determine the optimal system size, especially considering cost as a primary concern in developing countries. This study presents the design of grid-connected and off-grid hybrid renewable energy systems (HYES) for Ardahan University, located in northeastern Turkey. The study highlights the feasibility of using hybrid renewable energy sources and the adaptability and scalability of HYES solutions to different geographical and infrastructural conditions. Designs include various combinations of PV, wind turbines, diesel generators, and battery energy storage systems. Rigorous simulations in HOMERPro ensure optimal sizing of each component, maximizing efficiency and sustainability. Additionally, the study identifies research gaps in the context of Ardahan University regarding PV and wind energy with storage. For grid-connected and off-grid operations, different PV, wind turbine, battery, and hydroelectric combinations are evaluated in terms of levelized cost of energy (LCOE) and Net Present Value (NPV) using HOMERPro. The study's limitations include focusing on electric energy as the primary energy carrier, considering energy consumed within the central campus, and not detailing specific technologies at the system

level. This research aims to provide a guide for local energy needs through hybrid system integration, advancing global efforts towards clean energy distribution.

Keywords: Hybrid energy systems, Renewable energy, HOMERPro, Optimization, Cost analysis

Giriş

Düşük enerjili ve düşük karbonlu süreçlere ve teknolojilere geçiş, küresel net sıfır emisyon yaklaşımında sürdürülebilir kalkınma için hayati bir yol olarak giderek daha yaygın bir şekilde kabul edilmektedir. Fosil yakıtların yenilenebilir ve yeşil enerji kaynaklarıyla değiştirilmesi ve insan eylemlerinde yüksek verimlilik hedeflerinin izlenmesi, insanlığı daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru iten temel itici güçlerden bazılarıdır. Mevcut binalar, yüksek iç hava kalitesini korumaya adanmış HVAC sisteminin çalışması ve ayrıca diğer bina cihazlarının enerji tüketimi nedeniyle enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının daha büyük bir payını oluşturmaktadır (D. D'Agostino et al., 2024).

Araştırmacılar tarafından mevcut binaları bina yalıtımı (D'Agostino et al., 2024), çift cidarlı cepheler (P. D'Agostino & Minelli, 2021) ve faz değişim malzemeleri (Mokhberi et al., 2024) gibi yenilikçi teknolojilerle yenileyerek bina enerji ihtiyaçlarını azaltmak için birçok girişimde bulunulmasına rağmen, yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin kullanımı küresel bina enerji talebini önemli ölçüde telafi etmek için harika bir fırsat sunmaktadır.

Bu bağlamda, hibrit yenilenebilir enerji sistemleri yenilenebilir enerji üretimine yüksek güvenilirlik ve esneklik sağlamak için nihai bir çözümdür. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde önemli konulardan biri, hedef fonksiyonların en aza indirilmesi veya maksimumlaştırılması ve tüm kısıtlamaların karşılanması için, örneğin güneş panelleri dizileri, rüzgâr türbinlerinin sayısı, bataryalar, dönüştürücülerin ve jeneratörlerin kapasitesi gibi bileşenin optimal planlanmasıdır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri literatürüne, optimum sistem boyutunu belirlemek amacıyla optimal tasarım çalışmaları hakimdir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde sistem kapasitesi söz konusu olduğunda maliyet birincil endişe kaynağıdır.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerin optimum tasarımı yapılırken bölgedeki yenilenebilir potansiyelden maksimum faydalanma, minimum enerji maliyeti, minimum emisyon gibi hedef veya kısıtları içerir. Literatürde enerji sistemlerinin tasarımları çeşitli optimizasyon teknikleri, araçlar ve bilgisayar simülasyon yazılımları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu amaçla literatürde birçok optimizasyon ve yazılım yaklaşımı (Connolly et al., 2010; D'Agostino et al., 2022; Sinha & Chandel, 2014) önerilmektedir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimal planlama ve operasyon tekniklerini farklı bakış açılarından inceleyen çalışmalar vardır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri bileşenin farklı optimizasyon yöntemleri ve modellenmesi (Anoune et al., 2018; Bhandari et al., 2015; Siddaiah & Saini, 2016)'da gözden geçirilmiştir. Bağımsız sistemleri simüle etmek ve optimize etmek için literatürde bildirilen tasarım ve kontrol teknikleri (Harish & Kumar, 2016; Olatomiwa et al., 2016)'de anlatılmıştır. Literatürde hibrit yenilenebilir enerji sistemleri üzerine çok sayıda kapsamlı araştırma makalesi bulunmaktadır, bazı çalışmalar incelenmiş ve aşağıda özetlenmiştir.

Çalışma (Kim & Kim, 2023)'de, Güney Kore'deki bir veri merkezinin elektrik talebini yeşil ve güvenilir bir şekilde sağlamak için, Elektrikli Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Hibrit Optimizasyon Modeli (HOMER) kullanılarak rüzgâr türbini, PV ve batarya depolama sistemini içeren şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem bileşenleri ve şebekenin kararlı durum ve geçici tepkileri DiGSILENT programında analiz edildi.

Çalışma (Randhawa, F. J. S. et al., 2019)'deki yazarlar, HOMERPro'yu kullanarak Pakistan'daki Riphah Üniversitesi Faisalabad Kampüsü için PV, rüzgâr türbini ve dizel jeneratör ile şebekeden bağımsız bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarladılar.

Çalışma (Kassem et al., 2023)'de, Kuzey Kıbrıs'ta 37 lokasyonda çeşitli güneş takip sistemlerine sahip çeşitli ölçekli şebekeden bağımsız PV sistemleri, matematiksel modelleme yöntemleri ve RETScreen yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Benzer şekilde, (Minelli et al., 2023) Akdeniz iklimindeki büyük kentsel alanlar için uygun şebekeye bağlı bir izleme PV sisteminin tasarımını ve optimizasyonunu da sağlamıştır.

Çalışma (Agajie et al., 2023)'deki yazarlar, Etiyopya'da Debre Markos Üniversitesi, enerji talebini karşılamak için PV ve biyogaz jeneratörü ve süper iletken manyetik enerji depolamalı veya batarya depolama sistemi olarak pompalı hidro enerji depolamalı şebekeye bağlı bir HYES tasarladılar. Bu tasarımda, güç ve frekans salınımlarını ve çeşitli değişkenleri en aza indirmek için karşıtlık tabanlı balina optimizasyon algoritmasına

sahip orantı-AI-integr AI-derivatif (PID) kontrolörler ve bulanık kontrolörler için kesirli dereceli (fractional order) bir hesap önerildi. Önerilen algoritmanın performansını karşılaştırmak için metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

Khan ve Iqbal (Khan & Iqbal, 2005) çalışmalarında Wewfoundland-Kanada'da hibrit sistemin kurulumunun analizini HOMERPro kullanarak yapmışlar ve sistem rüzgâr, güneş, batarya ve yakıt hücresi kullanılarak tasarlanmıştır. Sistem tasarımı yapılırken yenilenebilir kaynakların enerji üretiminin depolanmasının yanısıra performans ve maliyet analizleri de yapılmıştır. Enerji depolama maliyetleri hâlen fosil bazlı sistemlere karşı ekonomik anlamda yüksektir.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri ekipmanlarının optimum boyutlandırılmasına yönelik en güçlü araçlardan biri, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen Elektrikli Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Hibrit Optimizasyon Modeli (HOMER) yazılımıdır (Bahramara et al., 2016; Srivastava et al., 2016). Her ne kadar HOMER, RETScreen, pvSYST, TRNsys, EnergyPro, EnergyPLAN yazılımları birçok çalışmada kullanılsa da literatürdeki çalışmalarda (Coban, 2023; Olaya, 2020) HOMERPro'nun kullanımı daha kolay, veri bilgileri daha kapsamlı olduğu görüldüğünden bu çalışmada HOMERPro programı kullanılması tercih edilmiştir. Bu çalışma, HOMER'i kendi bölgelerinde Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri planlamasında kullanmayı düşünen araştırmacılara da faydalı olacaktır.

Yapılan çalışmalarda hibrit sistemlerin optimizasyonu için HOMER'in tercih edilen bir seçim olduğunu görebiliriz. Ayrıca, literatür taraması, bataryaların bağımsız şebeke dışı uygulamalar için kapsamlı bir şekilde değerlendirildiğini ancak pompalı hidro depolama ile çok fazla modelleme yapılmadığını göstermektedir. Bataryalarla karşılaştırıldığında daha düşük yaşam döngüsü maliyeti gibi pompalı hidro depolamanın bazı belirgin avantajları vardır (Guruprasad et al., 2023).

Bu çalışmada, Türkiye'nin kuzeydoğusunda stratejik bir konuma sahip olan Ardahan Üniversitesinin kampüs içi binalarına elektrik sağlayacak şebekeli ve şebekeden bağımsız HYES'in tasarımları sunulmaktadır. Bu çalışma, yalnızca karma yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının uygulanabilirliğini vurgulamakla kalmamakta, aynı zamanda HYES çözümlerinin farklı coğrafi ve altyapı koşullarına uyarlanabilirliğini ve ölçeklenebilirliğini de ortaya koymaktadır. Tasarımlar, her biri PV, rüzgâr türbini, dizel jeneratör ve batarya enerji depolama sisteminin farklı kombinasyonlarını içeren şebekeden bağımsız ve şebekeye bağımlı olan sistemi içermektedir. HOMERPro programında yürütülen titiz simülasyonlar sayesinde her bir bileşen için en uygun boyutlandırmayı belirleyerek maksimum verimlilik ve sürdürülebilirliği sağlanmıştır. Ayrıca bu çalışma, hibrit sistemin şebekeye entegrasyonu yoluyla yerel enerji taleplerinin karşılanması için önemli bir rehber görevi görmektedir ve böylece temiz enerji dağıtımına yönelik küresel çabayı ilerletmektedir.

Ayrıca literatürde Ardahan Üniversitesi bağlamında PV, rüzgâr enerjisi ile depolamaya ilişkin bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Bu nedenle araştırma boşluklarının belirlenmesi amacıyla bu çalışma için Ardahan'da şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız uygulamalar için hibrit yenilenebilir sistemlerinin bir analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız operasyonlar için tekno-ekonomik fizibilite açısından farklı seçeneklerin karşılaştırılması amacıyla farklı PV, rüzgâr türbini, batarya ve hidroelektrik kombinasyonlarının seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) ve Net Bugünkü Değer (NBD) HOMERPro kullanılarak belirlenecektir.

Bu çalışmanın sonuçları birçok faktörden etkilenebilmektedir ve bu nedenle projenin kapsamı şu gösterimlerle sınırlıdır:

- Projede öncelikli olarak araştırılan enerji taşıyıcısı elektrik enerjisi olup, üniversitenin gaz enerjisi ve ısı enerjisi gibi diğer enerji taşıyıcılarını kullanması dikkate alınmaz.
- Bu çalışma, Ardahan Üniversitesi merkez kampüsü içinde tüketilen enerji dikkate alınmıştır. İlçelerde bulunan Meslek Yüksek Okulları tarafından tüketilen enerji dikkate alınmaz.
- Kendi kendine yeterliliğin hesaplanmasında 1 yıllık süre kullanılır. Bu, Ardahan Üniversitesinin bir yıl içinde kullandığı enerji miktarının aynı yıl içinde kendileri tarafından üretilmesi gerektiği anlamına gelir.
- Kendi kendine yeterlilik, her bir fakültenin/binanın kullandığı enerjiyi kesin olarak üretmesi gerektiği anlamına gelmez. Kendi kendine yeterlilik, yalnızca Ardahan Üniversitesi kampüsü içindeki toplam enerji üretiminin ve tüketiminin bir yıllık süre boyunca aynı olması anlamına gelir.

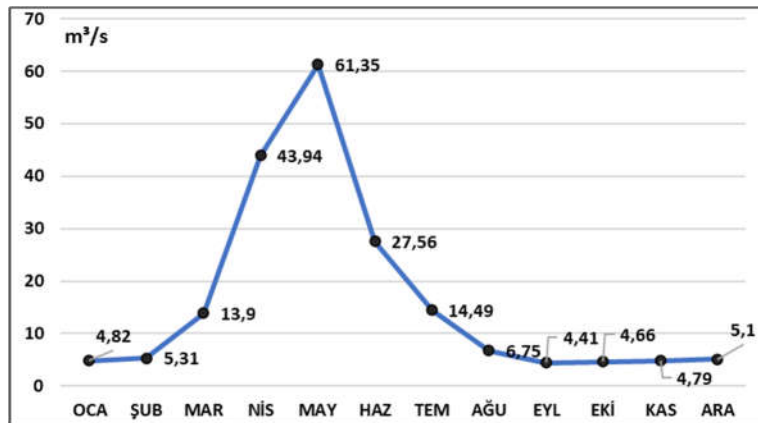
- Ardahan Üniversitesindeki sistem ayrıntı düzeyinde değil, yalnızca sistem düzeyinde açıklanacaktır. Bu, sistemin fonksiyonlarının simülasyonlarının geliştirilip test edileceği ancak detaylı seviye teknolojisinin dahil edilmeyeceği anlamına gelmektedir. Örneğin bu çalışmada invertörlerin, güneş panellerinin, rüzgâr türbinlerinin çalışması simüle edilecek ancak sisteme kurulacak ekipmanın tipi belirlenmeyecektir.
- Hibrit yenilenebilir sistem modelleri ve fonksiyonları değerlendirilecek ancak model geliştirilmeyecektir. Bunun yerine, modellerin işlevselliği, modellerin sahip olabileceği benzer kısıtlamalara sahip güç profilleri ile temsil edilecektir. Dolayısıyla bu çalışmadaki modellerin işlevi, yalnızca hazır tahminler üreten ve daha sonra simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilir.
- Yenilenebilir enerji karbon sertifikalarından elde edilen gelirler dikkate alınmaz.
- Burada incelenen sistem bilimsel çalışmalara dayandırılmış olmasına rağmen gerçek bir sistemde istenilen sistem fonksiyonunun sağlanıp sağlanamayacağı detaylı olarak değerlendirilememektedir.

Ardahan İli'nin Enerji Potansiyeli

Ardahan, Türkiye'nin kuzeydoğusunda bulunan bir ilimizdir. Enerji potansiyeli genellikle doğal kaynaklar, güneş, rüzgâr, hidroelektrik gibi faktörlere bağlı olarak değerlendirilir. İlin ortalama aylık toplam (global) ışınım değeri en yüksek temmuz ayında (6.65 kWh/m²/gün), en düşük değeri ise aralık ayındadır (1.23 kWh/m²/gün). İlin ortalama güneşlenme sürelerine bakıldığında en yüksek ve en düşük güneşlenme süreleri sırasıyla 8.94 h (saat) ile ağustos ve 3.42 h ile aralık aylarında gerçekleşmiştir. Rüzgâr enerji potansiyeli bakımından Ardahan ilinin Çıldır ve Posof ilçelerinde dikkate değer bazı bölgeler bulunmaktadır. Özellikle Çıldır gölü çevresinde 7 m/s kadar rüzgâr hızının olduğu tespit edilmiştir. İlin su kaynakları ve potansiyeli yüzeysel sular ve yeraltı suları olmak üzere iki kısımda değerlendirilebilir. Yüzeysel su kaynakları olarak; Kür Çayı, Kayınlık Deresi, Türkmen Deresi, Hanak Çayı ve ülke dışına kadar uzanan sırasıyla 31.7 m³/s ve 6.97 m³/s debiye sahip Kura Nehri ve Posof Çayı'dır. Kura Nehri ve Posof Çayı hem sulama hem de enerji ihtiyacı alanında fayda sağlamaktadır. Yeraltı su kaynakları olarak; Binbaşak Fayının Kura Vadisi ile kesiştiği bölgelerde ve Susuz ilçesinin yaklaşık 10 km batısında kaplıca olma potansiyeline sahip jeotermal enerji kaynağı bulunmaktadır. Merkez ilçe sınırlarında Ur Köyü Maden Suyu, Çıldır ilçesi sınırlarında Öncül Köyü ve Deveboynu kaplıcaları, Göle ilçesi sınırlarında ise Göle Kaplıcası, Koruvenk Kaplıcası ve Göle Maden Suyu yer almaktadır. Ardahan ilinin toplam su potansiyelinin 1383.26 hm³ kadarı yer üstü ve 79.48 hm³ kadarı ise yer altı su potansiyeli olarak belirlenmiştir (Kaltakkıran & Bakırcı, 2023)

Kura Nehri ve Enerji Potansiyeli

Kura Nehri, Ardahan ilinin güneybatısından geçen önemli bir akarsudur. Türkiye'nin Ardahan ilinden geçen Kura Nehri, aynı zamanda Gürcistan ve Azerbaycan gibi ülkelerden de geçmektedir. Kura Nehri, özellikle hidroelektrik potansiyeli ile dikkat çeker. Nehrin suları, hidroelektrik santralleri için enerji üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Kura Nehri'nin suyu tarım sulamasında da kullanılmaktadır ve bölgenin su kaynakları açısından önemli bir rol oynamaktadır. Kura nehri aylık ortalama debi verileri Ardahan DSİ il müdürlüğünden alınmış ve Şekil 1'de gösterilmiştir.

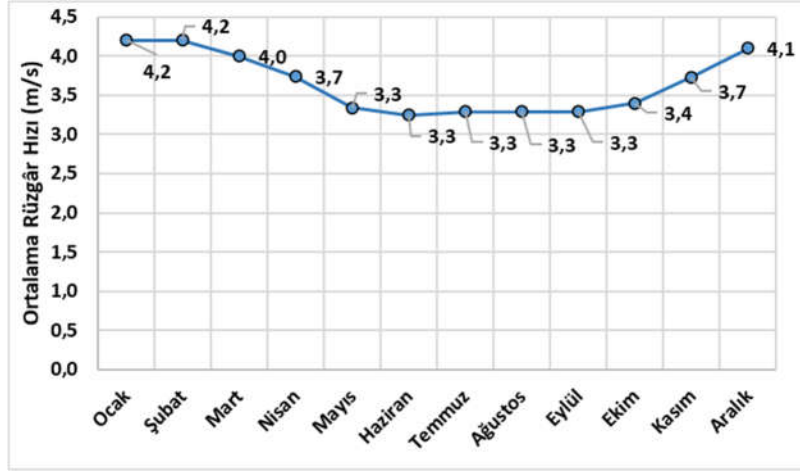


Şekil 1. Kura Nehri'nin 2016-2020 yılları arasında aylık ortalama debi grafiği

Şekil 1'deki grafiğe göre mart-temmuz ayları arasında debi artışı kar erimelerine ve yağmurlara bağlı olarak ciddi oranda artış göstermiştir.

Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli

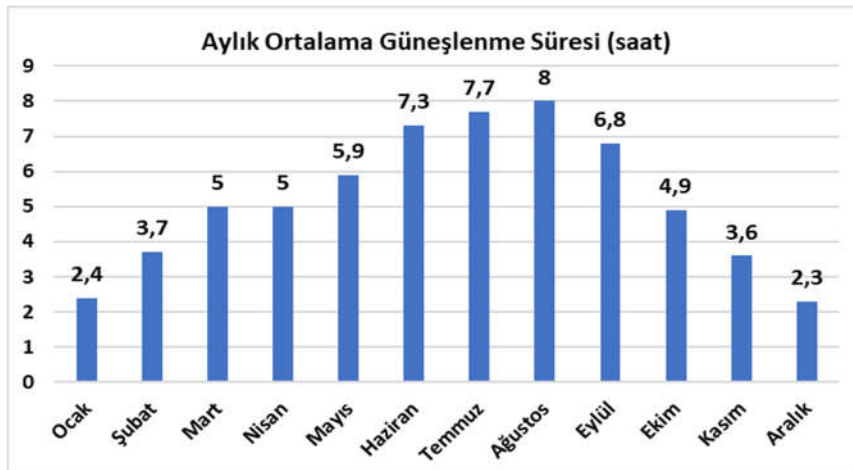
Ardahan, rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından da dikkate değer bir bölgedir. Rüzgâr enerjisi, özellikle düzlüklerde ve yüksek arazilerde etkili olmaktadır. Ardahan şehri için NASA'dan elde edilen aylık ortalama rüzgâr hızı verileri Şekil 2'de gösterilmektedir. Ölçülen maksimum rüzgâr hızının ocak-şubat döneminde olduğu ve yıllık ortalama rüzgâr hızının 3,7 m/s'yi aştığı, en düşük rüzgâr hızının ise nisan ayında olduğu dikkat çekmektedir. Rüzgâr hızı verilerine dayanarak Ardahan'da rüzgâr enerjisinin yılın büyük bölümünde mevcut olduğu ve dizel yakıt kullanımını azaltarak enerji üretmek için kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Ardahan'ın coğrafi yapısı ve iklimi, rüzgâr enerjisi projeleri için uygun bir ortam sunabilir.



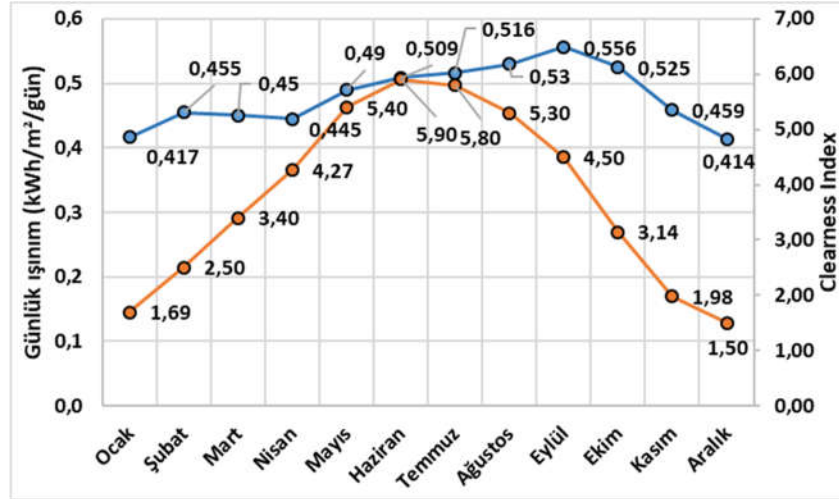
Şekil 2. Ortalama rüzgâr hızının aylık değişimi

Güneş Enerjisi Potansiyeli

Ardahan ili, Türkiye'nin kuzeydoğusunda bulunan bir il olduğu için güney illerine göre güneş enerjisi potansiyeli açısından genel olarak daha düşük bir değere sahiptir. Ancak, güneş enerjisi potansiyeli coğrafi koşullara, güneşlenme sürelerine ve iklim şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Güneş enerjisi, Ardahan gibi bölgelerde de kullanılabilir, ancak potansiyelini artırmak için teknolojik gelişmeler ve uygun altyapı yatırımları gerekebilir. Özellikle binaların çatıları, açık alanlar veya uygun araziler güneş panelleri için kullanılabilir. Ayrıca, tarımsal sulama sistemleri veya diğer enerji ihtiyaçları için güneş enerjisi kullanımı da değerlendirilebilir. Ardahan ili için güneşlenme süresi ve güneş ışınımı miktarı sırasıyla Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 2010-2021 yılları arasında Ardahan iline ait aylık olarak güneşlenme süresi

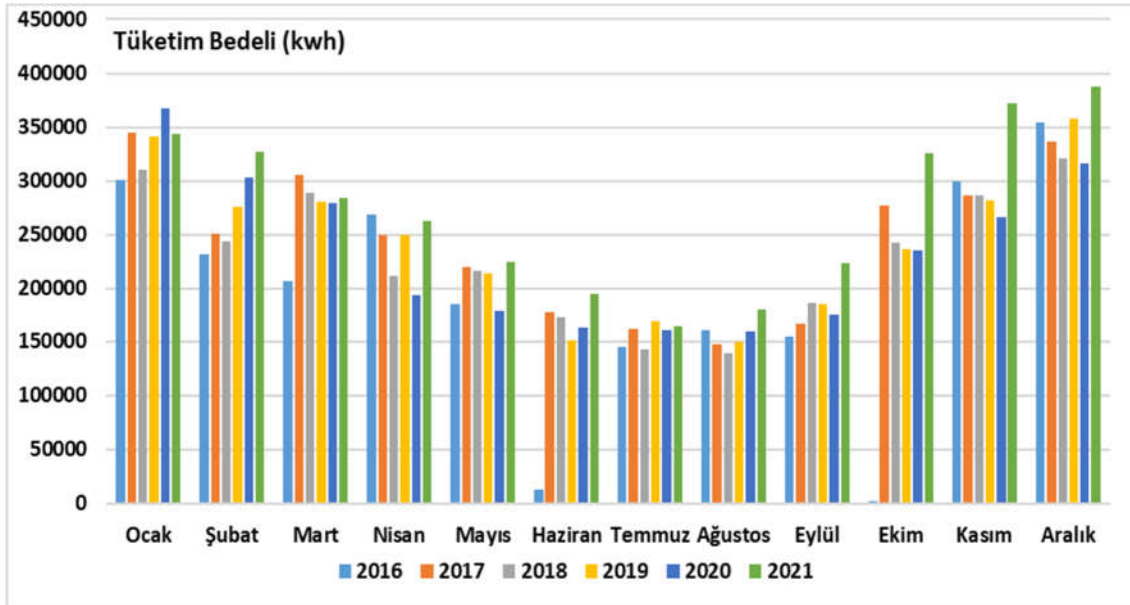


Şekil 4. Günlük clearness index ve ışınım grafiği

Şekil 4'te verilen Ardahan iline ait güneşlenme süresine bakıldığında kış mevsiminde güneşlenme süresi azalmaktadır. Ardahan da kar örtüsünün uzun süre kalması ise yere düşen güneş ışınlarının kardan yansmasıyla güneş enerjisi üretimi oranında artış olmaktadır.

Yük Profili Değerlendirilmesi

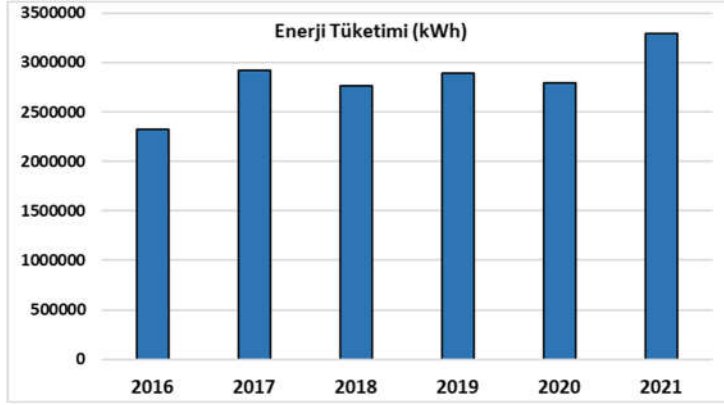
Bu çalışmada HYES modeli Ardahan Üniversitesi kampüs içi binaların elektrik talebini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. RES'ler ve diğer ekipmanlar yük değerine göre boyutlandırılır. Fakülte ve idari binaların 2016-2021 yılları arasında aylık yük eğrisi Aras Elektrik Dağıtım şirketinden elde edilmiş ve Şekil 5'de gösterilmektedir. Güç sisteminin günlük enerji talebi 7858 kWh, puant yük ise 1492,58 kW'tır. Elektrik hizmetleri endüstrisindeki elektrik tedarik stratejisi olarak, enerji tedarikinin talebi aşması gerekmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada elektrik üretiminin talebin üzerinde seviyelerde tutulması amaçlanmaktadır.



Şekil 5. Ardahan Üniversitesi kampüs binalarının 2016-2021 yılı aylık enerji tüketim grafiği

Ardahan Üniversitesi Yenisey Kampüsünde yıllara bağlı olarak enerji tüketim grafiklerine göre mart-eylül ayları arasında enerji tüketimi düşmekte, Ekim-Şubat ayları arasında ise tüketim yaklaşık olarak iki katını

geçmektedir. Bu artış ilgili aylarda eğitim-öğretimin aktif devam etmesi ve kış şartlarına bağlı olarak ısınma ihtiyacının artması ile grafikte net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6. Ardahan Üniversitesi Yenisey Kampüsü binalarının 2016-2021 yıllarında enerji tüketim grafiği

Şekil 6'daki grafikte görüldüğü üzere 2016-2020 yılları arasında enerji tüketim grafiği sürekli dalgalanmıştır, 2020'deki enerji tüketiminin düşüş nedeni COVID-19 salgını nedeni ile uzaktan eğitim yapılmış olmasıdır. 2021 yılında ise daha önceki yıllarda mevcut ortalamasının üzerine çıkmıştır.

Homerpro Programında Modelleme Süreci

Seçilen enerji üretim tesislerinin güç çıkışı tahmin etmek amacıyla üretilen elektrik enerjisini hesaplamak ve görüntülemek için HOMERPro simülasyon ve optimizasyon programı kullanıldı. Oluşturulan her bir model için rüzgâr hızı, nehir debisi ve güneş ışınımı değişimi verileri programa girilmiştir. Her senaryo için sistem emisyonları, gerekli yatırım, geri ödeme süresi, net bugünkü maliyet ve mevcut değer, üç aşamaya ayrılan simülasyonla tahmin edildi:

- i. Girdi verilerinin belirlenmesi,
- ii. Her senaryonun simüle edilmesi,
- iii. Çıktıların analiz edilmesi.

Hidroelektrik Sistemi Modeli

Hidrolik gücü hesaplamak için yüksekliği (metre) ve debiyi (m^3/s) ölçmeniz gerekir.

$$P_{hid} = Q \cdot g \cdot h \cdot \eta_{hid}$$

burada;

P_{hid} – üretilen güç (watt),

Q – suyun deşarjı (kg/s) (bu aynı zamanda birim zaman başına kütedir),

g – yer çekimine bağlı ivme (m/s^2),

h – yükseklik (m),

η_{hid} – hidroelektrik sisteminin verimliliği (%).

Güneş Sistemi (PV) Modeli

Bu çalışmada HOMERPro veri tabanından Schneider ConextCoreXC 680kW with Generic PV modülü seçilmiştir. Seçilen PV modülü düz tip, %17,3 verimliliğe sahip, 680,08kW nominal kapasitesi olan çalışma

sıcaklığı 45°C olan piyasada kolay bulunan bir modüldür. Simülasyonda kullanılan alt sistemlere ilişkin teknik veriler ve sermaye maliyetleri Tablo 1'de açıklanmıştır. PV çıkış gücü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$P_{pv} = P_{pv}^r \cdot nr_{pv} \cdot f_{pv} \frac{g(t)}{g_n} [1 + \alpha_p (T_c(t) - T_{c_n})]$$

burada;

$P_{pv}(t)$ –PV sisteminin anlık çıkış gücünü (kW),

P_{pv}^r – her bir PV modülünün nominal gücünü (kW),

nr_{pv} – PV modüllerinin sayısını,

f_{pv} – PV değer kaybı faktörünü (%),

$g(t)$ – çalışma sıcaklığındaki (kW/m²) gerçek zamanlı ışınım,

g_n – standart test koşulundaki ışınım (1 kW/m²),

α_p – sıcaklık katsayısı (%/°C),

$T_c(t)$ – gerçek zamanlı hücre sıcaklığı (°C)

T_{c_n} – PV modülünün nominal çalışma (test koşulu) sıcaklığını (25°C) temsil etmektedir.

DC-AC Konvertör

Bu çalışmada iki tür dönüştürücü vardır: DC'den AC'ye dönüştüren invertörler ve AC'den DC'ye dönüştüren doğrultucular. İnvörtör güç değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$P_{inv} = \frac{P_l^{max}}{\eta_{inv}}$$

burada;

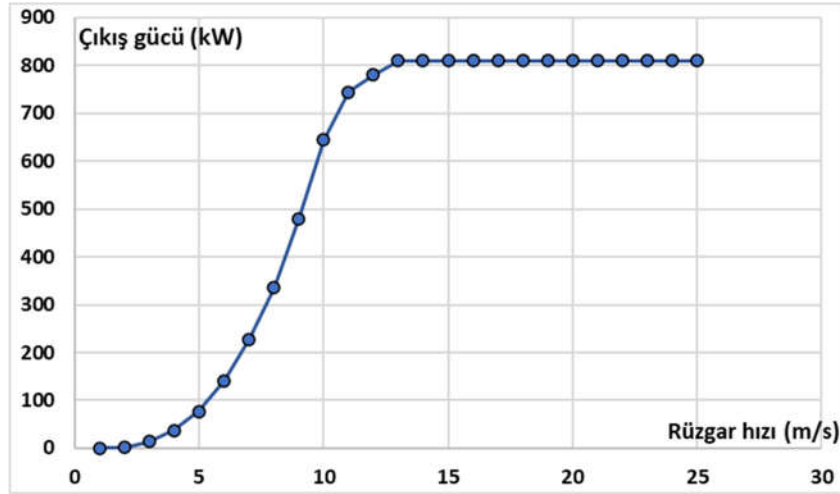
P_{inv} – invertörün derecelendirme gücünü,

P_l^{max} – pik yük talebini,

η_{inv} – invertörün verimliliğini temsil eder.

Rüzgâr Türbini Modeli

Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbini aracılığıyla mekanik güce dönüştürülür. Mekanik güç daha sonra bir elektrik jeneratörü aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemini modellemek için, çalışılan yer için ortalama rüzgâr hızını, dağılımını ve rüzgâr gücü dağılımını bilmek hayati önem taşımaktadır. Rüzgâr kaynakları verileri, Ardahan Meteoroloji Müdürlüğü'nden alınmıştır. Bu çalışmada Enercon E-53 [800kW] modeli seçilmiş ve seçilen türbinin spesifikasyonları Tablo 1'de özetlenmiştir. Şekil 2'de gösterilen veriler, Ardahan için yıllık ortalama rüzgâr hızının 3,7 m/s olduğunu göstermektedir. Seçilen türbinin rüzgâr hızı güç eğrisi Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Seçilen türbinin (Enercon E-53) rüzgâr hızı güç eğrisi

Rüzgâr türbininin güç çıktısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$P_{e.wt}(t) = \eta_{wt} A_{wt} P_{wt}(t) nr_{wt}$$

burada;

$P_{e.wt}(t)$ – rüzgâr türbininin etkin elektrik güç çıkışını (kW),

η_{wt} – rüzgâr türbininin verimliliği,

A_{wt} – rüzgâr türbininin süpürdüğü alanı,

nr_{wt} – sistemdeki rüzgâr türbininin sayısıdır.

Batarya ve Depolama Modeli

$$C_{bat} = nr_{bat} \frac{AD \cdot P_l}{\eta_{inv} \eta_{bat} DOD}$$

burada;

C_{bat} – pil kapasitesini (kWh),

nr_{bat} – pil sayısı,

AD – günlük pil özerkliği,

P_l – gerekli yük miktarı (kW),

DOD – deşarj derinliği (%),

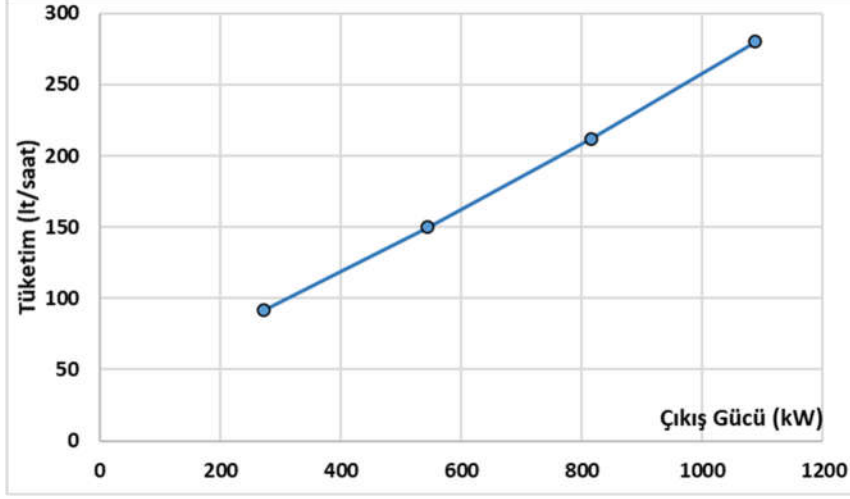
η_{inv} – invertör cihazının verimliliği (%),

η_{bat} – akü sisteminin verimliliği (%).

Dizel Jeneratör Modeli

Bu çalışmada 1360 kW kapasiteli CAT marka dizel jeneratör modellenmiş olup, maliyeti 100.000 ABD Doları (USD)'dir. Dizel jeneratörlerin fiyatı kapasite arttıkça ters orantılı olarak düşerken, daha büyük kapasiteli jeneratörlerin kW başına maliyeti düşmektedir. CAT marka jeneratörlerin çeşitli teknik raporları, üreticinin veri spesifikasyon sayfasından elde edilmiştir (CAT, 2024). Jeneratör çalışma ömrünün 60.000 saatlik olduğu tahmin edilmektedir. Jeneratörün büyük kapasiteli üretimi seçilmiş olmasına rağmen, bu çalışmanın temel

amacı dizel jeneratörlere olan bağımlılığı azaltmak için ticari, uygun maliyetli ve teknik açıdan uygun bir alternatif bulmaktır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasından dolayı ekonomik olarak dizel kullanımının yerini alabilecek pillerin optimize edilmiş kullanımı önerildi. HOMER Pro programı 1360 kW'lık bir jeneratörün %50 yükte, %75 yükte ve tam yükte sırasıyla saatte 150 L, 212 L, 280 L yakıt tükettiğini varsaymaktadır. Bu çalışmada motorinin fiyatı 1,5 \$/L olarak alınmıştır. HOMER tarafından sağlanan jeneratör için üretilen yakıt tüketimi eğrisi Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Dizel jeneratör yakıt tüketim grafiği

Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan farklı sistem bileşenlerinin detayları

	Dizel Jeneratör	Rüzgâr Türbini	Solar PV	İnvertör	Hidroelektrik	Batarya
Sermaye Maliyeti (\$)	100.000	500.000	800	300	1.000.000	700.000
Kapasite (kW)	1088	800	680	1	1000	1000
Değiştirme Maliyeti (\$)	70.000	300.000	500	300	800.000	700.000
İşletme ve Bakım maliyeti (kW/\$/yıl)	0,1	10.000	1	0	150.000	10.000
Model	CAT-1360kVA-50Hz	Enercon E-53	Generic PV	Schneider ConextCore XC 680kW	1MW Generic	Generic 1MWh Li-Ion
Ömür (yıl)	90.000 (saat)	20	25	15	30	15

Şebeke Modeli

Şebekeye bağlı sistemde şebekeye verilen (P_{seb}) veya şebekeden çekilen güç aşağıdaki denklem ile hesaplanır. Hesaplanan değer pozitif ise şebekeden enerji çekilir, negatif ise şebekeye enerji verilir.

$$P_{seb}(t) = P_l(t) - \sum (P_{pv}(t) + P_{hid}(t) + P_{wt}(t) + P_{dg}(t) + P_{bat}(t))$$

Ekonomik Hesaplamalar

Hibrit yenilenebilir sistemde ekonomik amaç fonksiyonunu oluşturmak için birim enerji maliyeti (COE), net bugünkü maliyet (NBD), işletme maliyeti (OC) ve başlangıç maliyeti (IC) hesaplanmalıdır. En önemli endeks olan COE, birim enerji üretim maliyetidir ve şu şekilde hesaplanır:

$$COE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{TYM(\$ / yıl)}{TYET(kWh / yıl)}$$

burada;

TYM – toplam yıllık maliyet,

TYET – yıllık toplam enerji tüketimini temsil edilmektedir.

Net bugünkü değer (NBD) şu şekilde hesaplanır:

$$NBD \left(\frac{\$}{yıl} \right) = \frac{TYM(\$ / yıl)}{CRF}$$

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

burada;

CRF – sermaye geri kazanım faktörü,

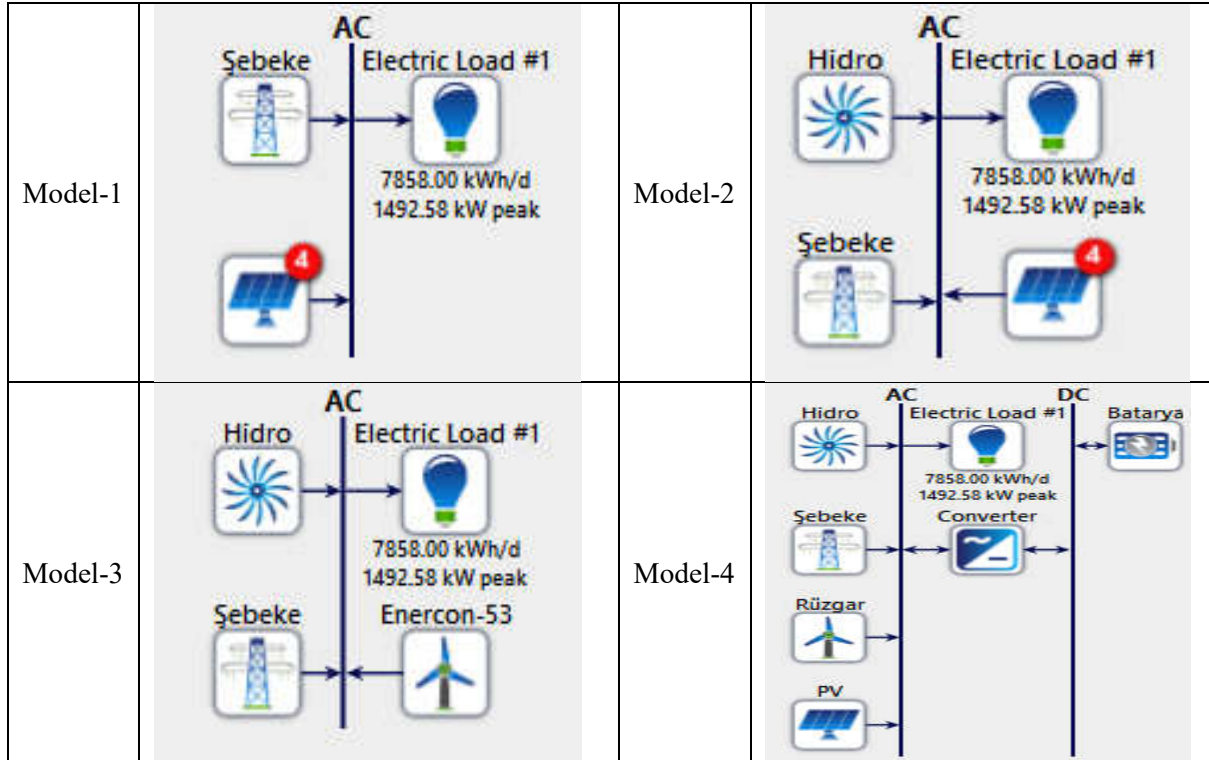
i – faiz oranı (%),

n – bileşenlerin ömrü (yıl).

Simülasyon Analizleri

Bileşenler, şebeke dışı ve şebeke içi güneş enerjisi sistemini tasarlamak için HOMER Pro yazılımından seçilir. Şekil 9, PV dizisi, dönüştürücü ve yedek sistem için şebekeden oluşan şebekeye bağlı veya şebeke içi sistemi gösterir. Şekil: 4, PV dizisi, dönüştürücü ve yedek sistem için pillerden oluşan şebeke dışı tasarlanmış sistemi gösterir.

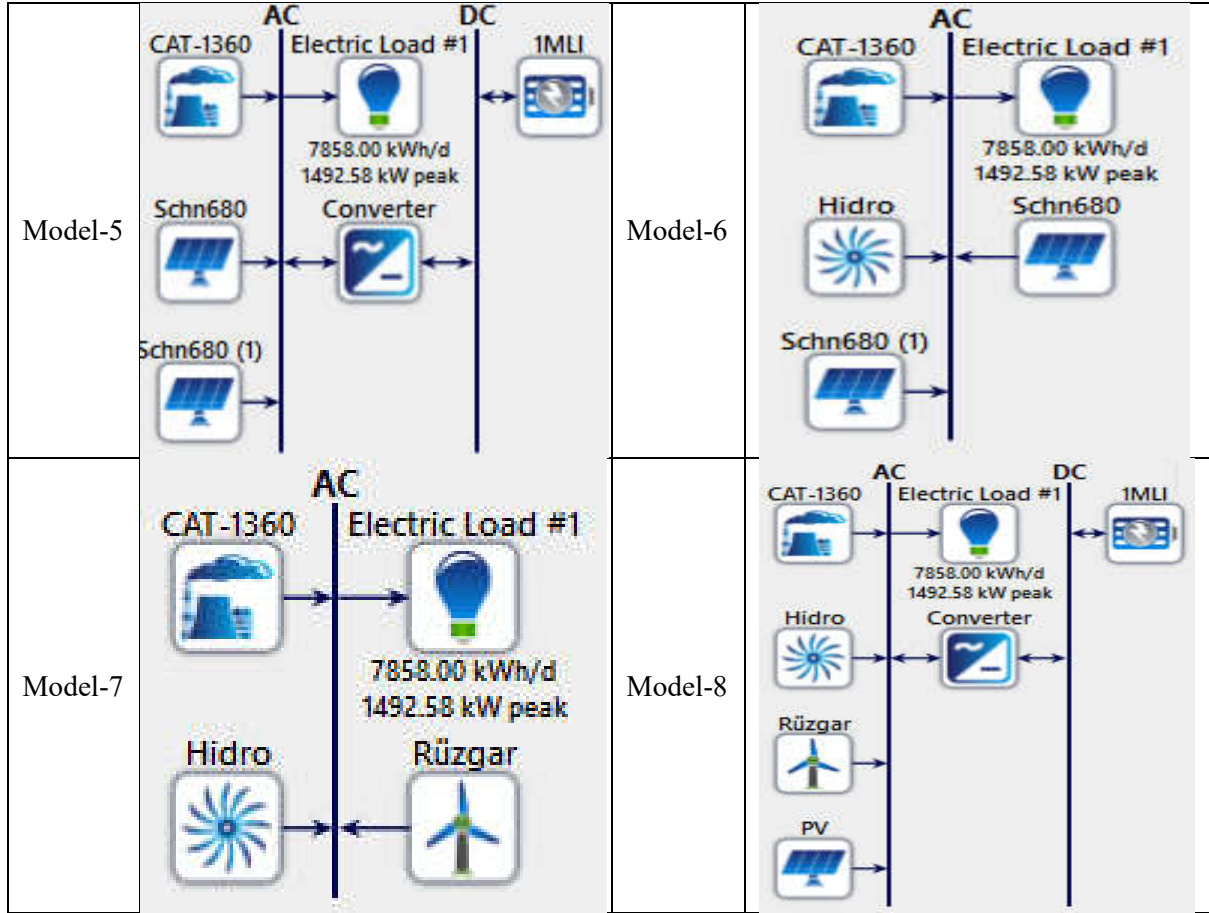
Şebekeye Bağlı Sistemler (On-Grid)



Şekil 9. Şebekeli 4 farklı sisteminin şematik diyagramı

Şebekeden Bağımsız Sistemler (Off-Grid)

HOMER Pro yazılımı kullanılarak simüle edilen çift yönlü konvertörlü sisteminin şematik diyagramı Şekil 10'da gösterilmektedir.



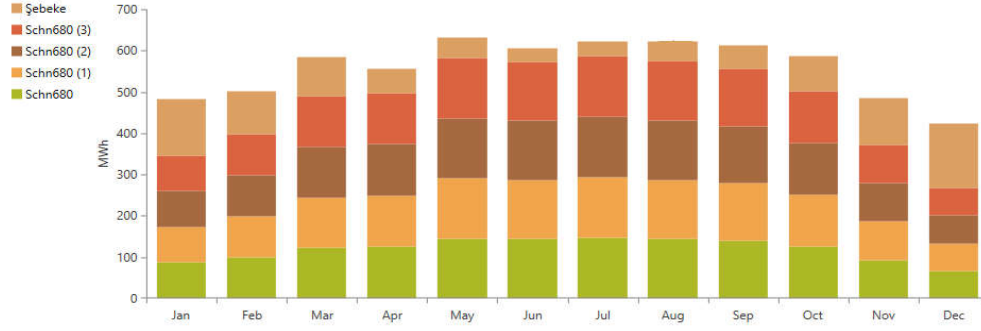
Şekil 10. Şebekesiz 4 farklı sisteminin şematik diyagramı

Ardahan üniversitesi kampüs binaları enerji ihtiyacını karşılamak için tesis konumuna (41°07'48"N 42°46'47"E, rakım: 1919 metre) ilişkin şebekeli ve şebekesiz modellerinin optimizasyon sonuçları Tablo 2'de ortaya koyulmuştur. Simülasyon süreci, en düşük CoE ve en yüksek Net Bugünkü Maliyete göre seçilen sistem konfigürasyonlarının ve kapasitelerinin bir listesini üretir ve hibrit enerji sistemlerinin proje süresi boyunca uygulanabilirliğini belirler. Simülasyon giriş verilerine dayalı olarak farklı konfigürasyonlar oluşturulmuş ve en kârlı durum sistemi altı çizili olarak gösterilmiştir. Bu araştırma hem şebekeli hem de ada konfigürasyon sistemine en uygun optimum sistem tasarımını seçmektedir.

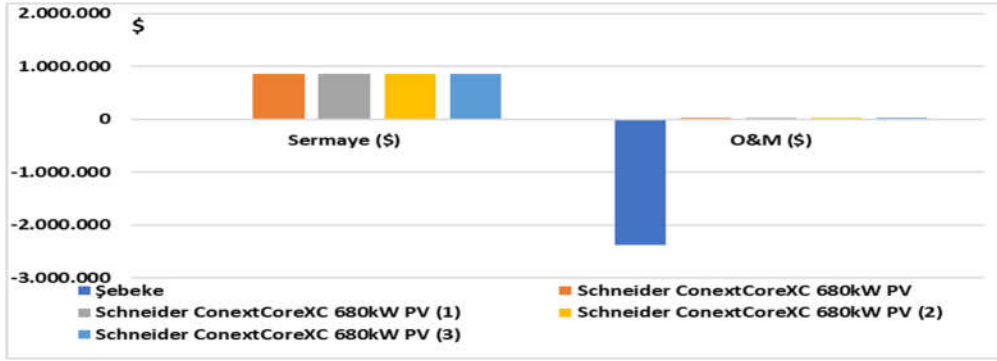
Tablo 2. Önerilen sistemin ekonomik optimizasyon sonuçları

Model No	IRR (%)	Net Bugünkü Maliyet (\$)	Seviyelendirilmiş COE (\$/kWh)	Geri Ödeme Süresi (Yıl)
Model-1	<u>2,4</u>	<u>2.900.000</u>	<u>0,0287</u>	<u>19</u>
Model-2	1,3	560.305	0,00468	22
Model-3	0,029	3.300.000	0,0133	25
Model-4	1,6	2.900.000	0,0287	18
Model-5	11	21.300.000	0,232	7,7
Model-6	<u>61</u>	<u>47.400.000</u>	<u>0,516</u>	<u>1,6</u>
Model-7	16	31.400.000	0,342	6,1
Model-8	21	31.600.000	0,344	4,6

Model-1 için PV panellerinin ürettiği aylık elektrik enerjisi ve sistem maliyeti sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir. Şekilden, PV enerji üretiminin daha yüksek netlik endeksi (clearness index) nedeniyle Mayıs- Ağustos aylarında yüksek, daha düşük netlik endeksi nedeniyle kış aylarında düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Bir yıllık dönem için aylık ortalama elektrik üretimi (Model-1)



Şekil 12. Maliyet özeti (Model-1)

Şebekeden satın alınan ve geri satılan enerji miktarı verilerine dayanarak Tablo 3’te aylık alım/satım verileri özetlenmiştir.

Tablo 3. Şebekeden alınan/satılan enerji (Model-1)

Aylar	Satın Alınan Enerji (kWh)	Satılan Enerji (kWh)	Satın Alınan Net Enerji (kWh)	Puant Yük (kW)	Enerji Fiyatı (\$)
Ocak	135.661	185.557	-49.896	1.206	131,07
Şubat	104.799	244.891	-140.093	1.193	-2.945,20
Mart	96.508	301.338	-20.483	926	-4.986,81
Nisan	58.671	331.648	-272.977	952	-7.485,27
Mayıs	48.605	408.639	-360.034	717	-10.217,75
Haziran	33.742	413.141	-379.399	373	-10.977,08
Temmuz	36.126	437.399	-401.273	685	-11.604,69
Ağustos	47.745	405.981	-358.235	565	-10.174,11
Eylül	55.451	403.946	-348.495	861	-9.789,45
Ekim	83.702	339.284	-255.581	869	-6.663,01
Kasım	114.169	225.118	-110.949	894	-1.958,43
Aralık	156.979	147.103	9.876	115	2.180,04
Yıllık Toplam	972.158	3.844.045	-2.871.886	1.206	-74.490,69

Yukarıda; HOMERPro tarafından elde edilen optimizasyon sonuçları, söz konusu mikro şebeke için en uygun sistem tasarımını ve ayrıca yakıt fiyatı ve diğer parametre değişimine ilişkin kapsamlı bir hassasiyet analizini ortaya koyarak sunuldu. HOMERPro; türevsiz optimizasyonu nedeniyle hesaplama etkinliği sergileyerek

yukarıda belirtilen 8 farklı simülasyonları gerçekleştirirken hesaplama sürelerinin önemli ölçüde azalmasına yol açar. Spesifik olarak; Intel® Core™ i5-10500T CPU 2.30GHz; 8GB RAM kullanıldığında, optimum sistem tasarımına yönelik simülasyon 35 saniye sürerken, hassasiyet analizi ise 16 saat sürmüştür.

Ardahan Üniversitesi kampüs binaları enerji ihtiyacını karşılamak için üretilen her senaryo için yatırım analizini değerlendirmek amacıyla çeşitli parametreler kullanılır. Yatırım planı analizi, sistemin geri ödeme süresini, net bugünkü maliyetini, bugünkü değerini ve emisyonlarını içerir. Yenilenebilir enerji kullanımında optimal yatırım stratejisi için geri ödeme süresi mümkün olduğu kadar kısa olmalıdır ve net bugünkü değer ne kadar büyük olursa; yatırım kararı da o kadar verimli olur. Simülasyon sürecinde, yenilenebilir enerji teknolojilerini kullanan güç sisteminin seçilen parametreleri strateji seçimini etkileyebilecek bir dizi faktöre dayalı olarak hesaplanır. Örneğin, motorun fiyatı ile rüzgâr türbininin sermaye maliyeti parametrelerinde $\pm 5\%$ 'lik ayarlamalar, sistemden kaynaklanan net mevcut maliyeti ve emisyonları etkileyebilir.

Her ne kadar HOMERPro'nun küçük ölçekli mikro şebeke ağları tasarlarlarken bazı avantajları olsa da programın daha karmaşık sistemler üzerinde derinlemesine bir araştırma yapma yeteneğinin olup olmadığını görmek için test edilmesi gerekmektedir. Sonraki çalışmalarda, diğer sınırlamaları (kararlılık analizi, kayıpların yakalanması ve reaktif güç üretimi vb.) ele almak için tam gelişmiş bir algoritma kullanan gelişmiş bir tasarım aracı önerilecektir.

Ardahan üniversitesi özelinde olduğu gibi ada modu hibrit tesis kurulması için atılması gereken birçok adım var ve yenilenebilir enerji konusunda küresel perspektife uygun hareket edilmesi gerekmektedir. Enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanmasına yönelik adımlar şu şekildedir:

- Elektrik ağı bağlantılarındaki teknik engellerin kaldırılması;
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının finansal rekabet gücünün artırılması;
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ulusal şebekeye entegre edilmesine yönelik yönetimle ilgili süreçlerin kolaylaştırılması.

Sonuç

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanan Ardahan Üniversitesi kampüs binaları enerji ihtiyacını karşılamak için HomerPro yazılımı kullanılarak hibrit yenilenebilir enerji sisteminin tekno-ekonomik fizibilitesi ortaya konmuştur. Bu modeller, ağırlıklı olarak net bugünkü maliyet, elektrik maliyeti, başlangıç proje maliyeti ve işletme maliyetlerine dayalı simülasyonlar ve optimizasyonlar yapılarak analiz edilmiştir.

Seçilen saha için tüm modeller incelenerek aşağıdaki sonuçlara varıldı:

- Şebekeye bağlı sistem için en uygun model Model-1'dir ve seviyelendirilmiş COE 0,0287 \$/kWh'dır. Model-1'in işletme ve bakım maliyeti 60.304 USD/yıl'dır. İkinci ve üçüncü en ekonomik modeller Model-4 ve Model-2 olup NPC sırasıyla 2,9 milyon USD ve 560.305 USD'dir.
- Şebekeye bağlı olmayan sistem için en uygun model Model-6'dır ve seviyelendirilmiş COE 0,516 \$/kWh'tir. Model-6'nın işletme maliyeti 1,13 milyon USD/yıldır. İkinci ve üçüncü en ekonomik modeller sırasıyla Model-8 ve Model-7 olup NPC sırasıyla 31,6 milyon USD ve 31,4 milyon USD'dir.

Üretilen fazla enerjinin boşa gitmemesi ve kayıpları en aza indirmek ve yenilenebilir hibrit sistemi daha uygulanabilir ve ekonomik hale getirmek için fazla miktardaki elektriği şebeke istasyonuna satmak üzere her model şebeke istasyonuyla senkronize edilmiştir.

Yukarıdaki sonuçlardan, planlanan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin, elektrik kullanımının artması nedeniyle yakın gelecekte hissedarların geleneksel kaynakları kullanmayı bırakıp yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmalarına yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada ortalama 7858kWh/gün yük ve 1492,58 kW pik yük seçilmiş olup, elde edilen sonuçlar uygulanabilir ve ekonomiktir. Yakın gelecekte, önerilen hibrit modelin, özellikle birbirine bağlantısı olmayan daha uzak bölgelere göre daha ekonomik yenilenebilir enerji üretmesi beklenmektedir. Yerel halkın yaşam standardı da yenilenebilir teknolojilerin kullanımıyla artabilir. Güç çıkışını belirlemek için daha ayrıntılı maliyet analizi, daha hassas simülasyon ve optimizasyonla desteklenebilir. Yakın gelecekte artan elektrik talebi aynı model için daha büyük kapasiteli bileşenler kullanılarak karşılanabilecektir. Ayrıca, güvenilir ve ekonomik bir hibrit sistem oluşturmak için diğer yenilenebilir kaynaklar mevcut araştırma kaynaklarıyla birlikte değerlendirilebilir.

Bilgilendirme

Bu çalışma Kadir Aydın'ın, Ardahan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde Dr. Hasan Hüseyin Çoban danışmanlığında hazırladığı “Ardahan Üniversitesi Kampüs Binaları İçin Optimum Hibrit Yenilenebilir Enerji Üretim Sistemlerinin Belirlenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler makul talep üzerine sorumlu yazar Kadir Aydın'dan temin edilebilir.

Acknowledgment

This article is produced by Kadir Aydın from his master's thesis titled "*Determination of The Optimum Hybrid Renewable Power Generating Systems for Campus Buildings of Ardahan University*" under the supervision of Dr. Hasan Hüseyin Çoban at Ardahan University, Department of Electrical and Electronics Engineering. The data that support the findings of this study are available from the corresponding author, Kadir Aydın, upon reasonable request.

References

- Agajie, T. F., Fopah-Lele, A., Ali, A., Amoussou, I., Khan, B., Elsis, M., Mahela, O. P., Álvarez, R. M., Tanyi, E. (2023). Optimal Sizing and Power System Control of Hybrid Solar PV-Biogas Generator with Energy Storage System Power Plant. *Sustainability*, 15(7), 5739. <https://doi.org/10.3390/su15075739>
- Anoune, K., Bouya, M., Astito, A., Abdellah, A. Ben. (2018). Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 652–673. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.032>
- Bahramara, S., Moghaddam, M. P., Haghifam, M. R. (2016). Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>
- Bhandari, B., Lee, K.-T., Lee, G.-Y., Cho, Y.-M., Ahn, S.-H. (2015). Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(1), 99–112. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0013-z>
- CAT. (2024). *CAT Diesel Generator Set. PRIME 1360 EkW.* https://emc.cat.com/pubdirect.ashx?media_string_id=LEHE0558-00.pdf
- Coban, H. H. (2023). Assessment of Hybrid Renewable Energy System in Beledweyne city Somalia, Technical and Economical Analysis. *Journal of Engineering Research*, 11(1A), 273–284. <https://doi.org/10.36909/jer.16481>
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059–1082. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>
- D'Agostino, D., De Falco, F., Minelli, F., & Minichiello, F. (2024). New robust multi-criteria decision-making framework for thermal insulation of buildings under conflicting stakeholder interests. *Applied Energy*, 376, 124262. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124262>
- D'Agostino, D., Mazzella, S., Minelli, F., & Minichiello, F. (2022). Obtaining the NZEB target by using photovoltaic systems on the roof for multi-storey buildings. *Energy and Buildings*, 267, 112147. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112147>
- D'Agostino, D., Minelli, F., Minichiello, F., & Musella, M. (2024). Improving the Indoor Air Quality of Office Buildings in the Post-Pandemic Era—Impact on Energy Consumption and Costs. *Energies*, 17(4), 855. <https://doi.org/10.3390/en17040855>
- D'Agostino, P., & Minelli, F. (2021). Robustness Assessment of a Low Poly Modeling Strategy for Performance Simulation of Double-Skin Green Facades. *ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics*, 615–625. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63403-2_55
- Guruprasad, P., Quaranta, E., Coronado-Hernández, O., & Ramos, H. (2023). Hydropower Advantages over

- Batteries in Energy Storage of Off-Grid Systems: A Case Study. *Energies*, 16(17), 6309. <https://doi.org/10.3390/en16176309>
- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>
- Kaltakkıran, G., & Bakırcı, K. (2023). Ardahan İlinde Enerji Uygulamaları için Meteoroloji ve İklim Verilerinin Analizi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(3), 2026–2041. <https://doi.org/10.21597/jist.1223780>
- Kassem, Y., Gokcekus, H., Hamad, O. A. M., & Fayid, F. M. B. (2023). Economic Viability of a 6.5kW Off-grid Solar PV with Various Sun-Tracking Systems in Northern Cyprus: A Case Study. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(2), 10608–10621. <https://doi.org/10.48084/etasr.5744>
- Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2005). Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. *Renewable Energy*, 30(6), 835–854. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.001>
- Kim, B., & Kim, I. (2023). A case study of stand-alone hybrid power systems for a data center using HOMER and DIgSILENT. *Energy Reports*, 9, 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.044>
- Minelli, F., D'Agostino, D., Migliozi, M., Minichiello, F., & D'Agostino, P. (2023). PhloVer: A Modular and Integrated Tracking Photovoltaic Shading Device for Sustainable Large Urban Spaces—Preliminary Study and Prototyping. *Energies*, 16(15), 5786. <https://doi.org/10.3390/en16155786>
- Mokhberi, P., Mokhberi, P., Izadi, M., Bagheri Nesaii, M., Yaici, W., & Minelli, F. (2024). Thermal regulation enhancement in multi-story office buildings: Integrating phase change materials into inter-floor void formers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104792. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104792>
- Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., & Moghavvemi, M. (2016). Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 821–835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040>
- Olaya, C. (2020). System Dynamics: Engineering Roots of Model Validation. In *System Dynamics* (pp. 109–117). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8790-0_544
- Randhawa, F. J. S., Sarwar, M. B., Shams, M. H., & Saeed, A. R. (2019). Economic analysis of distributed generation for hybrid renewable energy system. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 10(3), 714–722.
- Siddaiah, R., & Saini, R. P. (2016). A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376–396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>
- Sinha, S., & Chandel, S. S. (2014). Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>
- Srivastava, R., Giri, V. K., & Giri, V. K. (2016). Optimization of Hybrid Renewable Resources using HOMER. *International Journal of Renewable Energy Research*, v6i1. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i1.3275.g6770>

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLOW AROUND A CYLINDER**Mücella İLKENTAPAR**Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kayseri-Türkiye
(Responsible Author) ORCID: 0000-0001-8600-0105**Ahmet Alper ÖNER**Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kayseri-Türkiye
ORCID: 0000-0001-9473-1864**Abstract**

The flow around a cylinder is a complex and critical phenomenon in fluid mechanics, aerodynamics, and engineering design. Comprehending the flow dynamics around a cylinder is essential for forecasting structural integrity, vibrational characteristics, and load impacts in engineering applications, such as maritime structures, bridge piers, pipelines, and wind engineering. Examining the flow properties of a cylinder is crucial for optimizing designs to achieve enhanced efficiency, stability, and safety. To accomplish this, both computational and experimental methodologies are extensively employed to furnish a thorough comprehension of the flow dynamics. This study examined the flow around a circular cylinder through both numerical and experimental methods. The influence of the base was disregarded to focus on the principal flow characteristics, and the Reynolds number (Re) was established at 14,000, a regime characterized by vortex shedding and turbulent flow behaviour. The cylinder diameter utilized in the investigation was $D = 50$ mm, a standard measurement in experimental validation studies. The experimental analysis employed various measurement techniques. The smoke-wire technique was employed for flow visualization, elucidating vortex shedding and boundary layer separation. The aerodynamic forces exerted on the cylinder were quantified to assess lift and drag forces. Velocity data were obtained using a hot-wire anemometer, and pressure measurements were executed to ascertain the pressure distribution over the cylinder's surface. These experimental techniques yielded significant data for the validation of the numerical model. The study utilized the finite element approach for numerical analysis, employing ANSYS FLUENT software. The flow was simulated in a two-dimensional environment with the standard $k-\varepsilon$ (SKE) turbulence model, a well endorsed method for turbulent flow around cylindrical structures. The governing equations of fluid dynamics were solved numerically, and the outcomes were compared with the experimental data. A robust correlation was noted between the experimental and numerical findings, indicating the precision and dependability of the computational model.

Keywords: Circular cylinder, Numerical model, Flow Field, Drag Coefficient, Lift Coefficient**Introduction**

Circular cylindrical structural elements, owing to their simple geometry, are widely used in construction, aerospace, mechanical, coastal, and marine engineering applications involving fluid flows (Sumner 2010). The first half of the 20th century is when the first scientific works on the wake interference in the flow around cylinders were produced. There are a great number of experimental and computer studies that have been published in the scientific literature that investigate the flow around bluff bodies subjected to varying Reynolds numbers (Taneda 1965; Gerrard 1978; Zdravkovich 1983; Majumdar and Rodi 1989). The flow structure surrounding cylindrical elements is influenced markedly by flow velocity, flow depth, fluid viscosity, the geometry and size of the cylinder's cross-section, the cylinder's location within the flow field, and its proximity to solid boundaries (Lei et al. 2000; Cheng and Chew 2003; Fan and Long 2005). Prior experimental investigations in the literature regarding flow around cylinders have comprehensively examined flow parameters, including the Strouhal number and drag coefficient, which are contingent upon the Reynolds number (Sahin et al. 2021). Nevertheless, owing to the infrastructure demands, protracted procedures, substantial expenses, and labour-intensive characteristics of experimental research, numerical studies have

gained prominence subsequent to the confirmation of experimental outcomes by numerical approaches (Kitagawa and Ohta 2008; Skonecki and Buick 2023; Sikdar et al. 2023).

This work examined the flow parameters around a cylinder devoid of base effects by both experimental and numerical methods, with the results compared to previous literature. The research was performed under conditions with a Reynolds number of 14,000 and a cylinder diameter of 50 mm. The experiments conducted within the scope of the study were carried out at the Wind Engineering and Aerodynamics Laboratory within the Department of Energy Systems Engineering at Erciyes University. The smoke visualization approach was utilized to illustrate the flow in the experimental section. A hot-wire anemometer was employed to assess the influence of the flow on the cylinder and to examine its impacts on velocity fluctuations and vortex shedding. This method facilitated the extraction of the velocity profile along a line positioned 0.5D downstream of the cylinder, and the vortex shedding frequency was quantified. Changes in the Strouhal number were also analysed based on this frequency. An aerodynamic force measuring experiment was undertaken to ascertain the lift and drag forces, along with the corresponding force coefficients acting on the cylinder. Furthermore, to examine the pressure distribution surrounding the cylinder, pressure measurement experiments were conducted utilizing small pressure ports on the cylinder's surface. The readings were utilized to derive pressure profiles surrounding the cylinder. The experimental findings were additionally corroborated through numerical analysis utilizing the Computational Fluid Dynamics (CFD) program ANSYS FLUENT. Numerical simulations were performed to compare experimental results with computational findings. Various mesh configurations were evaluated, and the optimal mesh structure was chosen to guarantee solution correctness. The standard k- ϵ (SKE) turbulence model was utilized in the numerical analysis to simulate the turbulent flow surrounding the cylinder. The results from both experimental and numerical investigations were compared, confirming the dependability of the numerical method.

Findings and Discussion

The experiments conducted in the wind tunnel were performed at a wind speed of 5 m/s, corresponding to a Reynolds number of 14,000. Under these conditions, a smoke-wire flow visualization experiment was carried out. The experimental video recordings were edited and converted into image frames using Adobe Premiere Pro 2020. Figure 1 presents the visual representation of the flow around the cylinder obtained from the smoke-wire experiment.

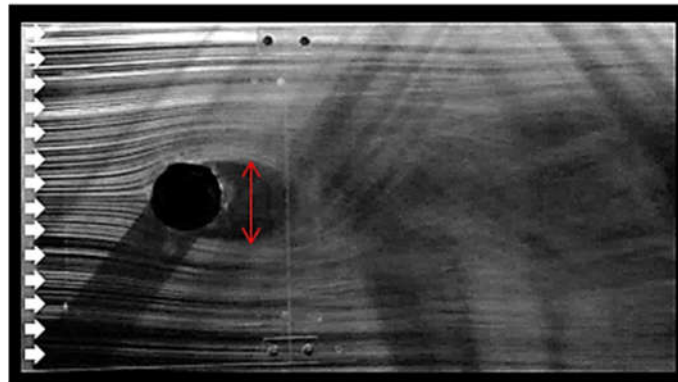


Figure 1. Experimental results of smoke-wire test

The wake flow width is indicated with an arrow on the image, and the Karman vortex street is visualized in a manner consistent with the findings reported in the literature (Taneda 1965).

The velocity graphs calculated from the data obtained through hot-wire anemometer measurements were non-dimensionalized for better analysis. The y-axis represents the measurement distance, which is normalized by the cylinder diameter (D), while the x-axis represents the measured velocities, which are normalized by the free-stream velocity (u_∞). This approach allows for the presentation of the velocity profiles in a non-dimensional form. The velocity distribution formed at a distance of D downstream of a single cylinder is presented in Figure 2.

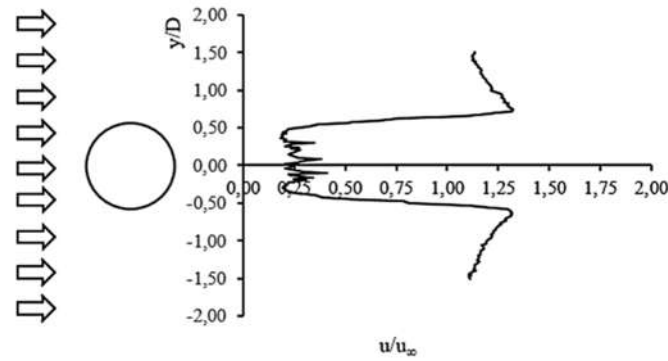


Figure 2. Graph of the distribution of velocity

In this case, it can be stated that the separated flow region is larger, resulting in higher inertial forces, and the flow is suppressed by these inertial forces.

In the study, vortex shedding frequencies were analyzed and visualized through graphs, and the spectral analysis results are presented in Figure 3. The Strouhal number (St) was calculated using the formula $St = (f \times D)/u_{\infty}$ where f represents the vortex shedding frequency from the surface of the cylinder, D is the characteristic length (cylinder diameter), and u_{∞} is the free-stream velocity. The analysis revealed a Strouhal number (St) of 0.21, which aligns well with the values reported in the literature, confirming the validity of the experimental and computational results (Nishimura and Taniike 2001).

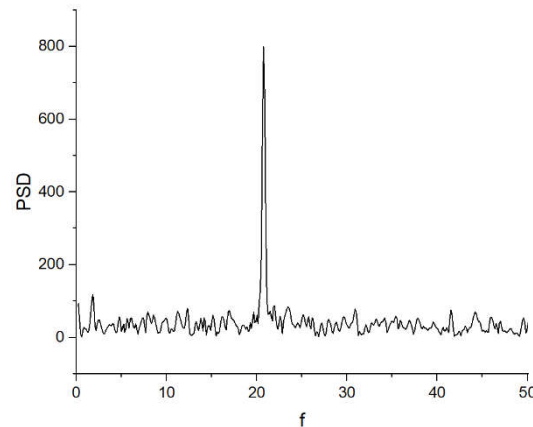


Figure 3. Spectral analysis of cylinder (f : frequency in logarithmic scale, PSD : Power Spectrum Density)

The results obtained from force measurement experiments were used to calculate the drag and lift coefficients. For a Reynolds number of 14,000, a negative lift coefficient of -0.09 was obtained due to the pressure difference between the upper and lower surfaces of the cylinder. Under the same conditions, the drag coefficient was calculated as 1.73.

In the pressure measurements, data were collected from 12 points on the surface of the cylinder at a rate of 1000 data points per second for a total duration of 150 seconds. The average of these measurements was calculated and used to determine the dimensionless pressure coefficient. The pressure distribution in cylindrical coordinates is presented in Figure 4.

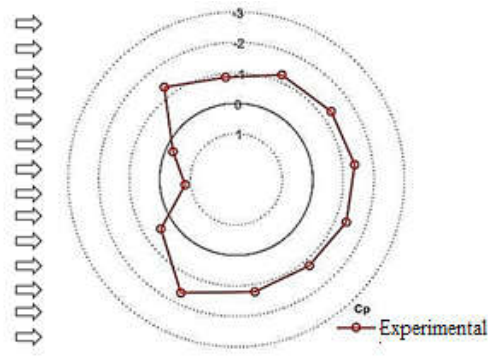


Figure 4. Pressure coefficient distribution for a cylinder

A mesh structure of 295,189 cells was established in the numerical analysis. Figure 5 depicts the mesh structure employed in the investigation.

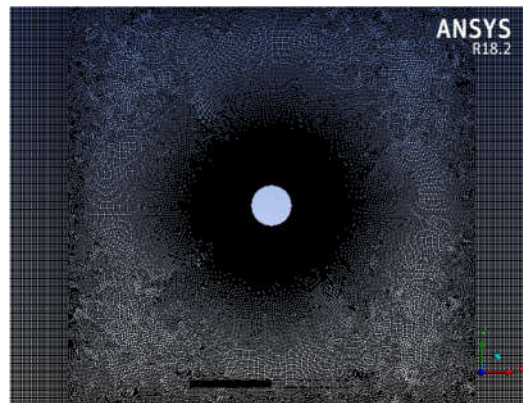


Figure 5 Grid mesh around the circular cylinder

A graph of the y^+ values was created to evaluate the appropriateness of the mesh configuration employed in the investigation. Given that the y^+ value was below 10, the chosen mesh was considered suitable, and the simulations proceeded with this mesh configuration. Figure 6 displays the graph of the obtained y^+ values.

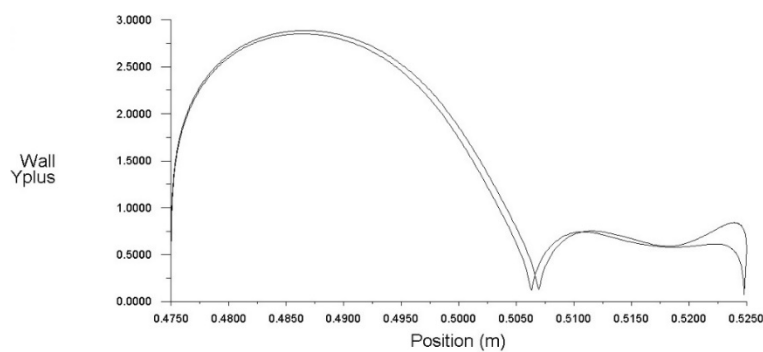


Figure 6 y^+ value graph for cylinder solution

The research revealed a vortex shedding frequency of 19.7 Hz and a Strouhal number of 0.20. The drag coefficient was established as 1.67, but the lift coefficient was computed as 0. The pressure coefficient data derived from numerical analysis and experimental observations were shown on a single graph for comparison, as illustrated in Figure 7.

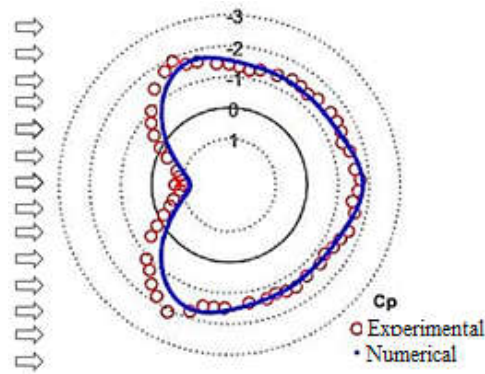


Figure 7 Comparison of numerical and experimental pressure coefficient distribution for a cylinder

The velocity distributions derived from the numerical analysis were compared with the experimental results, as illustrated in Figure 8.

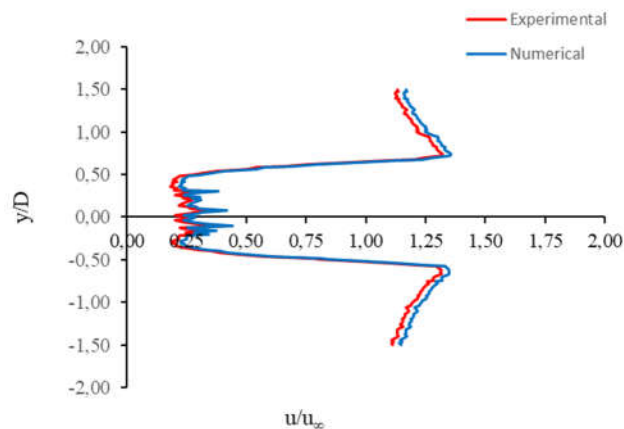


Figure 8 Comparison of numerical and experimental velocity distribution for a cylinder

Conclusion and Recommendations

The numerical modelling of the flow around a cylinder is of tremendous significance in the process of generating solutions for engineering challenges that are both more feasible and more quickly implemented. In contrast to numerical methods, experimental research necessitates a significant amount of both hard work and financial resources. In the course of this research, the flow around a cylinder was investigated in great depth by means of experimental approaches. The outcomes that were acquired from the experiments were compared with the outcomes that were gained from the numerical analysis. According to the findings of the research, the values that were stated in the literature are in good alignment with the experimental results, and the numerical results are in good agreement with the data that was obtained directly from the experiments. The reliability and correctness of the numerical model that was constructed is demonstrated by this uniformity and consistency. As a consequence of this, the numerical model that has been built can be used with complete assurance in subsequent research endeavors. This will enable researchers to acquire the necessary data without conducting any more experimental work. This method cuts down on the amount of time, money, and the amount of labor required, making it a more effective and practical alternative for engineering applications.

Thanks and Information Note

The authors thank the Scientific Research Projects Unit of Erciyes University under the contract numbers: FDK-2019-9434 for funding, and the Wind Engineering and Aerodynamics Research Group at Erciyes University for support.

References

- Cheng L, Chew LW (2003) Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler. *Ocean Eng* 30:1595–1611. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(02\)00148-8](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00148-8)
- Fan CC, Long JH (2005) Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand. *Comput Geotech* 32:274–289. <https://doi.org/10.1016/J.COMPGE0.2005.02.004>
- Gerrard JH (1978) The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number. *Philos Trans R Soc London Ser A, Math Phys Sci* 288:351–382. <https://doi.org/10.1098/RSTA.1978.0020>
- Kitagawa T, Ohta H (2008) Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *J Fluids Struct* 24:680–699. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.10.010>
- Lei C, Cheng L, Armfield SW, Kavanagh K (2000) Vortex shedding suppression for flow over a circular cylinder near a plane boundary. *Ocean Eng* 27:1109–1127. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(99\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(99)00033-5)
- Majumdar S, Rodi W (1989) Three-dimensional computation of flow past cylindrical structures and model cooling towers. *Build Environ* 24:3–22. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90012-7)
- Nishimura H, Taniike Y (2001) Aerodynamic characteristics of fluctuating forces on a circular cylinder. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 89:713–723. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00067-8)
- Sahin S, Durhasan T, Pinar E, Akilli H (2021) Experimental study on passive flow control of circular cylinder via perforated splitter plate. *Wind Struct An Int J* 32:613–621. <https://doi.org/10.12989/was.2021.32.6.613>
- Sikdar P, Dash SM, Sinhamahapatra KP (2023) A numerical study on the drag reduction and wake regime control of the tandem circular cylinders using splitter plates. *J Comput Sci* 66:101927. <https://doi.org/10.1016/J.JOCS.2022.101927>
- Skonecki GM, Buick JM (2023) Numerical Study of Flow around Two Circular Cylinders in Tandem, Side-By-Side and Staggered Arrangements. *Fluids* 8:1–21. <https://doi.org/10.3390/fluids8050148>
- Sumner D (2010) Two circular cylinders in cross-flow: A review. *J Fluids Struct* 26:849–899
- Taneda S (1965) Experimental Investigation of Vortex Streets. *J. Phys. Soc. Japan* 20:1714–1721
- Zdravkovich MM (1983) Observation of Vortex Shedding Behind a Towed Circular Cylinder Near a Wall. In: *In Proceeding of the 3rd International Symposium on Flow Visualization*. Michigan, pp 391–395

BALANCING POWER AND ENERGY: ANALYSIS OF ELECTRICAL AND ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES**Jyothi A Goudar^{1,2}, Thrinethra S N¹, Murugendrappa M V¹, Sharanappa Chapi^{1,*}**¹Department of Physics, B.M.S. College of Engineering, Bengaluru, Karnataka – 560 019, India²Department of Physics, Mangalore University, Mangalagangothri, Karnataka – 574 199, India**Abstract**

The increasing global demand for energy has necessitated the development of efficient and sustainable energy storage systems. Electrochemical energy storage systems, dominated by battery energy storage technologies, utilize electrochemical reactions to store and release energy. Traditional batteries, such as lead-acid and nickel-cadmium, are reliable but constrained by low energy density and short cycle life. Advanced systems like lithium-ion and sodium-ion batteries offer higher performance, while next-generation technologies, including metal-air and solid-state batteries, promise enhanced safety, energy density, and longevity. However, high costs, raw material availability, and recycling complexities remain significant challenges. Electrical energy storage systems, including capacitors, supercapacitors, and superconducting magnetic energy storage, provide unparalleled power density and rapid energy discharge, making them essential for instantaneous energy delivery applications. Despite these strengths, their lower energy storage capacity limits their use in large-scale applications compared to batteries. This study provides a comparative analysis of these systems, focusing on their design principles, benefits, limitations, and potential roles in modern energy frameworks. While Electrochemical energy storage systems excel in long-term energy storage, electrical energy storage systems complement them in scenarios demanding high power and quick response. A balanced integration of these technologies is crucial for advancing a more sustainable and resilient energy infrastructure. The conclusion summarizes the current state of energy storage technologies, emphasizing their importance in efficiently using renewable energy sources and mitigating climate change.

Keywords: Energy storage systems, Electrochemical and Electrical energy storage systems, Cycle life, Batteries, Supercapacitor, Energy storage technologies.

1. Introduction

The pressing need to reduce dependence on fossil fuels has sparked a relentless pursuit of greener, renewable alternatives derived from eco-friendly energy sources. This urgency is derived from the rapid expansion of the global economy, massive consumption of fossil fuels, and escalating environmental pollution, which have collectively fueled the development of storage and conversion technologies. Moreover, there is a growing interest in research for high-performance devices to accelerate their development of eco-friendly electric vehicles, portable electronic devices, power tools, and electric automobiles. The current emphasis on renewable and sustainable energy sources such as wind farms, solar cells, water farms, and transportation systems based on sustainable loops, processes, and portfolios has opened up new avenues for innovation. However, developing technologies that enable efficient electrical energy storage remains a significant challenge. To address this issue, electrochemical energy storage systems, particularly supercapacitors and batteries, have emerged as essential technologies (Goudar et al., 2024).

Two inherent characteristics of electricity pose significant challenges to its effective utilization and simultaneously create a demand for energy storage solutions. One of the primary challenges is that electricity must be generated and consumed simultaneously, necessitating a constant adjustment of power supply to meet fluctuating demand. Another challenge is that power plants are often located at a considerable distance from the points of electricity consumption (Buchana & Ustun, 2015). These fundamental properties of electricity lead to several operational difficulties. The perpetual requirement for power lines means that a single point of failure can disrupt the entire energy supply chain. Moreover, the need for continuous power lines hinders the provision of electricity to mobile applications. Furthermore, the geographic distribution of power supply and demand can result in the concentration of power flow onto a single transmission line, leading to congestion

(Chakraborty et al., 2022). **Table 1** performance parameters of batteries, supercapacitors, and capacitors focusing on specific energy and power, operational temperature, cyclic life, and storage mechanism followed by parameters that distinct supercapacitors, batteries, and capacitor.

Table 1. Performance parameters of batteries, supercapacitors, and capacitor (Li et al., 2016; Mitali et al., 2022)

Parameter	Batteries	Supercapacitor	Capacitor
Specific energy (Wh kg ⁻¹)	≤265	0.01–0.05	1–5
Specific power (W kg ⁻¹)	≤3000	<10 ⁵	10 ⁴
Cycle life	500–10000	> 10 ⁵	3×10 ⁴
Operating temperature (°C)	–20 to 60	–20 to 100	–40 to 85
Mechanism of storage	Chemical	Voltage across terminals	Voltage across terminals
Internal resistance (Ω)	0.01–2	0.1–1	0.1–10
Efficiency (%)	80-90	> 95	85 to 98
Charge time	10-60 min	1-10s	1-10s
Cell voltage (V/cell)	3.6–3.7	3.6–3.7	2.3–2.75

The primary constituents of supercapacitors encompass an electrolyte solution, two parallel plate electrodes, electrode material, and an anion-permeable separator as depicted in **Figure 1**. The effective separation of the electrodes is crucial in preventing mutual contact and short circuits, thereby ensuring optimal performance. In solid-state electrochemical double-layer supercapacitor energy storage occurs through two reversible processes, the first involves the reversible desorption and adsorption of ions through the electrolyte and active materials, while the second entails reversible faradic redox reaction that occur during discharging and charging cycles (Gómez et al., 2005). Supercapacitors are classified into three distinct categories based on their energy storage mechanisms (SM), battery type, capacitors, electric double-layer capacitors, and pseudocapacitors. In the context of electric double-layer capacitors ions undergo reversible physical adsorption at the electrolyte-electrode interface, a process that occurs without any chemical reaction (Rayar et al., 2024). This process restricts capacitance, resulting in a higher potential difference and reduced energy density and capacitance, as Faraday redox processes are absent. Conversely, pseudocapacitors facilitate enhanced charge storage capacity through Faraday redox reactions, thereby providing supercapacitors with improved energy storage capabilities (Alruwashid et al., 2021).

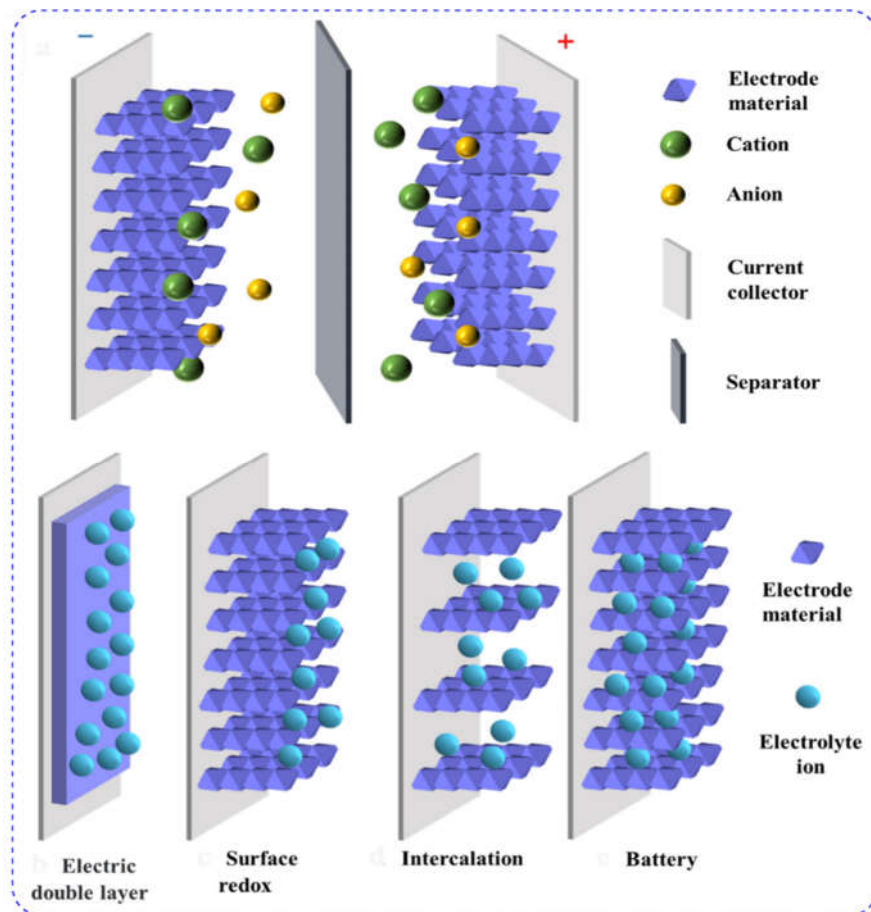


Figure 1. An architectural design of supercapacitor and batteries, including electric double layer capacitor, surface redox capacitor, and battery (C. Zhang et al., 2019). (reproduced with permission as an open-access source)

Supercapacitors harness an accelerated reversed faraday response occurring near the material's surface to facilitate energy storage. This mechanism is similar to the discharging and charging processes in batteries, without including phase fluctuations. Pseudocapacitors can be categorized into two types, those governed by interfering layers and those regulated by surface redox processes. The pseudocapacitors, ions in the electrolyte solution are attracted to the surface, where electron transfer occurs through the redox pseudo-capacitance process (Kandalkar et al., 2011). The layered electrode structure exposes a larger surface area to the electrolyte solution, ion movement through the electrode interface, and enabling electron transfer. However, the cycling performance of pseudocapacitors is often compromised by the electrode material's tendency to expand and shrink during discharging and charging due to the redox process. In comparison to electric double-layer capacitors, pseudocapacitors exhibit significantly higher capacitance and energy density, with less reversible physical charge/discharge processes. This disparity is primarily attributed to the distinct charge storage mechanism governed by the Faraday redox reaction, which enables to achievement of enhanced energy storage capabilities (C. Zhang et al., 2019). **Figure 2** represents the classification of electric energy storage systems which are broadly classified into two types electrostatic and magnetic energy storage systems.

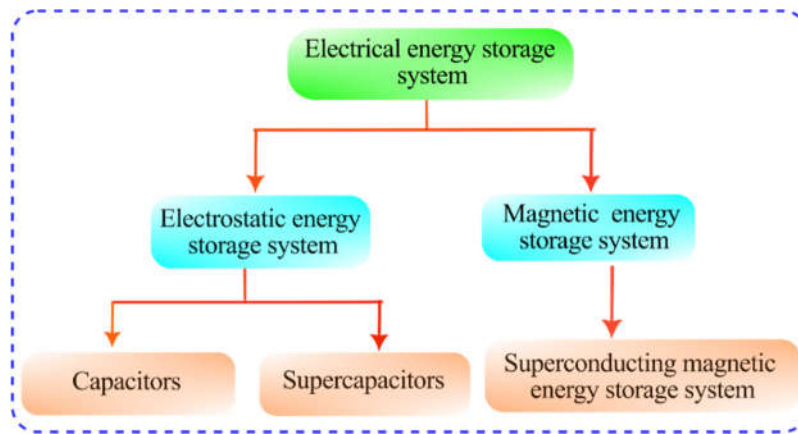


Figure 2. Classification of electric energy storage system.

The charge storage mechanism in battery-type materials involves a reaction with hydroxide ions in an alkaline environment, with the reaction kinetics governed by the mobility of ions from the electrolyte. Materials exhibiting battery-like behavior typically possess a high capacity for charge storage. However, materials undergo delayed phase transition during discharging and charging and often experience a decline in their kinetic functionality, resulting in sub-optimal performance (Zhong et al., 2012). In contrast, battery materials with unique nanostructures exhibit an extensive surface area, enabling superior redox-active site responses and minimizing the diffusion distance for electrolyte ions. Moreover, by engineering their nanostructures, battery-like materials can mitigate the rapid phase transition that occurs during charge storage, thereby enhancing their overall performance (Blurton & Sammells, 1979; Goudar et al., 2024).

The classification of the electrochemical energy storage system is shown in **Figure 3**. Where the electrochemical energy can be stored by Li-ion, Na-ion, Na-S, lead-acid, Ni-Cd, and metal-air batteries. The fundamental principle underlying battery operation involves the coordinated movement of electrons and ions through a chemical reaction between the cathode and anode. During discharge, the anode releases electrons through an oxidation reaction, sending them into the external circuit, and traveling to the cathode (Chakraborty et al., 2022). Concurrently, ions traverse the electrolyte from the anode to the cathode, completing the internal circuit and facilitating the chemical reactions. This process is reversible in rechargeable batteries, allowing the battery to return to its original state. The application of an external electric energy source drives electrons from the cathode back to the anode, reversing the chemical reactions and restoring the battery's original state (Zheng et al., 2018). This seamless energy transfer enables devices to function efficiently and effectively. For instance, during the lithium deintercalation process in standard Li-ion batteries, Li-ions are removed from the crystalline structure of the lithium cobalt oxide cathode, generating cobalt oxide (Youssry et al., 2020). The charge process is reversed during discharge, involving the dispersion of cations within the crystalline structure and subsequent phase transformation and alloying processes governing the faradaic process (Park et al., 2010).

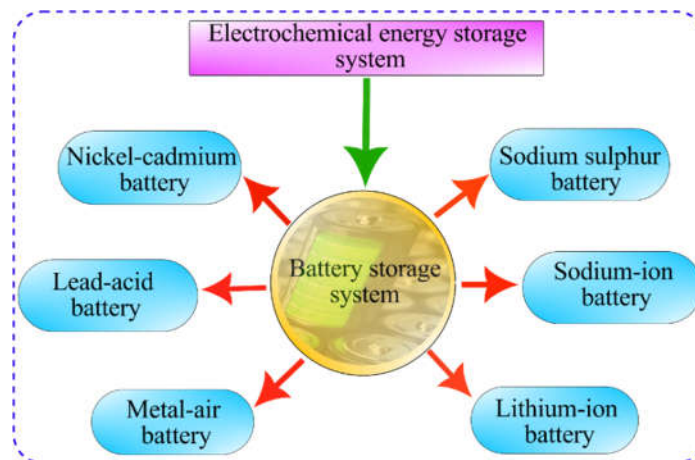


Figure 3. Classification of electrochemical energy storage technologies.

This study provides a comparative analysis of these systems, focusing on their design principles, benefits, limitations, and potential roles in modern energy frameworks. Traditional batteries, such as Pd–acid and Ni–Cd, advanced systems like Li–ion and sodium-ion batteries, while next-generation technologies, including metal-air and solid-state batteries. Where electrical energy storage systems, including capacitors, superconducting magnetic energy storage, and supercapacitors make them essential for instantaneous energy delivery applications. The strengths and drawbacks of electrochemical and electrical energy storage limit their use in large-scale applications and lower energy storage capacity. While electrochemical energy storage systems excel in long-term energy storage, electrical energy storage systems complement them in scenarios demanding high power and quick response.

2. Electrochemical energy storage (ECEs) systems

The dominant energy storage technology, ECEs, operates through three essential mechanisms including ionization, transportation of charged species, and recombining of charge. ECEs encompass Battery energy storage (BEs), which harnesses energy within electrodes, and flow battery energy storage (FBEs), which leverages fuel-based storage and external electrode feeding. With the demand for lightweight and adaptable electronic devices, scientists are actively pursuing groundbreaking electrochemical storage research (Chapi et al., 2024; Gür, 2018).

Battery energy storage (BES) system: Batteries are innovative devices that harness chemical reactions to generate electrical energy. Each battery cell consists of three fundamental components: an anode, cathode, and electrolyte. These cells are grouped into primary and secondary categories. Primary batteries are single-use, non-rechargeable units that expend their chemical energy once. In contrast, secondary batteries are designed for repeated recharging, offering sustainable energy solutions. This rechargeable category encompasses various types, including Pd–acid, Li–ion, Ni–Cd, sodium-sulfur, Na–ion, and metal-air batteries, distinguished by their unique electrode and electrolyte materials (Revankar, 2019).

2.1. Lead-acid (Pd-acid) batteries

Pd–acid batteries have been a cornerstone of energy storage since their invention in 1859. These devices convert chemical energy into electrical energy through a combination of lead plates and sulfuric acid. The fundamental design consists of a metallic sponge lead anode, an electrolyte solution, and a lead dioxide cathode. There are two primary types of lead-acid batteries valve–regulated and flooded and batteries feature a sealed design with a pressure-regulating valve (May et al., 2018). Today, lead-acid batteries are ubiquitous globally, with ongoing research focused on enhancing performance. Recent studies have investigated grid optimization, lead paste formulation, and additive application. Research on bipolar lead acid batteries has examined substrate materials, design architectures, fabrication methods, and sealing techniques (Y. Zhang et al., 2022).

For instance, In 2022, Yan Y and their team developed a surface treatment technology for the positive plate grid of Pd-acid batteries yielding a capacitive gradient oxide film stable, that enhances battery lifespan and capacity. The deposition process of α -PbO₂ on Pb–Ca–Sn alloy was examined using galvanostatic polarization, steady-state polarization, and anode polarization. By adjusting the deposition time of various layers, the electrochemical properties were studied. The results indicated the α/β gradient oxide layer exhibits excellent electrochemical studies. At specific thickness ratio was around 1.44 for α -PbO₂ to β -PbO₂, with corrosion potential and corrosion current density measured as 0.160 V and 0.084 mA cm² respectively. The gradient composite demonstrated a high capacity of 91.81 mAh g⁻¹ within the 0.5–1.4 V voltage range, with a capacity retention rate of nearly 100% after 100 cycles at a current density of 0.04 Ag⁻¹. The intermediate layer, matrix, and outer layer formed a tightly bound structure, free from the impurity phase was a better choice for advanced lead-acid batteries (Yang et al., 2022). A unique way where Zhang and team synthesized a porous rice husk-derived activated carbon (RHAC) utilizing rice husk and NaOH as an activating agent paved the way for its modification with poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) through in-situ polymerization. This yielded the PEDOT@RHAC composite materials, which were effectively integrated into the positive electrode of Pd–acid batteries, resulting in substantial performance enhancements. The RHAC material exhibits a high micropore ratio and abundant pore structures, which remained largely intact following PEDOT modification. The PEDOT coating formed a dense network, facilitating interparticle connections and conductivity. The

incorporation of PEDOT@RHAC into a positive electrode plate yielded outstanding electrochemical performance, characterized by increased oxygen evolution potential, reduced charge transfer resistance, and minimized active material detachment. Notably, the PEDOT@RHAC-modified battery demonstrated a 2.08-fold increase in cycle life and 1.3-fold enhancement in discharge capacity during deep cycling, as well as superior lifespan in high-rate partial state charge cycling (X. Zhang et al., 2024).

The key benefits of lead acid batteries include competitive upfront costs, robust performance across temperature extremes, minimal maintenance requirements, high power density, wide availability with a drawback of restricted lifespan, slow charging capabilities, elevated self-discharge rates, environmental concerns stemming from lead toxicity and modest energy density (Kampouris et al., 2020). Overall, lead-acid batteries have established themselves as a reliable energy storage solution. Ongoing research aims to address existing drawbacks, ensuring their continued relevance in meeting growing energy demands.

2.2. Lithium-ion (Li-ion) batteries

Lithium-ion batteries have become ubiquitous in transportation industries, and electronics, particularly in power grid applications and plug-in hybrid electric vehicles, due to their exceptional charge density (Hossain et al., 2020). These batteries consist of lithium metal oxide cathodes, graphitic carbon anodes, and inorganic dissolved Li salt electrolytes. The flow of current is facilitated by the migration of lithium ions between the cathode and anode. During charging, lithium cations travel to the carbon anode via the electrolyte, combining with external electrons to form lithium atoms between carbon layers, this process is reversed during discharge (Akinyele & Rayudu, 2014). Researchers have evaluated cutting-edge solutions for enhancing Li-ion battery performance and reducing cost, highlighting advancements in electrode materials for next-generation energy density and low-temperature Li-ion batteries (Gao et al., 2022; Shen et al., 2021).

Butt M and team in 2024, developed a two-dimensional SiN₃ mono-layer, combining the properties of nitrogen and silicon, which emerges as a promising anode substance for Na⁺ and Li⁺ based batteries, exhibiting exceptional thermal, mechanical, and dynamic stability. Density functional theory (DFT) calculations reveal that the SiN₃ mono-layer achieves a maximum theoretical capacity of 1146 mA hg⁻¹, with low diffusion barriers of 0.025 eV for Li and 0.034 eV for Na. Furthermore, the calculated average open circuit voltage of 0.43 V for Li₃SiN₃ and 0.47 V for Na₃SiN₃ meet commercial design requirements. These findings underscore the potential of SiN₃ mono-layer as a high-performance anode substance for next-generation batteries (Butt et al., 2024).

In 2024, Bade B and colleagues synthesized Cu₂FeSnS₄ (CFTS) nanoparticles via the colloidal hot injection method (**Figure 4A**). Where the crystalline size of CFTS nanoparticles is approximately 68 nm, with an energy gap of around 1.46 eV. Surface area analysis reveals a porosity of 4.15 m²g⁻¹ at a pore radius of 500 nm using BET studies. High reversible capacity and stability at room temperature at room temperature were two significant performance characteristics of the produced composites, which were used as an anode substance for lithium-ion batteries. With a voltage range of 0.005 to 3.0 V, the initial discharge capacity reaches 1181 mAhg⁻¹ and retains 528 mAhg⁻¹ across charge-discharge cycles (**Figure 4B(a, b)**). At 1181 mAhg⁻¹ discharge capacity and stability at 420 mAhg⁻¹ after 420 cycles. Subsequently, the capacity decreases to 300 mAhg⁻¹ after 1200 cycles. **Figure 4C(a-d)** represents the electrochemical impedance spectra (EIS) profile, Bode plots, Linear fitting of Warburg impedance, and cyclic voltammetry (CV) curves for 1st and 10th cycles CFTS electrode at a scan rate of 5 mVs⁻¹. The distinctive porous structure of CFTS nanoparticles facilitates electrical conductivity due to the presence of Cu, while the incorporation of Li-alloy able metals Sn and Fe improves their rate performance, capacity retention, and reversible capacity (Bade et al., 2024).

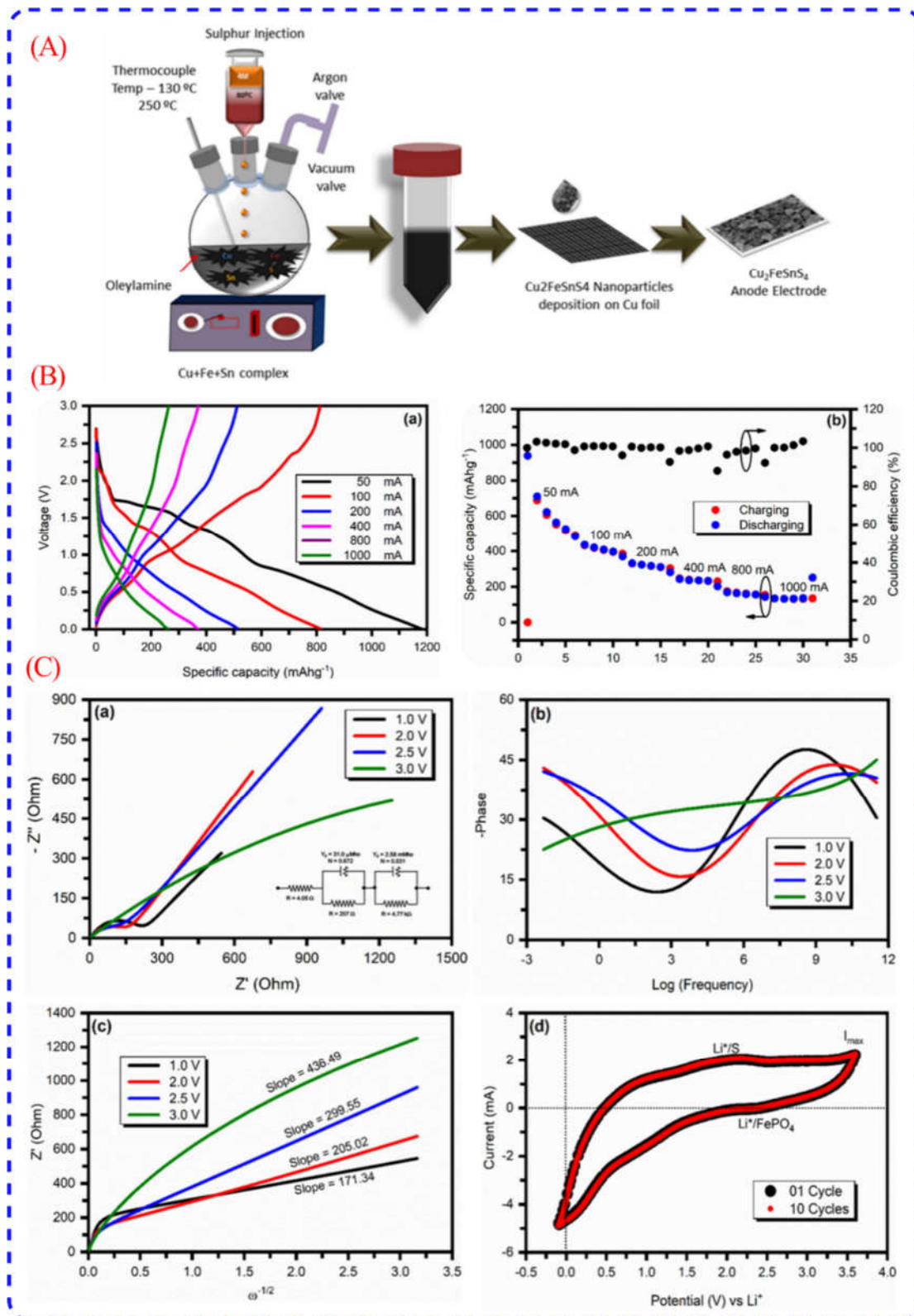


Figure 4. (A) Preparation of CFTS nanoparticles via colloidal hot injection techniques, (B) a. Charge-discharge profiles at the varying current density of 50–1000 mA, within a voltage window of 0.005–3.0 V, b. Coulombic efficiency and capacity retention of compound, (C) a. EIS profile, b. Bode plots, c. Linear fitting of Warburg impedance, d. CV curves for 1st and 10th cycles CFTS electrode at a scan rate of 5 mV s⁻¹ (Bade et al., 2024) (reproduced with permission as an open-access source).

The key benefits of Li-ion batteries include, lightweight design with high power density, enhanced efficiency, prolonged lifespan, and high-power output with the limitation of significant production expenses, tailored charging systems, temperature sensitivity impact performance, risk of thermal instability, and complete discharge causes permanent damage (C. Zhang et al., 2018).

2.3. Nickel–cadmium (Ni–Cd) batteries

The Ni-Cd batteries, invented by Swedish engineer Waldemar Jungner in 1899, are a well-established technology with widespread applications. Jungner pioneered industrial-scale production in Sweden in 1906 (Bergstrom, 1952). The first US-manufactured Ni–Cd batteries emerged in 1946, featuring a “pocket-type” design with Ni and Cd active materials (Brodd, 2012). In 2024, Yousaf and colleagues synthesized binder-free Ni–S and Cd–S–Ni–S electrode material on nickel foam using a homemade chemical vapor deposition technique. XRD analysis revealed the formation of polycrystalline Cd–S–Ni–S and Ni–S phases with average crystallite sizes of approximately 32–45 nm. The molar ratios of S and Ni in Ni–S electrode material were found to be 1.46 and 0.46 respectively. While the molar ratios of Cd, S, and Ni in Cd–S–Ni–S were, 0.439, 0.702, and 0.459 respectively. The synthesized electrode material exhibited exceptional specific capacitance values of 3305 and 4086 Fg⁻¹ at 1 mVs⁻¹. The power density and energy density of electrode material reached 1399 Wkg⁻¹ and 25 Whkg⁻¹ respectively. The Cd–S–Ni–S electrode material demonstrated a higher capacitive contribution than the Ni–S electrode materials, with an increase in capacitive contribution, observed at higher scan rates. Overall, the excellent electrochemical performance, capacity retention of around 92%, and cyclic stability of synthesized electrode material a promising candidates for energy storage application (Yousaf et al., 2024).

Galushkin and team studied the hydrogen accumulation in pocket electrodes of Ni–Cd batteries during operation. Where the oxide-nickel electrode’s active substance exhibited a remarkable gravimetric capacity of 22 wt% and a volumetric capacity of 444.2 kgm⁻³, surpassing previous records for reversible metal hybrids and nanostructure carbon materials by fourfold, as well as meeting the needs of energy requirements for mobile hydrogen storage systems. The total energy density of the stored hydrogen in oxide-nickel electrodes active substance reached 79.40 kJ g⁻¹ and 160.24 KJ cm⁻³, outperforming gasoline’s relevant parameters of 46 KJ g⁻¹ and 32.7 kJ cm⁻³. The Cd–electrode’s active substance demonstrated specific capacities of 16.9 wt% and 404.4 kg m⁻³, with a total energy density of 60.99 kJ g⁻¹ and 145.80 kJ cm⁻³ (Galushkin et al., 2021).

Ni–Cd batteries offer several benefits, including an extended life-line that allows storage in a discharged state, exceptional performance in low-temperature environments, and economical operation with the lowest cost per cycle. Additionally, Ni–Cd batteries boost rapid charging capabilities with minimal stress, low-temperature performance, and reliable load. However, these batteries also have some drawbacks. Notably, in comparison to other systems, their particular energy density is rather low. Furthermore, Ni–Cd batteries experience high self-discharge rates, affecting storage efficiency. Another significant concern is the environmental impact due to the toxic cadmium content, which restricts landfill disposal.

2.4. Sodium sulfur (NaS) batteries

Molten sulfur is used as the positive electrode of sodium-sulfur batteries, which are cylindrical electrochemical cells. To maintain the molten state and ensure adequate conductivity, the components are housed within a thermally insulated enclosure, heated above 270°C. Compared to Pd-acid batteries, NaS batteries have three times the energy density, less maintenance, and longer lifespans (Dunn et al., 2011; Moseley & Rand, 2015).

Density functional theory simulations were employed by Zhang and the team to examine how based transition metal-doped β_{12} borophene single-atom catalysts with sulfur containing compound in Na-S batteries. The research findings showed that β_{12} borophene, with its hexagonal pore density, exhibits exceptional stability and anisotropic crystal structure. Incorporating Co, Ni, and Fe atoms into the β_{12} borophene framework formed single-atom borophene structures, with charge density difference calculations indicating distinct charge transfer patterns. Notably, transition metal doped β_{12} borophene showed the best catalytic effects, promoting the migration of Na ions, according to investigation into the adsorption configurations of sodium polysulfides and chain-like sulfur on different substrates. Furthermore, FeN₄– β_{12} borophene in the sulfur reduction reaction of sodium polysulfides promotes polysulfide decomposition and mitigates the shuttle effect. These findings

provide significant theoretical insights into the optimization of catalysts and design and electrode compound for Na–S batteries, offering a promising avenue for enhanced performance (P. Zhang et al., 2024).

In 2021, Reddy and their team developed a novel flower-like MoS₂/rGO composite, comprising a few atomic layers of MoS₂ with mixed metallic phases, which was synthesized in situ on rGO sheets via a hydrothermal method. This unique structure played a crucial role in enhancing conductivity and mitigating volume expansion during the cyclic process, yielding an impressive initial capacity of 886 mAh g⁻¹ at 0.2 C-rate and remarkable stability at high rates. The MoS₂/rGO/S cathode demonstrated exceptional resilience, retaining 190 mAh g⁻¹ at 2 C-rate after 1000 cycles with negligible capacity fade and excellent stability. The composite's superior electron/ion transport properties and conductivity remained intact despite volumetric changes during charge/discharge, enabling long-term cycling stability up to 1000 cycles and impressive rate capability around 350 mAh g⁻¹ (Reddy et al., 2021).

NaS batteries offer several benefits, including exceptional energy and power density, impressive efficiency rates, extended cycle stability, and resistance to ambient environmental conditions. However, these batteries exhibit drawbacks including high-cost production, safety concerns, operational and maintenance requirements, and high-temperature operation.

2.5. Sodium ion (Na-ion) batteries

Li-ion batteries have led energy storage systems since their commercialization in 1991. However, limitations such as inadequate cycle life, insufficient power density, and safety concerns have sparked research into alternative materials (Yabuuchi et al., 2014). Where Na-based anodes have turned out to be a potential candidate due to their affordability and abundance. Na-ion battery development began in the 1980s, concurrently with Li-ion batteries. After Li-ion commercialization, research interest waned but revived in the 2010s due to increasing demand and raw material costs (Tapia-Ruiz et al., 2021).

A typical Na-ion battery consists of a cathode, anode, electrolyte, separator, and (aqueous or non-aqueous). Its operation mirrors Li-ion batteries, with sodium ions migrating between electrodes during charging and discharging (Pan et al., 2013). Recent developments include phosphates, organic compounds, transition metal oxides, and sodiated layer cathode materials. Carbonaceous materials, intermetallic and organic compounds, transition metal oxide (or sulfides), and the electrolytes, binder's development and additives (Hwang et al., 2017).

In 2024, a novel cobalt-free cathode material, Na[Ni_{0.55}Mn_{0.35}Fe_{0.1}]O₂ (NFM), with a biphasic P₂/O₃ layered structure was synthesized and underwent dual modifications to enhance its electrochemical properties. The incorporation of Bi³⁺ ions into the NFM lattice was strategically employed to optimize the P₂/O₃ phase ratio. Furthermore, a thin layer of Bi₂O₃ was deposited onto Bi³⁺-doped NFM to modify its surface characteristics. The results showed that the pristine NFM cathode exhibited a moderate specific discharge capacity of 170 mAh g⁻¹. In contrast, the Bi-doped cathode displayed an improved capacity of 181 mAh g⁻¹, while the Bi₂O₃-coated BNMF (BNMF@Bi₂O₃) demonstrated a comparable capacity of 180 mAh g⁻¹. However, the pristine NFM cathode suffered from severe capacity degradation, with a pronounced loss of approximately 80% within the initial 250 cycles. After 1000 cycles, the BNMF cathode retained 47% of its initial capacity, whereas the Bi₂O₃-coated BNMF exhibited a significantly enhanced capacity retention of 73%. This remarkable improvement in rate capability can be attributed to the synergistic effects of Bi-doping and Bi₂O₃ coating, which collectively increased interlayer spacing, facilitated ionic conduction, and produced the particles from electrolyte corrosion (Mishra et al., 2024).

In 2024, lavela and team a series of Na_{0.67}[Li_{0.07}Fe_{0.3+x}Mn_{0.63-x}]O₂ was synthesized via scalable and cost-effective sol-gel method at temperatures ranging from 800–1000°C. Diffraction analysis revealed the formation of multi-phase systems comprising P₂/P₃ and O₃ phases, which are more pronounced with increasing iron content and annealing temperature. Notably, microscopy images confirmed the layered structure of oxides. **Figure 5(a-d)** demonstrates the kinetic response of these compounds as positive electrodes in sodium half cells were evaluated using CV and EIS, revealing a general trend of decreasing sodium diffusion coefficients with increasing iron content and annealing temperature. This decrease was correlated with the emergence of additional phases primarily O₃, which also led to increased cell resistance, particularly R_{ct} values. Rate capability tests verified a strong relationship between kinetic behavior and performance at high rates with P₂-types achieving capacities of 74 and 61 mAh g⁻¹, respectively with excellent capacity retention after 100

cycles at 1C. Furthermore, electrochemical cycling at low and room temperatures underscored the exceptional performance attributed to its P₂-type structure (Lavela et al., 2024).

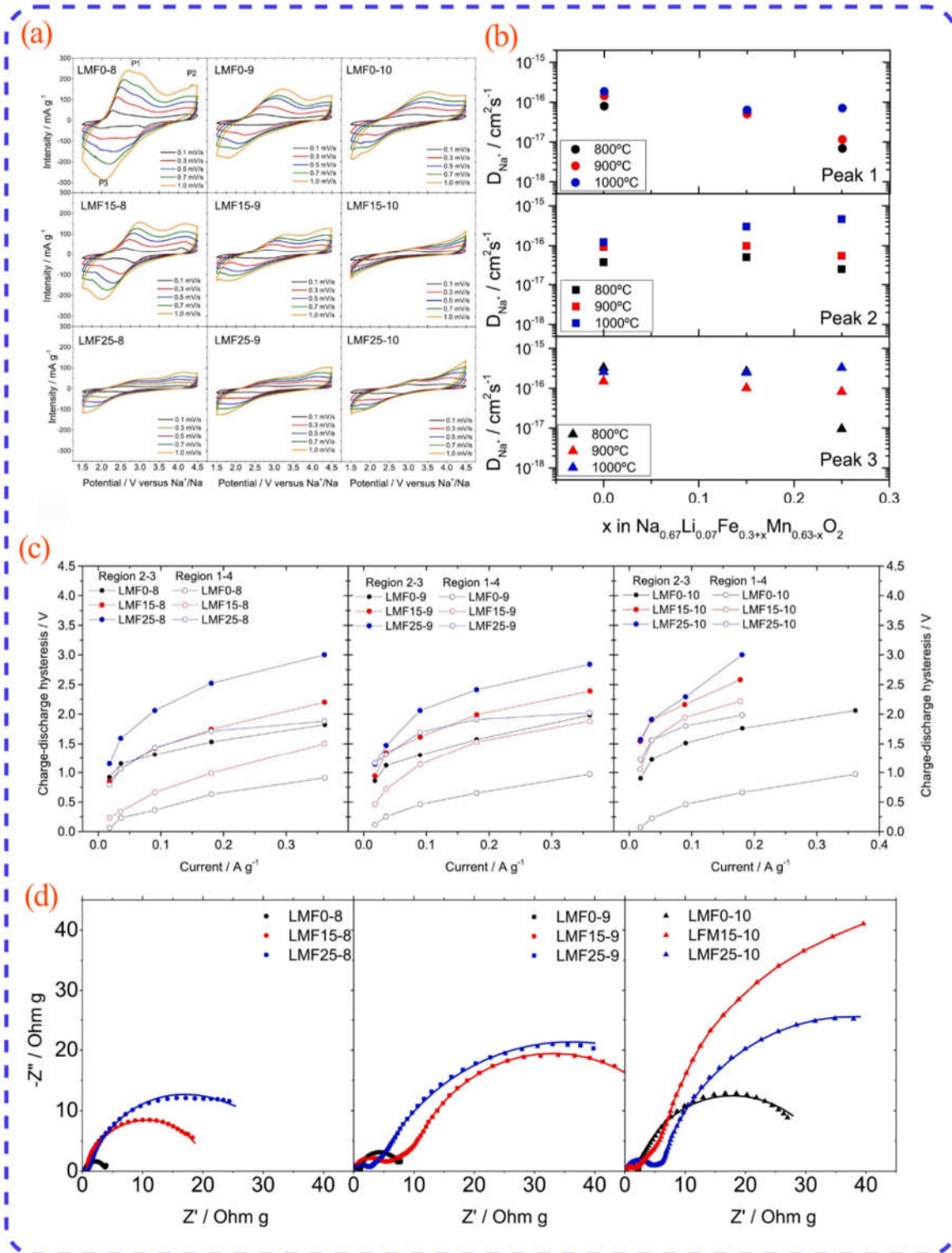


Figure 5. a. CV curves after 100 cycles at 1C rate with increased sweep rates, b. Variation of sodium diffusion coefficients with iron concentration for samples annealed at various temperatures, c. Charge-discharge hysteresis as a function of applied current in low and high voltage regions and d. Nyquist plots of Ni_{0.67}[Li_{0.07}Fe_{0.3+x}Mn_{0.63-x}]O₂ series of cycled electrodes (Lavela et al., 2024) (reproduced with permission as an open-access source).

2.6. Metal-air batteries

The increasing demand for advanced battery storage systems, driven by portable electronics and electric transportation, has led to significant research into metal-air batteries. Compared to traditional batteries, these batteries have a higher energy density, and higher specific capacity, which makes them attractive options for future energy storage requirements. Metal-air battery studies began in the 1960s and 1970s, but recent advancements have been substantial (Chawla, 2019). Unlike traditional batteries, metal-air batteries utilize atmospheric oxygen as the cathode, eliminating the need for internal cathode materials. The internal components include an oxygen cathode, metal anode, separator, and electrolyte (Blurton & Sammells, 1979).

The operation involves electrochemical reactions between the metal anode and atmospheric oxygen. The electrolyte, chosen based on the anode material, can be alkaline (e.g. potassium hydroxide), neutral (e.g. sodium chloride), or non-aqueous (base metal salt). During charging, metal ions form, releasing electrons, while oxygen transforms into hydroxide ions. During discharging, atmospheric oxygen combines with metal ions to form metal hydroxide, generating current through electrolysis (Olabi et al., 2021).

In 2023, Azizi and colleagues studied a comprehensive examination of vibrational attributes of α^- , β^- , and γ^- graphyne and graphene monolayers, and surface mechanical characteristics with a focus on their potential applications in cathode and anode materials in metal-ion and metal-air batteries. In the context of anode substance for metal-ion batteries, α^- and γ^- graphyne monolayers, characterized by their minimal volume expansion, and exceptional surface mechanical stability, hold great promise as anode materials, with a particular focus on their specific surface areas. Additionally, the vibrational properties of α^- graphyne rendered it less suitable for O_2 gas adsorption. A comprehensive evaluation of the elastic modulus, natural resonant frequency, surface residual stress, and specific surface area of the graphyne family and graphene monolayers revealed distinct suitability sequences for metal-air battery applications. Consequently, γ^- graphyne emerged as a promising cathode material, owing to its optimal surface mechanical properties and vibrational characteristics (Azizi et al., 2023).

Key benefits include high theoretical specific energy and abundant oxygen supply from air cathode. However, challenges are environmental condition dependency and potential hydrogen gas leakage due to anode corrosion in aqueous cells. Optimizing metal-air battery performance requires careful consideration of anode material, electrolyte compatibility, and operating conditions.

3. Electrical energy storage (EES) systems

Electrical energy storage systems harness the energy within an electric field, preserving it in its original form. These systems are broadly categorized into two types, those that store energy electrostatically and those that use magnetic fields. Here, electrostatic storage includes capacitors and supercapacitors, whereas superconducting magnetic energy storage represents a magnetic approach.

3.1. Supercapacitors

Supercapacitors are made up of an electrolyte, a separator, and two conductive electrodes. They are also referred to as electric double-layer capacitors or ultracapacitors. A constant dielectric direct current voltage placed across two electrodes spaced apart by a thin insulating layer creates an electrostatic field that stores energy. The use of activated carbon electrodes increases the surface area, leading to higher energy density (Krishan & Suhag, 2019). A porous membrane separating the electrodes enables the free movement of charged ions while preventing electrical contact. A direct current voltage charges the electrodes, causing ions in the electrolyte to go into the electrode pores build up at the electrode-electrolyte interface, and create charged double layers with opposite polarity. This occurs due to the electrostatic attraction between ions and opposite charge. The electrolyte facilitates the transport of ions between the electrodes. In terms of structure, supercapacitors occupy a middle ground between batteries and capacitors, exhibiting characteristics of both (Dubey & Guruviah, 2019; Luo et al., 2015).

The facial electrodeposition method is employed to synthesize La-Co LDH/CC, yielding exceptional electrochemical performance in alkaline electrolytes. This makes it an attractive option for high-performance electrochemical applications, particularly due to its influence on redox-active species. However, the incorporation of non-ferrite components into La-Co structures is possible, depending on the researcher's

objective for instance, **Figure 6(a-g)** represents the fabrication of a two-electrode cell using La-Co LDH/CC in an alkaline electrolyte, accompanied by cyclic voltammetry curve, GCD plots at varying current densities, and a comparative Ragone plot illustrating its gravimetric and volumetric capacity in redox and alkaline electrolyte. Notably, La-Co LDH nanosheets exhibit outstanding rate and stability performance up to 1000 cycles, retaining 91.33% capacity and achieving 93.36% rate performance across a 10–35 Ag^{-1} current density range. Furthermore, La-Co LDH demonstrates extremely low resistance in redox electrolytes, achieving an impressive 2162 Fg^{-1} specific capacitance and high current density at 10 Ag^{-1} . Remarkably, La-Co LDH exhibits exceptional cyclic stability over 15000 cycles, retaining 96.55% capacity (Bailmare et al., 2022).

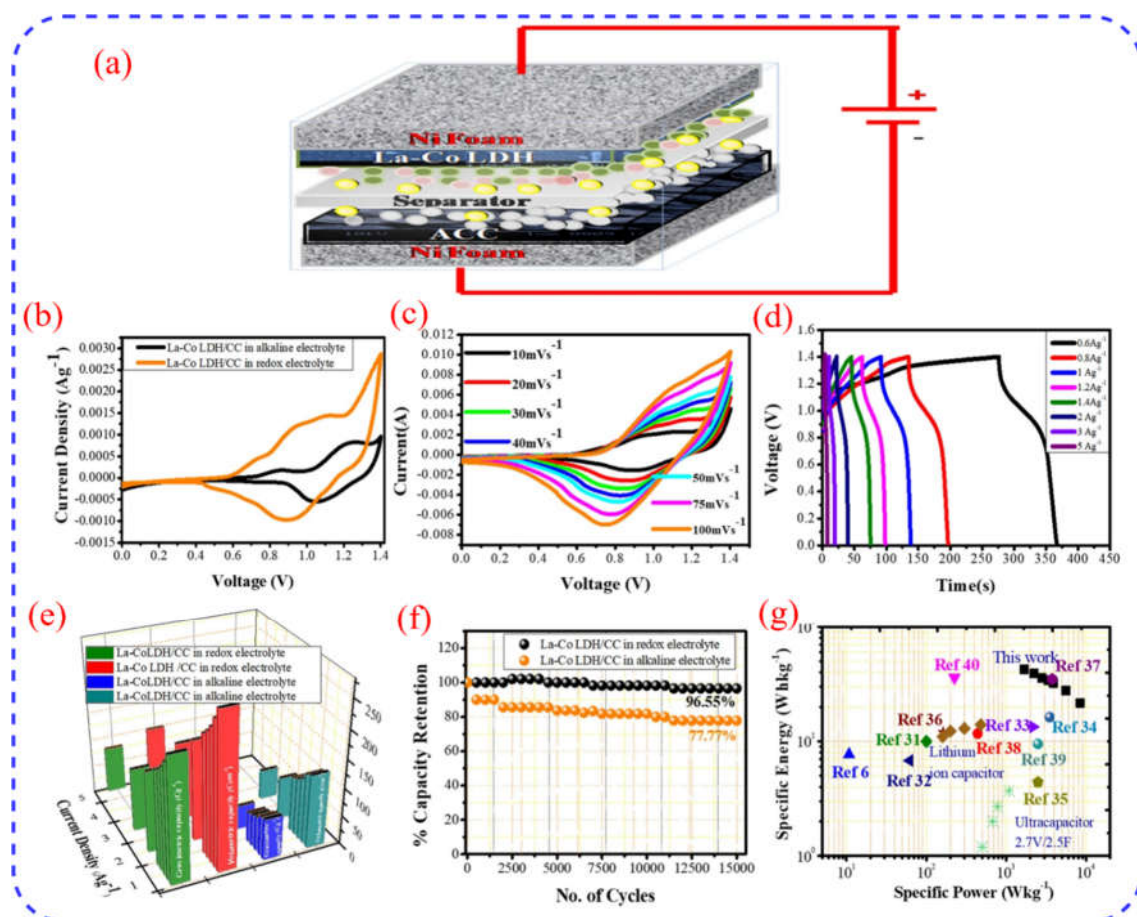


Figure 6. a. A schematic illustration of the fabrication process of two-electrode, b, c. Cyclic voltammetry curves of the compound in alkaline and redox electrolytes, d. GCD curves at varying current densities, e. A comparative Ragone plot volumetric capacity and volumetric of the compound in redox and alkaline electrolyte, f. Retention capacity exhibiting high cyclic stability, g. Comparison studies of specific power and energy of compound (Bailmare et al., 2022) (reproduced with permission as an open-access source).

3.2. Capacitors

Capacitors are devices that generate an electrostatic field to store electrical energy. Two closely spaced metal plates divided by a non-conductive dielectric substance are the fundamental structure of a capacitor. When a voltage source is applied across the metal plates, one plate accumulates electrical charge, while including an opposite charge on the other plate (Su et al., 2020). Various types of capacitors have been developed, each with its unique characteristics and applications. For instance, paper capacitors, which were first introduced in 1876, use wax-impregnated paper as the electric material and aluminum sheets as the electrodes. Silver mica-capacitors, on the other hand, utilize mica as the dielectric material and silver as the electrode material, making them suitable for high-frequency applications. Other types of capacitors include ceramic capacitors, aluminum electrolytic capacitors, film capacitors, glass capacitors, and tantalum capacitors, each with its distinct properties and uses (Han et al., 2019). The size and distance of capacitor conducting plates impact its ability

to store energy. By optimizing these parameters, capacitors can be designed to meet specific energy storage requirements, making them an essential component in a wide range of applications, from power electronic to aerospace engineering (Nishino, 1996).

3.3. Superconducting magnetic energy storage (SMES) system

In 1991, the idea of superconductivity was first put forth, but until 1969 the idea of superconducting magnetic energy storage was first put forth by Ferrier. Ferrier's proposal involved the fabrication of a huge toroidal that could store energy for France every day (Boom & Peterson, 1972). However, the first SMES was developed in 1971 as a result of research done at the university of Wisconsin. A direct current passing through a coil of superconducting material creates a magnetic field that store energy (Torre & Eckroad, n.d.). A cryogenically cooled refrigerator, a control and power conditioning system, and a superconducting coil are the main three components of a system. A refrigeration system is used to cool the superconducting coil to an extremely low temperature to preserve its superconducting condition. The current passing through the superconducting coil rises during the charging phase and decreases during the discharging cycle (Luo et al., 2015). The control and power conditioning system during both charging and discharging cycles, according to output power requirements. This system also facilitates the conversion of AC to DC and vice versa, as needed. Systems exhibit exceptional performance characteristics, making them ideal for power system applications. These characteristics include high power output in megawatts, high efficiency, and rapid response times in milliseconds (Krishan & Suhag, 2019).

Conclusion

This study provides a comparative analysis of these systems, focusing on their design principles, benefits, limitations, and potential roles in modern energy frameworks. Traditional batteries, such as Pb-acid and Ni-Cd, are reliable but constrained by low energy density and short cycle life. Advanced systems like Li-ion and sodium-ion batteries offer higher performance, while next-generation technologies, including metal-air and solid-state batteries, promise enhanced safety, energy density, and longevity. However, high costs, raw material availability, and recycling complexities remain significant challenges. Electrical energy storage systems, including supercapacitors, capacitors, and superconducting magnetic energy storage, provide unparalleled power density and rapid energy discharge, making them essential for instantaneous energy delivery applications. Despite these strengths, their lower energy storage capacity limits their use in large-scale applications compared to batteries. While Electrochemical energy storage systems excel in long-term energy storage, electrical energy storage systems complement them in scenarios demanding high power and quick response.

Acknowledgments

Sharanappa Chapi acknowledges the B.M.S. College of Engineering, Bengaluru for financial support vide Project No. R&D/FRPS/2023-24/PHY/01.

Jyothi A Goudar acknowledges the B.S. Narayan Fellowship for a full-time Ph.D. Research Scholars for financial support [BMSCE/BSNF/R&D/PHY/2023-24/03].

Funding: This work is not funded.

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

References

- Akinyele, D. O., & Rayudu, R. K. (2014). Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, 74–91. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004>
- Alruwashid, F. S., Dar, M. A., Alharthi, N. H., Abdo, H. S., & Almotairy, S. (2021). The synthesis and characterization of graphene-based cobalt ferrite nanocomposite materials and its electrochemical properties. *Applied Nanoscience*, 11(11), 2661–2668. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02243-2>
- Azizi, A., Momen, R., Rezaee, S., Hosseini, M., Heydarian, F., & Pan, A. (2023). Comprehensive scrutiny of surface mechanical parameters of graphyne-based materials for metal-ions and metal-air batteries applications: A perspective and a hybrid atomistic-continuum model. *Journal of Energy Storage*, 74, 109478. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109478>
- Bade, B., Waghmare, A., Hase, Y., Shinde, P., Shah, S., Doiphode, V., Rahane, S., Ladhane, S., Kale, D., Punde, A., Prasad, M., Patole, S. P., & Jadkar, S. (2024). Colloidal hot injection synthesis of Cu₂FeSnS₄ nanoparticles towards an enhanced capacity anode material for Li-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 98, 113126. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113126>
- Bailmare, D. B., Tripathi, P., Deshmukh, A. D., & Gupta, B. K. (2022). Designing of two dimensional lanthanum cobalt hydroxide engineered high performance supercapacitor for longer stability under redox active electrolyte. *Scientific Reports*, 12(1), 3084. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06839-8>
- Bergstrom, S. (1952). Fiftieth Anniversary: Anniversary Issue on Storage Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 99(9), 248C. <https://doi.org/10.1149/1.2779755>
- Blurton, K. F., & Sammells, A. F. (1979). Metal/air batteries: Their status and potential — a review. *Journal of Power Sources*, 4(4), 263–279. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(79\)80001-4](https://doi.org/10.1016/0378-7753(79)80001-4)
- Boom, R., & Peterson, H. (1972). Superconductive energy storage for power systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 8(3), 701–703. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1972.1067425>
- Brodd, R. J. (2012). Nickel-Based Battery Systems. In *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 6938–6950). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_664
- Buchana, P., & Ustun, T. S. (2015). The role of microgrids & renewable energy in addressing Sub-Saharan Africa's current and future energy needs. *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110977>
- Butt, M. K., Rehman, J., Yang, Z., El-marghany, A., Li, Z., & Shibl, M. F. (2024). SiN₃ monolayer: A potential anode material with high storage capacity and hasty diffusion for Li- and Na-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 93, 112290. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112290>
- Chakraborty, M. R., Dawn, S., Saha, P. K., Basu, J. B., & Ustun, T. S. (2022). A Comparative Review on Energy Storage Systems and Their Application in Deregulated Systems. *Batteries*, 8(9), 124. <https://doi.org/10.3390/batteries8090124>
- Chapi, S., Murugendrappa, M. V., Rayar, A., Babaladimath, G., Raghavendra, N., Yazdi, M. K., Ryl, J., & Saeb, M. R. (2024). Enhanced structural, electrical, and electrochemical performance of polyethylene oxides (PEO)-based polymer electrolytes for solid state K⁺ ion batteries. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(20). <https://doi.org/10.1002/app.55390>
- Chawla, N. (2019). Recent advances in air-battery chemistries. *Materials Today Chemistry*, 12, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.03.006>
- Dubey, R., & Guruviah, V. (2019). Review of carbon-based electrode materials for supercapacitor energy storage. *Ionics*, 25(4), 1419–1445. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-02874-0>
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J.-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, 334(6058), 928–935. <https://doi.org/10.1126/science.1212741>
- Galushkin, N. E., Yazvinskaya, N. N., & Galushkin, D. N. (2021). Nickel-cadmium batteries with pocket electrodes as hydrogen energy storage units of high-capacity. *Journal of Energy Storage*, 39, 102597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102597>

- Gao, Y., Pan, Z., Sun, J., Liu, Z., & Wang, J. (2022). High-Energy Batteries: Beyond Lithium-Ion and Their Long Road to Commercialisation. *Nano-Micro Letters*, *14*(1), 94. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00844-2>
- Gómez, E., Pané, S., & Vallés, E. (2005). Magnetic composites CoNi–barium ferrite prepared by electrodeposition. *Electrochemistry Communications*, *7*(12), 1225–1231. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.08.016>
- Goudar, J. A., S. N., T., Chapi, S., M. V., M., Saeb, M. R., & Salami-Kalajahi, M. (2024). Cobalt-Based Materials in Supercapacitors and Batteries: A Review. *Advanced Energy and Sustainability Research*. <https://doi.org/10.1002/aesr.202400271>
- Gür, T. M. (2018). Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science*, *11*(10), 2696–2767. <https://doi.org/10.1039/C8EE01419A>
- Han, D., Zhang, J., Weng, Z., Kong, D., Tao, Y., Ding, F., Ruan, D., & Yang, Q.-H. (2019). Two-dimensional materials for lithium/sodium-ion capacitors. *Materials Today Energy*, *11*, 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.10.013>
- Hossain, E., Faruque, H., Sunny, Md., Mohammad, N., & Nawar, N. (2020). A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects. *Energies*, *13*(14), 3651. <https://doi.org/10.3390/en13143651>
- Hwang, J.-Y., Myung, S.-T., & Sun, Y.-K. (2017). Sodium-ion batteries: present and future. *Chemical Society Reviews*, *46*(12), 3529–3614. <https://doi.org/10.1039/C6CS00776G>
- Kampouris, K. P., Drosou, V., Karytsas, C., & Karagiorgas, M. (2020). Energy storage systems review and case study in the residential sector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *410*(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012033>
- Kandalkar, S. G., Lee, H.-M., Chae, H., & Kim, C.-K. (2011). Structural, morphological, and electrical characteristics of the electrodeposited cobalt oxide electrode for supercapacitor applications. *Materials Research Bulletin*, *46*(1), 48–51. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.09.041>
- Krishan, O., & Suhag, S. (2019). An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *International Journal of Energy Research*, *43*(12), 6171–6210. <https://doi.org/10.1002/er.4285>
- Lavela, P., Leyva, J., Castañeda, A., Tirado, J. L., & Aranda, M. (2024). Structural effects of the iron/manganese ratio in Li-doped layered oxide cathodes for sodium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, *81*, 110451. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110451>
- Li, C., Hu, X., Lou, X., Zhang, L., Wang, Y., Amoureux, J.-P., Shen, M., Chen, Q., & Hu, B. (2016). The organic-moiety-dominated Li⁺ intercalation/deintercalation mechanism of a cobalt-based metal–organic framework. *Journal of Materials Chemistry A*, *4*(41), 16245–16251. <https://doi.org/10.1039/C6TA06413B>
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, *137*, 511–536. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, *15*, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>
- Mishra, R., Tiwari, R. K., Patel, A., Tiwari, A., & Singh, R. K. (2024). A twofold approach for prolonging the lifespan of cobalt-free Na[Ni_{0.55}Mn_{0.35}Fe_{0.1}]O₂ cathode via Bi⁵⁺-doping and Bi₂O₃ coating in sodium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, *77*, 110058. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110058>
- Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*, *1*(3), 166–216. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>
- Moseley, P. T., & Rand, D. A. J. (2015). High-Temperature Sodium Batteries for Energy Storage. In *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing* (pp. 253–268). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62616-5.00015-2>

- Nishino, A. (1996). Capacitors: operating principles, current market and technical trends. *Journal of Power Sources*, 60(2), 137–147. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)80003-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)80003-6)
- Olabi, A. G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Al – Alami, A. H. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214, 118987. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118987>
- Pan, H., Hu, Y.-S., & Chen, L. (2013). Room-temperature stationary sodium-ion batteries for large-scale electric energy storage. *Energy & Environmental Science*, 6(8), 2338. <https://doi.org/10.1039/c3ee40847g>
- Park, M., Zhang, X., Chung, M., Less, G. B., & Sastry, A. M. (2010). A review of conduction phenomena in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 195(24), 7904–7929. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.060>
- Rayar, A., Chapi, S., Murugendrappa, M. V., Babaladimath, G., Harish, K. N., Kakarla, R. R., & Raghu, A. V. (2024). Organic conjugated polymers and their nanostructured composites: Synthesis methodologies and electrochemical applications. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 37, 101102. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101102>
- Reddy, B. S., Premasudha, M., oh, K.-M., Reddy, N. S., Ahn, H.-J., Ahn, J.-H., & Cho, K.-K. (2021). Hydrothermal synthesis of MoS₂/rGO composite as sulfur hosts for room temperature sodium-sulfur batteries and its electrochemical properties. *Journal of Energy Storage*, 39, 102660. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102660>
- Revankar, S. T. (2019). Chemical Energy Storage. In *Storage and Hybridization of Nuclear Energy* (pp. 177–227). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813975-2.00006-5>
- Shen, X., Zhang, X.-Q., Ding, F., Huang, J.-Q., Xu, R., Chen, X., Yan, C., Su, F.-Y., Chen, C.-M., Liu, X., & Zhang, Q. (2021). Advanced Electrode Materials in Lithium Batteries: Retrospect and Prospect. *Energy Material Advances*, 2021. <https://doi.org/10.34133/2021/1205324>
- Su, F., Hou, X., Qin, J., & Wu, Z. (2020). Recent Advances and Challenges of Two-Dimensional Materials for High-Energy and High-Power Lithium-Ion Capacitors. *Batteries & Supercaps*, 3(1), 10–29. <https://doi.org/10.1002/batt.201900153>
- Tapia-Ruiz, N., Armstrong, A. R., Alptekin, H., Amores, M. A., Au, H., Barker, J., Boston, R., Brant, W. R., Brittain, J. M., Chen, Y., Chhowalla, M., Choi, Y.-S., Costa, S. I. R., Crespo Ribadeneyra, M., Cussen, S. A., Cussen, E. J., David, W. I. F., Desai, A. V., Dickson, S. A. M., Younesi, R. (2021). 2021 roadmap for sodium-ion batteries. *Journal of Physics: Energy*, 3(3), 031503. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ac01ef>
- Torre, W. V., & Eckroad, S. (n.d.). Improving power delivery through the application of superconducting magnetic energy storage (SMES). *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, 81–87. <https://doi.org/10.1109/PESW.2001.916869>
- Yabuuchi, N., Kubota, K., Dahbi, M., & Komaba, S. (2014). Research Development on Sodium-Ion Batteries. *Chemical Reviews*, 114(23), 11636–11682. <https://doi.org/10.1021/cr500192f>
- Yang, Y., He, Y., Huang, H., & Guo, Z. (2022). Construction of conductive oxide layer on the surface of lead alloy grid for the long life of lead acid batteries. *Journal of Energy Storage*, 52, 104877. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104877>
- Yousaf, M., Rasheed, A., Farid, A., Khan, I. A., Ghanem, M. A., & Marken, F. (2024). Electrochemical properties of binder-free micro-blocks/sheets-based cadmium-nickel-sulfide electrode materials for portable energy storage applications. *Journal of Energy Storage*, 99, 113416. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113416>
- Yousry, S. M., El-Hallag, I. S., Kumar, R., Kawamura, G., Matsuda, A., & El-Nahass, M. N. (2020). Synthesis of mesoporous Co(OH)₂ nanostructure film via electrochemical deposition using lyotropic liquid crystal template as improved electrode materials for supercapacitors application. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 857, 113728. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113728>
- Zhang, C., Bhoiyate, S., Zhao, C., Kahol, P. K., Kostoglou, N., Mitterer, C., Hinder, S. J., Baker, M. A., Constantinides, G., Polychronopoulou, K., Rebholz, C., & Gupta, R. K. (2019). Electrodeposited Nanostructured CoFe₂O₄ for Overall Water Splitting and Supercapacitor Applications. *Catalysts*, 9(2), 176. <https://doi.org/10.3390/catal9020176>

Zhang, C., Wei, Y.-L., Cao, P.-F., & Lin, M.-C. (2018). Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3091–3106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.030>

Zhang, P., Jiang, L., Jiang, X., Zhao, X., & Wu, J. (2024). Enhancement of sodium-sulfur battery's performance through transition metal single-atom catalysts on β_{12} borophene substrate: First-principles calculations. *Journal of Energy Storage*, 88, 111528. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111528>

Zhang, X., Chen, W., Yang, L., Wang, J., Sun, X., Zhao, Y., Liu, Y., Qi, P., Jiang, M., & Xiong, Y. (2024). PEDOT-coated rice husk-based activated carbon: Boosting lead-acid battery performance. *Journal of Energy Storage*, 90, 111771. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111771>

Zhang, Y., Zhou, C., Yang, J., Xue, S., Gao, H., Yan, X., Huo, Q., Wang, S., Cao, Y., Yan, J., Gao, K., & Wang, L. (2022). Advances and challenges in improvement of the electrochemical performance for lead-acid batteries: A comprehensive review. *Journal of Power Sources*, 520, 230800. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230800>

Zheng, F., Kotobuki, M., Song, S., Lai, M. O., & Lu, L. (2018). Review on solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 389, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.022>

Zhong, J.-H., Wang, A.-L., Li, G.-R., Wang, J.-W., Ou, Y.-N., & Tong, Y.-X. (2012). $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Ni}(\text{OH})_2$ composite mesoporous nanosheet networks as a promising electrode for supercapacitor applications. *Journal of Materials Chemistry*, 22(12), 5656. <https://doi.org/10.1039/c2jm15863a>

PHONON CONTRIBUTION TO INTERNAL ENERGY, THERMAL EXPANSION COEFFICIENT AND GRÜNEISEN PARAMETER OF CUBIC BORON NITRIDE**Abdelfateh BENMAKHLOUF**

Laboratory of Materials and Electronic Systems (LMSE), University Mohamed El Bachir El Ibra-himi of Bordj Bou Arreridj, 34000 Bordj Bou Arreridj, Algeria.

Rabie MEZOUAR

Institute of Optics and Precision Mechanics, Ferhat Abbas Setif University, Setif, 19000, Algeria.

Laboratory of Materials and Electronic Systems (LMSE), University Mohamed El Bachir El Ibra-himi of Bordj Bou Arreridj, 34000 Bordj Bou Arreridj, Algeria.

Abstract

The variation in the non-static contributions to the internal energy, Grüneisen parameter, pressure derivative of the isothermal bulk modulus, and volumetric thermal expansion coefficient of cubic zinc-blende boron nitride (c-BN) were calculated as a function of temperature and pressure, with temperature ranging from 0 to 1000 K and pressure from 0 to 100 GPa, using the quasi-harmonic Debye model. Our results indicated that the phonon contribution to the internal energy increases with both pressure and temperature. Additionally, the Grüneisen parameter and the volumetric thermal expansion coefficient decrease with increasing pressure while they both increase with increasing temperature. Similar trends were observed in the literature for semiconducting compounds InX (X = P, As, Sb). At zero pressure and T = 300 K, the Grüneisen parameter for c-BN is 1.87, and the linear thermal expansion coefficient is $4.47 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Keywords: Boron nitride; Thermal expansion coefficient; Internal energy; Quasi-harmonic Debye model; High Temperature.

Introduction

III-V nitrided binary compounds attract much attention. They were used in the fabrication and elaboration of electronic devices such as in blue light-emitting diodes, and in semiconductor optical devices (Saib & Bouarissa, 2009). Among these compounds, boron nitride, isoelectronic with carbon that has attracted significant attention (Daoud & Bioud, 2014; Ustundag et al., 2014; Daoud et al., 2012). This is primarily because of its beneficial physical properties, including high melting points, exceptional hardness, and remarkable dielectric and thermal characteristics (Saib & Bouarissa, 2009).

Yadav and Pandey (Yadav & Pandey, 2019) investigated theoretically the elastic constants at room temperature and under various pressures of wurtzite boron nitride (w-BN) using the many-body interaction potential model. Employing molecular dynamics calculations, Moon *et al.* (Moon et al., 2003) examined the Debye temperature, bulk properties, thermal expansion coefficient, elastic constants, and specific heat of cubic boron nitride (c-BN), while Nico de Koker (Nico de Koker, 2012) evaluated the thermodynamic properties of cubic zincblende solid phase and liquid boron nitride under extreme conditions of temperatures and pressures. They have computed the melting curve up to 1 TPa by integrating the Clapeyron equation.

In this study, we investigated the impact of pressure and temperature on the Grüneisen parameter, non-static contributions to the internal energy and volumetric thermal expansion coefficient of boron nitride in the cubic zincblende phase applying the quasi-harmonic Debye model.

2. Method of Calculation

To assess the specific behavior of c-BN semiconducting compound in response to both temperature and hydrostatic compression, we applied the quasi-harmonic Debye model (QHDM), as implemented in the Gibbs program (Blanco et al., 2004; Otero-de-la-Roza et al., 2011). The E-V data used in this study were taken from

Ref. (Daoud et al., 2012). We investigated the volumetric thermal expansion coefficient, non-static contributions to the internal energy and Grüneisen parameter of the c-BN compound across a pressure varied from 0 to 100 GPa and a temperature varied from 0 to 1000 K.

3. Results and discussion

3.1. Phonon contribution to internal energy

Based on standard thermodynamic relations, the non-equilibrium Gibbs free energy can be expressed as (Blanco et al., 2004; Otero-de-la-Roza et al., 2011):

$$G^*(V; p, T) = E(V) + pV + F_{\text{vib}}(V; T) \quad (1)$$

The pressure (p), volume (V), temperature (T), static energy ($E(V)$), and vibrational Helmholtz free energy (F_{vib}) are all components involved in the expression.

The non-static contribution to the internal energy, U_{Esta} , is primarily governed by the vibrational contribution U_{vib} (Blanco et al., 2004; Otero-de-la-Roza et al., 2011). Figures 1 and 2 illustrate the change in the non-static component of the internal energy, U_{Esta} , as a function of compression at 0, 300, 600, 800 and 1000 K, and as a function of temperature at 0, 20, 50, and 100 GPa for the c-BN compound. Notably, at $T = 1000$ K, U_{Esta} remains nearly constant as pressure increases from 0 to 100 GPa. Therefore, at high fixed temperatures, the impact of pressure on U_{Esta} is minimal.

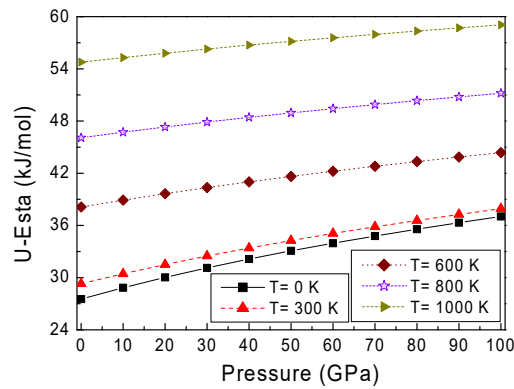


Figure 1. Plot of the phonon contribution to the internal energy (U_{Esta}) as a function of pressure for c-BN at temperatures 0, 300, 600, 800 and 1000 K.

From Fig. 2, it can be observed that temperature enlarges the U_{Esta} . The effect of the temperature T on U_{Esta} is very small at low temperature ($T < \sim 200$ K), but for $T > 200$ K, the effect is increasingly obvious as the temperature rises. In high-temperature region, U_{Esta} changes slowly with increasing pressure. Similar qualitative behavior of U_{Esta} versus temperature has been reported for InX ($X = \text{P, As, Sb}$) compounds (Hou & Kong, 2011).

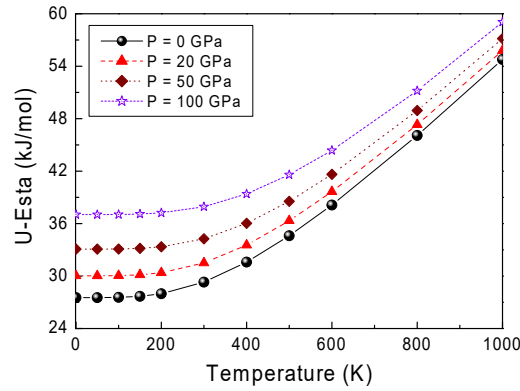


Figure 2. Phonon contribution to internal U_{ESta} energy vs temperature for c-BN at pressures 0, 20, 50 and 100 GPa.

3.2. Grüneisen parameter

The Grüneisen parameter γ is an important parameter of material. It aids in understanding the frequency distribution of the phonon spectrum in solids (Bioud & Benchiheub, 2024). The Grüneisen parameter γ for c-BN is shown as a function of hydrostatic compression at 0, 300, 600, 800 and 1000 K in Fig. 3, and as a function of temperature at different pressures (0, 20, 50, and 100 GPa) in Fig. 4.

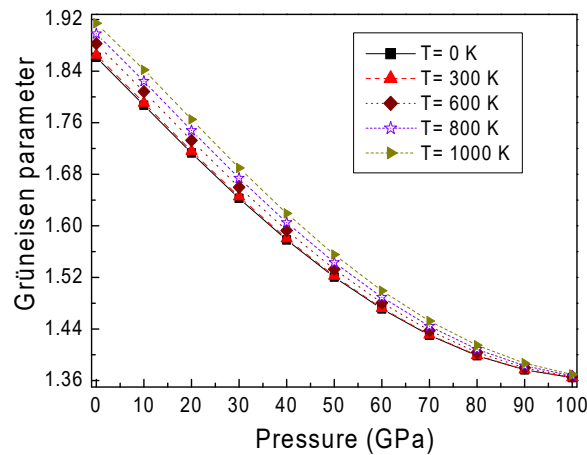


Figure 3. Plot between Grüneisen parameter γ and pressure for c-BN at various temperatures.

It can be observed that γ decreases as hydrostatic compression increases. The same behavior of the Grüneisen parameter γ under pressure was also observed in several materials, such as for semiconducting cadmium oxide (CdO) (Bioud & Benchiheub, 2024), for CdSe and ZnS binary compounds (Amari et al., 2023) and for Cd_{0.75}Cr_{0.25}Se and Zn_{0.75}Cr_{0.25}S ternary alloys (Amari et al., 2023). At $p = 0$ and $T = 0$ K, our value of γ for c-BN is around 1.87, while at $p = 0$ and $T = 1000$ K, the Grüneisen parameter γ reaches the value 1.91. It is important to note that an opposite behavior (γ_a increases with increasing pressure) has been reported for the acoustic Grüneisen parameter γ_a in molybdenum carbide (MoC) in both hexagonal and rock-salt phases and chromium carbide (CrC) materials (Ferahtia et al., 2022).

From fig. 4, we can observe that the temperature increased slowly γ . At pressures of 50 and 100 GPa, γ is almost unchangeable with the rise in temperature. A similar behavior for γ with respect to temperature T was also observed for the cubic zinc-blende phase of Ge_{0.5}Sn_{0.5}, within a pressure range from 0 to 9 GPa and a temperature range from 0 to 1200 K, respectively (Zhang et al., 2012).

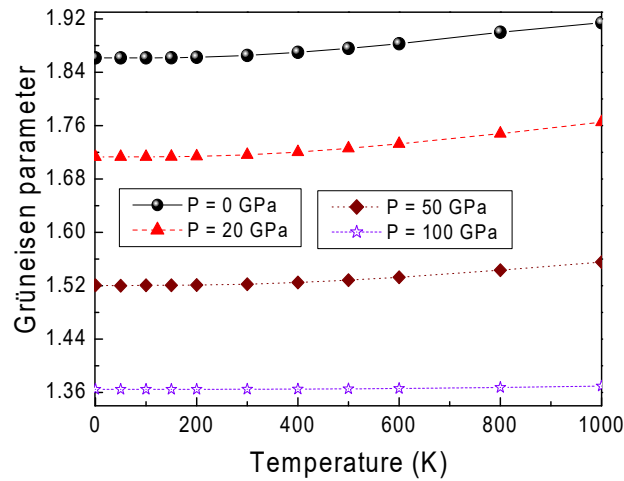


Figure 4. Grüneisen parameter γ vs temperature for c-BN at 0, 20, 50 and 100 GPa.

3.3. Pressure derivative of the bulk modulus

Figure 5 shows the variation of $B_T'(p)$ with pressure at 0, 300, 600, 800 and 1000 K for the c-BN compound. It can be observed that $B_T'(p)$ decreases as pressure increases, while it increases with rising temperature.

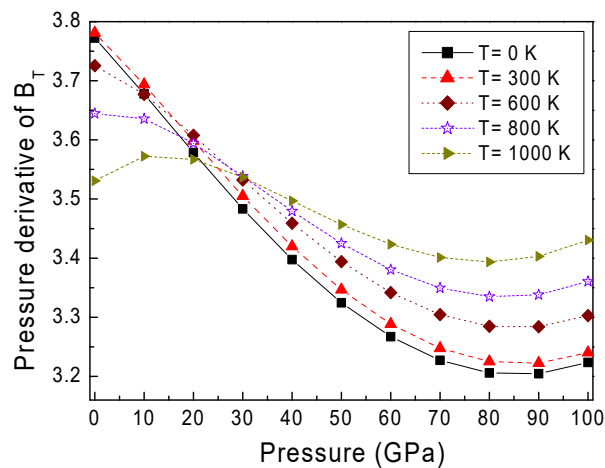


Figure 5. Plot between B_T' and pressure for c-BN at various temperatures.

We notice that for all temperatures B_T' decreases as pressure increases, following a similar trend but at slightly different rates depending on the temperature, at higher pressure (> 50 GPa), B_T' stabilizes and becomes nearly constant for all temperatures. For example, at 0K, B_T' starts from the highest value (3.75) at low pressures (0-10GPa), it decreases rapidly with increasing pressure up to 50 GPa where it reaches a plateau around 3.3. A decrease in B_T' with pressure implies that c-BN becomes increasingly less compressible at high pressure.

3.4. Volumetric thermal expansion coefficient

If when only one parameter (temperature or pressure) is varied, the expansion coefficient α measures the relative increase in the volume of a system (Ferahtia et al., 2022). The variation of the volumetric thermal expansion coefficient (α) with pressure at different temperatures (100, 300, 500, 800, and 1000 K) and with temperature at different pressures for the c-BN compound are shown in Figs. 6 and 7, respectively.

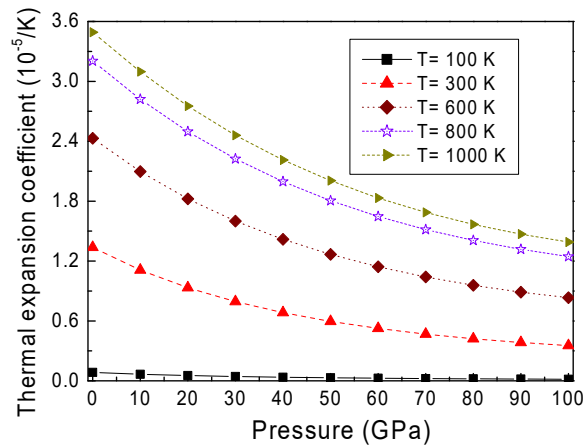


Figure 6. Plot between volumetric thermal expansion coefficient α and pressure for c-BN at various temperatures.

We find that the pressure decreased the volumetric thermal expansion coefficient α , it decreases non-linearly with increasing pressure. The decline is steep at lower pressure (0-50 GPa) and flattens at higher pressures (> 50 GPa).

Higher temperatures enhance the thermal expansion coefficient significantly, as increased thermal vibrations lead to greater lattice expansion, this effect diminishes as pressure increases, indicates that c-BN becomes less susceptible to thermal expansion under high pressure conditions. We note that the same behavior for α under temperature was also observed in several materials, for example, in the ordered $\text{Ge}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ cubic alloy in the zinc-blende phase (Zhang et al., 2012), in the MgCu intermetallic compound (Daoud et al., 2019), and in the new d^0 CsCaX (X = Ge, Sn, and Pb) half-Heusler alloys (Bendahma et al., 2022).

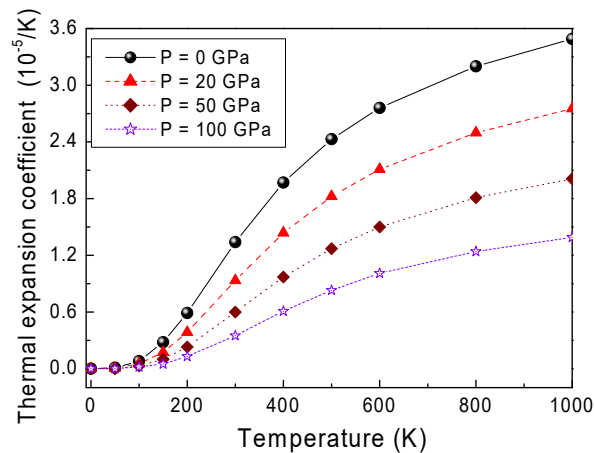


Figure 7. Volumetric thermal expansion coefficient α vs temperature T for c-BN at 0, 20, 50 and 100 GPa.

Although our calculated linear thermal expansion coefficient ($4.47 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) at zero-pressure and 300 K exceeds the experimental value ($1.15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) reported by Adachi (Adachi, 2004), it remains higher the theoretical values ($6.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) and ($6.17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) reported by Kumar *et al.* (Kumar & Sastry, 2001) and Moon et al (Moon et al., 2003), respectively. We therefore conclude that the QHDM (Blanco et al., 2004; Otero-de-la-Roza et al., 2011) gives reasonable predictions of several thermodynamic parameters, but tends to overestimate both Grüneisen parameter and volumetric thermal expansion coefficient in c-BN semiconductor.

4. Conclusion

Under the quasi-harmonic assumption, in which the frequency modes are considered to be independent of temperature, the quasi-harmonic method has been applied to determine the pressure and temperature dependence of the pressure derivative of the isothermal bulk modulus, the non-static component of the internal energy, the Grüneisen parameter and the volumetric thermal expansion coefficient for cubic boron nitride (c-BN) semiconductor. Our results show that both the Grüneisen parameter and volumetric thermal expansion coefficient of c-BN decrease with rising pressure, and increase with increasing temperature in the range from 0 to 1000 K. It is worth mentioning that similar behaviors under pressure and temperature have also been observed in other materials from the literature.



References

- Adachi, S. (2004). Handbook on Physical Properties of Semiconductors, Vol. 2, Kluwer Academic Publishers, Boston 2004.
- Amari, S., Daoud, S. & Rekab-Djabri, H. (2023). Structural, thermodynamic and magneto-electronic properties of $\text{Cd}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}\text{Se}$ and $\text{Zn}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}\text{S}$: An ab-initio study, *Acta Phys. Pol. A*, Vol. 143, No. 1, 36–46. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.143.36>
- Bendahma, F., Mana, M., Hammou, M., Terkhi, S., Benderdouche, N. & Bentata, S. (2022). Half-metallic and thermodynamic properties of new d^0 CsCaZ (Z= Ge, Sn and Pb) half Heusler alloys: A spin-based devices vision for the future, *Rev. Mex. Fis.*, Vol. 68, 061004. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.68.061004>
- Bioud, N. & Benchiheub, N. (2024). Mechanical and thermal behavior of semiconducting cadmium oxide at high pressure, *Annals of West University of Timisoara-Physics*, Vol. 66, 142–156. <https://doi.org/10.2478/awutp-2024-0009>
- Blanco, M. A., Francisco, E. & Luaña, V. (2004). GIBBS: Isothermal-isobaric thermodynamics of solids from energy curves using a quasi-harmonic Debye model, *Comput. Phys. Commun.*, Vol.158, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.comphy.2003.12.001>
- Daoud, S., Loucif, K., Bioud, N. & Lebga, N. (2012). First-principles study of structural, elastic and mechanical properties of zinc-blende boron nitride (B3-BN), *Acta Phys. Pol. A*, Vol. 122, No. 1, 109-115. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.122.109>
- Daoud, S. & Bioud, N. (2014). Anisotropy and pressure effect on the elastic and mechanical properties of (B3) BN, *Ukr. J. Phys.*, Vol. 59, No. 4, 418 – 425. <https://doi.org/10.15407/ujpe59.04.0418>
- Daoud, S., Bioud, N. & Saini, P. K. (2019). Finite temperature thermophysical properties of MgCu intermetallic compound from quasi-harmonic Debye model, *J. Magnes. Alloys*, Vol. 7, No. 2, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.01.006>
- Ferahtia, S., Saib, S. & Bouarissa, N. (2022). Theoretical investigation of compressed hexagonal and rock-salt structures of molybdenum and chromium carbides, *Mater. Today Commun.*, Vol. 33, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104334>
- Hou, H. J. & Kong, F. J. (2011). Theoretical investigation on the structural, dynamical, and thermodynamic properties of the zinc-blende InX (X=P, As, Sb), *Phys. Status Solidi B* 248, No. 6, 1399–1404. <https://doi.org/10.1002/pssb.201046479>
- Kumar, V. & Sastry, B. S. R. (2001). Thermal expansion coefficient of binary semiconductors, *Cryst. Res. Technol.*, Vol. 36, No. 6, pp. 565–569. [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200107\)36:6<565::AID-CRAT565>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200107)36:6<565::AID-CRAT565>3.0.CO;2-F)
- Moon, W. H., Son, M. S. & Hwang, H. J. (2003). Molecular-dynamics simulation of structural properties of cubic boron nitride, *Physica B*, Vol. 336, 329–334. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(03\)00299-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00299-0)
- Nico de Koker. (2012). Melting of cubic boron nitride at extreme pressures, *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 24, 055401. <http://iopscience.iop.org/0953-8984/24/5/055401>

- Otero-de-la-Roza, A., Luaña, V. (2011). GIBBS 2: A new version of the quasiharmonic model code. II. Models for solid-state thermodynamics, features and implementation, *Comput. Phys. Commun.*, Vol.182, 2232–2248. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.05.009>
- Saib, S. & Bouarissa, N. (2009). Ab initio study of boron nitride at high pressures, *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 18, 1200–1204. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.04.001>
- Ustundag, M., Aslan, M., & Battal G. Yalcin. (2014). The first-principles study on physical properties and phase stability of Boron-V (BN, BP, BAs, BSb and BBi) compounds, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 81, 471–477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.08.056>
- Yadav, C. P. & Pandey, D. K. (2019). Pressure- and orientation-dependent elastic and ultrasonic characterisation of wurtzite boron nitride, *Pramana – J. Phys.*, Vol. 92, No. 1, 5. <https://doi.org/10.1007/s12043-018-1666-2>
- Zhang, X. D., Ying, C. H., Quan, S. Y., & Li. Z. J. (2012). Ab initio study of the structural, phonon, elastic and thermodynamic properties of the ordered Ge_{0.5}Sn_{0.5} cubic alloy under high pressure, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 58, 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.004>

CARBON FARMING AS A TOOL FOR CLIMATE RESILIENCE IN SMALLHOLDER AGRICULTURE**Sadiq, M.S¹., Singh, I.P²., and Ahmad, M.M³**¹Department of Agricultural Economics and Agribusiness, FUD, Dutse, Nigeria²Department of Agricultural Economics, SKRAU, Bikaner, India³Department of Agricultural Economics and Extension, BUK, Kano, Nigeria

Author's correspondence address: Sadiq, Mohammed Sanusi, Department of Agricultural Economics and Agribusiness, FUD, P.M.B. 7156, Dutse, Nigeria

0000-0003-4336-5723^{a*},  0000-0002-1886-5956^b,  0000-0003-4565-0683^c**Abstract**

Climate change presents significant challenges to smallholder farmers, whose livelihoods heavily depend on weather patterns and ecosystem stability. Carbon farming, which involves agricultural practices that sequester carbon dioxide (CO₂) in soil and vegetation, has emerged as a viable tool for enhancing climate resilience in smallholder agriculture. This review explores the potential of carbon farming as a multifaceted solution to mitigate climate change impacts, improve soil health, and bolster food security. Drawing on theoretical and conceptual frameworks, it examines evidence from empirical studies, highlights key challenges, and proposes actionable recommendations for integrating carbon farming into smallholder systems. The findings suggest that carbon farming not only contributes to climate mitigation but also fosters adaptive capacities, improving long-term resilience.

Keywords: Carbon farming; Climate; GHG emission; Resilience; Smallholder**Introduction**

Smallholder agriculture underpins the livelihoods of millions globally, especially in the developing world, where it plays a critical role in providing food security, employment, and economic sustenance. According to the Food and Agriculture Organization (FAO, 2021), smallholders contribute up to 70% of the global food supply, making their resilience vital to global food systems. However, smallholder farmers are increasingly vulnerable to the multifaceted impacts of climate change. These impacts include erratic rainfall patterns, prolonged droughts, extreme weather events, rising temperatures, and declining soil fertility, which exacerbate food insecurity and economic instability.

The **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022)** highlights that agriculture is responsible for approximately 23% of global greenhouse gas (GHG) emissions, primarily due to methane emissions from livestock, nitrous oxide from fertilizers, and carbon dioxide from deforestation and land-use changes. Paradoxically, agriculture also presents significant opportunities for climate mitigation through carbon sequestration and climate-smart practices, making it a potential ally in global efforts to combat climate change.

Carbon farming is gaining attention as an integrated approach that combines climate-smart agriculture with regenerative practices to promote sustainable land management. It involves practices such as agroforestry, cover cropping, reduced or no-tillage farming, compost application, crop rotation, and enhanced grazing management. These techniques offer a dual benefit by sequestering atmospheric carbon into soils and vegetation while simultaneously improving soil organic matter, water retention capacity, and biodiversity. This can lead to more resilient agroecosystems capable of withstanding climate shocks. Furthermore, carbon farming can enhance productivity, reduce dependency on synthetic inputs, and contribute to long-term soil fertility, making it economically and ecologically viable for smallholder systems.

Beyond the environmental benefits, carbon farming holds significant potential for socio-economic upliftment. For smallholder farmers, adopting carbon farming practices can unlock new revenue streams through carbon credit markets. These markets enable farmers to monetize the carbon sequestered in their soils, creating

financial incentives for sustainable farming. However, barriers such as high upfront costs, limited access to technology and knowledge, inadequate institutional support, and unclear property rights often hinder widespread adoption.

This paper systematically reviews the application of carbon farming in smallholder systems, exploring its theoretical underpinnings, real-world evidence, and practical feasibility. By critically evaluating case studies and field evidence, it provides insights into the transformative potential of carbon farming as a tool for climate resilience and sustainable development. This review also identifies challenges and policy gaps, offering actionable recommendations to scale up carbon farming in smallholder agriculture worldwide.

Theoretical Framework

The theoretical foundation of carbon farming is deeply rooted in **ecological resilience theory** and the scientific understanding of **carbon sequestration dynamics**, integrating ecological, biochemical, and agronomic principles to address the challenges of climate change and agroecosystem sustainability.

1. Ecological Resilience Theory

Resilience theory, as proposed by Holling (1973), defines the capacity of an ecosystem to absorb disturbances while reorganizing and adapting to changes without collapsing into qualitatively different states. This theory is particularly relevant to smallholder agricultural systems, which face constant pressures from climatic variability, resource degradation, and socio-economic challenges.

Carbon farming exemplifies ecological resilience through practices that enhance **soil organic matter (SOM)**, improve biological diversity, and promote agroecosystem stability. For instance:

- **Soil Organic Matter (SOM):** SOM acts as a buffer against environmental stresses such as drought, erosion, and nutrient loss. Increased SOM enhances water retention, provides essential nutrients, and improves soil structure, enabling crops to withstand climatic extremes.
- **Biodiversity:** Agroforestry, intercropping, and cover cropping enhance both above-ground and below-ground biodiversity. This diversity promotes beneficial soil microbes, pest suppression, and pollinator activity, further stabilizing yields under fluctuating environmental conditions.
- **System Adaptability:** Resilience in carbon farming also extends to its ability to reduce dependency on synthetic inputs and foster adaptive capacity. By relying on nature-based solutions, such systems are more responsive to long-term climatic shifts and less vulnerable to market or policy disruptions.

Walker *et al.* (2004) expanded on Holling's concept by introducing the idea of **adaptive cycles**, emphasizing the importance of transformation in socio-ecological systems. Carbon farming aligns with this perspective by fostering innovation in sustainable land-use practices that not only recover from environmental stresses but build the capacity to thrive under new conditions.

2. Carbon Sequestration Dynamics

Carbon sequestration in agricultural systems occurs through two primary mechanisms: **biological sequestration** and **soil carbon sequestration**. These processes underpin the potential of carbon farming to mitigate climate change while enhancing soil health.

Biological Sequestration

Plants absorb atmospheric CO₂ via photosynthesis, converting it into organic carbon stored in biomass (roots, stems, and leaves) and subsequently transferred to the soil. This process is central to carbon farming practices such as:

- **Agroforestry:** Trees integrated with crops sequester carbon in their woody biomass while contributing organic matter to the soil through leaf litter and root turnover.
- **Cover Cropping:** Fast-growing cover crops capture CO₂ efficiently and transfer carbon to the soil as they decompose.

Soil Carbon Sequestration

The process of soil carbon sequestration involves the stabilization of organic carbon in the soil, driven by microbial activity, soil structure, and management practices. Lal (2004) emphasized the role of **soil organic carbon (SOC)** as a cornerstone of sustainable agriculture. Key benefits of SOC include:

- **Water Retention and Infiltration:** SOC improves soil porosity, allowing better water infiltration and retention, which is crucial for drought-prone regions.
- **Nutrient Cycling:** SOC serves as a reservoir of essential nutrients, supporting plant growth and microbial activity.
- **Microbial Activity:** Carbon-rich soils foster diverse microbial communities that enhance nutrient availability and suppress pathogens.

The capacity of soils to sequester carbon is influenced by factors such as climate, soil type, and management practices. Lal (2004) estimated that restoring degraded soils through carbon farming could offset a significant portion of global CO₂ emissions, with sequestration rates ranging from 0.1 to 1.0 Mg C ha⁻¹ year⁻¹, depending on the intervention.

Interlinking Resilience and Sequestration

The synergy between ecological resilience and carbon sequestration underpins the effectiveness of carbon farming. Practices like reduced tillage minimize soil disturbance, preserving carbon stores while reducing erosion. Compost application not only increases SOC but also improves soil buffering capacity, making systems more resilient to environmental stresses.

By coupling **resilience-building practices** with **carbon capture mechanisms**, carbon farming creates a self-reinforcing system that mitigates emissions while adapting to climate impacts. This theoretical framework provides a foundation for understanding the multifaceted benefits of carbon farming and its role in promoting sustainable smallholder agriculture.

Conceptual Framework

General

The conceptual framework positions **carbon farming** as a transformative strategy within smallholder agriculture, addressing environmental, economic, and social dimensions to enhance climate resilience and sustainability. This integrative model highlights the interconnected benefits and challenges of carbon farming, offering a holistic perspective for its adoption in smallholder contexts.

1. Environmental Resilience

Carbon farming plays a pivotal role in fostering environmental resilience by improving ecosystem functions, reducing environmental degradation, and enhancing the adaptive capacity of smallholder systems. Key elements include:

- **Soil Organic Carbon (SOC) Enhancement:** Carbon farming practices, such as reduced tillage, compost application, and agroforestry, significantly increases SOC levels. Improved SOC leads to enhanced soil structure, better water retention, and nutrient availability, contributing to sustainable crop productivity.
- **Erosion Mitigation:** Techniques like cover cropping and contour farming reduce soil erosion by stabilizing soil and promoting water infiltration. These practices are particularly critical for sloped and degraded lands common in smallholder systems.
- **Biodiversity Promotion:** Carbon farming supports biodiversity both above and below ground. Intercropping and agroforestry create diverse habitats, fostering pollinators and beneficial organisms, while increasing microbial diversity improves soil health and resilience to pests and diseases.
- **Climate Mitigation:** By sequestering atmospheric CO₂ in soil and biomass, carbon farming offsets greenhouse gas emissions and contributes to climate change mitigation.

2. Economic Viability

The economic dimension of carbon farming focuses on enhancing the livelihoods of smallholder farmers by ensuring financial sustainability and reducing economic vulnerabilities.

- **Increased Yields:** Improved soil health and water retention from carbon farming lead to higher and more stable crop yields, even under erratic climatic conditions.
- **Diversified Income Streams:** Practices like agroforestry and rotational grazing enable smallholders to diversify their income through the production of high-value crops, timber, fruits, fodder, and livestock products.
- **Reduced Input Costs:** By enhancing natural fertility and pest control, carbon farming reduces reliance on synthetic fertilizers and pesticides, lowering production costs.
- **Access to Carbon Markets:** Smallholders can monetize the carbon sequestered in their lands by participating in carbon credit programs. These markets offer financial incentives for adopting sustainable practices, though barriers such as certification costs and market access remain significant challenges.

3. Social Inclusivity

The social inclusivity dimension emphasizes empowering marginalized communities, particularly women, youth, and indigenous groups, in adopting and benefiting from carbon farming practices.

- **Participatory Approaches:** Engaging farmers in the design and implementation of carbon farming initiatives ensures that practices align with local needs and cultural contexts. Participatory approaches also foster community ownership and collaboration, which are crucial for long-term sustainability.
- **Knowledge Sharing:** Capacity-building programs, farmer field schools, and peer-to-peer learning platforms disseminate knowledge about carbon farming techniques, enabling widespread adoption and innovation.
- **Empowering Marginalized Groups:** Carbon farming initiatives can provide targeted support to marginalized groups by improving their access to resources, credit, and training. Women, who often play central roles in smallholder farming, can benefit significantly from the additional income and food security that carbon farming offers.
- **Improved Food Security:** By stabilizing yields and diversifying food production, carbon farming enhances household food security, particularly in regions prone to climatic shocks.

Integrative Model

This conceptual framework underscores the interplay between **environmental, economic, and social dimensions** of carbon farming:

- **Environmental Resilience** supports economic viability by ensuring sustainable resource use and productivity.
- **Economic Viability** reinforces social inclusivity by providing financial resources and opportunities for marginalized groups.
- **Social Inclusivity** strengthens environmental resilience through collective action and community-driven approaches that prioritize sustainable practices.

Together, these dimensions create a reinforcing cycle of benefits, highlighting carbon farming as a powerful strategy for smallholder systems. However, the framework also recognizes challenges such as high upfront costs, limited technical expertise, land tenure issues, and the need for enabling policies. Addressing these barriers is critical for scaling up carbon farming and maximizing its potential in smallholder agriculture.

This integrative model provides a comprehensive lens to explore the potential and challenges of carbon farming within smallholder systems, offering a roadmap for research, policy, and practice.

Specific

This conceptual framework situates **carbon farming** within the overarching paradigm of **climate-resilient agriculture**, emphasizing its role as a multifaceted strategy to enhance environmental, economic, and social

sustainability. The framework illustrates how carbon farming practices contribute to ecological processes and deliver measurable outcomes and impacts, ultimately driving adaptive capacity and resilience in smallholder agricultural systems.

1. Inputs: Carbon Farming Practices

The foundation of carbon farming lies in the application of sustainable and regenerative agricultural practices. These practices are tailored to local contexts and leverage natural processes to enhance productivity and resilience. Key inputs include:

- **Agroforestry:** The integration of trees and shrubs with crops or livestock improves carbon storage, provides shade, and diversifies income sources.
- **Cover Crops:** Planting legumes or grasses during fallow periods enhances soil cover, reduces erosion, and increases soil organic matter.
- **Reduced Tillage:** Minimizing soil disturbance prevents carbon loss, conserves moisture, and preserves soil structure.
- **Compost and Organic Amendments:** Adding organic materials enhances soil fertility, supports microbial activity, and boosts soil carbon levels.
- **Rotational and Enhanced Grazing:** Carefully managed grazing cycles improve pasture health, reduce overgrazing, and enhance carbon storage in grasslands.
- **Crop Diversification:** Incorporating a variety of crops promotes resilience to pests and climatic shocks while supporting soil health.

2. Processes: Ecological and Biogeochemical Mechanisms

Carbon farming catalyzes several critical ecological and biogeochemical processes, leading to environmental benefits that underpin climate resilience:

- **Carbon Sequestration:** Atmospheric CO₂ is captured through photosynthesis and stored in biomass (roots, stems, leaves) and soil as organic carbon. Agroforestry, for instance, sequesters carbon in woody biomass, while cover crops transfer carbon into the soil.
- **Soil Regeneration:** Enhanced organic matter fosters microbial activity, nutrient cycling, and soil structure, making soils more fertile and resilient to degradation.
- **Biodiversity Enhancement:** Practices like intercropping and agroforestry promote diverse habitats, supporting beneficial organisms that improve ecosystem services such as pollination, pest control, and nutrient cycling.
- **Water Regulation:** Improved soil structure and organic matter increase water infiltration and retention, reducing water stress and preventing runoff and erosion.

3. Outcomes: Tangible Benefits of Carbon Farming

The processes initiated by carbon farming practices yield tangible outcomes that address key challenges faced by smallholder farmers. These include:

- **Reduced Emissions:** By sequestering carbon and minimizing practices that release GHGs, carbon farming mitigates climate change. Methane emissions from livestock can be reduced through improved grazing management, while nitrous oxide emissions decrease with organic fertilization techniques.
- **Enhanced Soil Fertility:** Increased SOC enriches the nutrient profile of soils, supporting plant growth and reducing the need for synthetic fertilizers.
- **Improved Water Management:** Practices that enhance soil structure and organic matter help conserve water, ensuring steady crop growth even in drought-prone areas.
- **Economic Productivity:** Healthy soils and diverse cropping systems lead to more stable and higher yields, boosting farm incomes.

4. Impacts: Long-Term Transformative Effects

The cumulative outcomes of carbon farming practices contribute to transformative impacts on smallholder agriculture, enabling farmers to navigate and adapt to climate challenges. These include:

- **Increased Adaptive Capacity:** Carbon farming equips smallholder farmers with tools and strategies to cope with climatic variability, ensuring food security and economic stability. Resilient soils, diverse cropping systems, and reduced dependency on external inputs allow farmers to adapt to droughts, floods, and shifting growing seasons.
- **Enhanced Climate Resilience:** The integration of biodiversity, water conservation, and carbon storage creates agroecosystems that are better equipped to withstand and recover from extreme weather events and long-term climatic shifts.
- **Social Benefits:** Carbon farming practices that prioritize inclusivity empower marginalized groups by improving access to resources, creating new income opportunities, and fostering community collaboration.

Diagrammatic Representation of the Framework

Below is a hierarchical flow representing the framework:

1. **Inputs:** Carbon farming practices (e.g., agroforestry, cover cropping, reduced tillage).
↓
2. **Processes:** Carbon sequestration, soil regeneration, biodiversity enhancement, and water regulation.
↓
3. **Outcomes:** Reduced emissions, enhanced soil fertility, improved water management, and increased yields.
↓
4. **Impacts:** Increased adaptive capacity, enhanced climate resilience, improved food security, and economic stability.

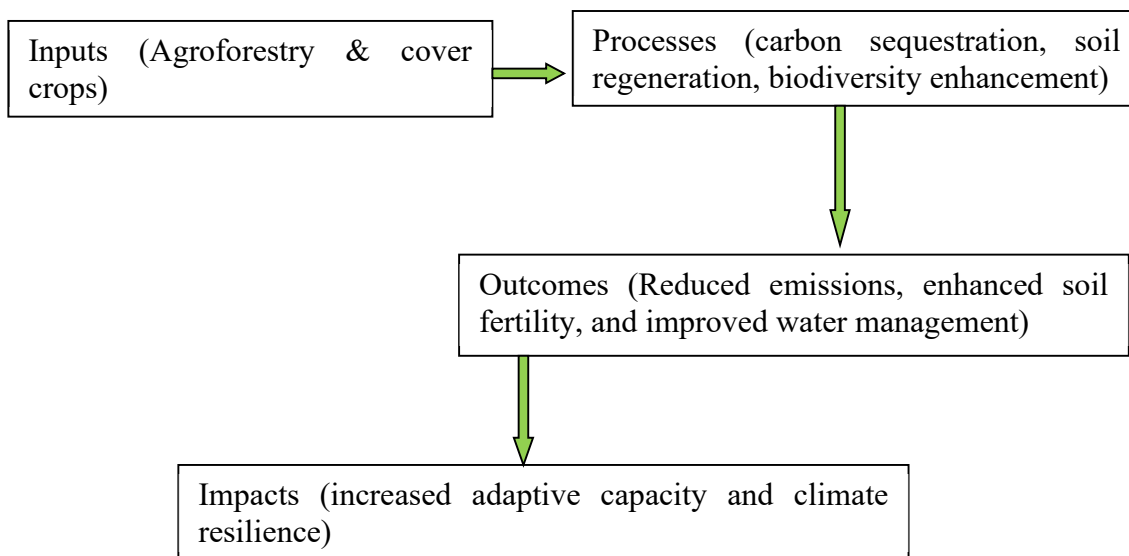


Figure 1: Conceptual framework of carbon farming & resilience outcomes

This conceptual framework highlights the interconnected nature of carbon farming's benefits, demonstrating how targeted practices can generate ripple effects that support both environmental sustainability and socio-economic development. It serves as a guiding structure for evaluating the potential of carbon farming in smallholder agriculture while identifying areas for further research and policy interventions.

Results and Discussion

This section provides a synthesis of empirical evidence on the application of carbon farming in smallholder agriculture, focusing on its benefits, challenges, and feasibility. The analysis highlights its potential for improving productivity and resilience while identifying the constraints that hinder widespread adoption.

Carbon Farming Practices and Their Benefits

Agroforestry

Agroforestry, which integrates trees with crops and livestock, is foundational to carbon farming. Trees sequester carbon in their biomass and root systems while providing ecosystem services such as reducing wind erosion and improving microclimates.

- **Empirical Evidence:** Studies in **sub-Saharan Africa** (Pretty *et al.*, 2018) reveal that agroforestry can enhance soil carbon stocks by 0.2–0.5 Mg/ha annually while providing economic co-benefits such as timber, fruits, and fodder.
- **Additional Benefits:** Agroforestry systems can serve as windbreaks, stabilize soils on sloped terrains, and enhance biodiversity by creating habitats for pollinators and beneficial insects. These features increase overall system productivity and resilience.
- **Recent Findings:** A global meta-analysis by Zomer *et al.* (2020) found that agroforestry systems can store up to **9.5 Mg C/ha/year**, with greater sequestration potential in tropical regions.
- **Additional Benefits:** In East Africa, agroforestry systems have been linked to improved soil fertility, reduced dependence on synthetic fertilizers, and increased household income from timber and fruit sales (Mbow *et al.*, 2019).

Cover Cropping

The use of cover crops like legumes, clovers, and grasses plays a significant role in carbon farming by improving soil structure, fixing atmospheric nitrogen, and reducing erosion.

- **Empirical Evidence:** A meta-analysis by Gattinger *et al.* (2012) reports that cover cropping can boost soil organic carbon (SOC) storage by up to 30% compared to fallow systems.
- **Climate Mitigation:** By reducing the need for synthetic fertilizers, cover crops lower nitrous oxide emissions, contributing to GHG reductions.
- **Recent Findings:** Blanco-Canqui *et al.* (2022) reported that cover crops can increase SOC by **5–10% annually** in degraded soils. Additionally, they reduce nutrient leaching, mitigating water pollution.
- **Additional Benefits:** Cover crops like legumes and clovers also fix nitrogen biologically, reducing the need for chemical fertilizers and lowering agricultural emissions.

Reduced Tillage

Conservation tillage minimizes soil disruption, preserves organic matter, and reduces CO₂ emissions from exposed soils.

- **Empirical Evidence:** A review by Powlson *et al.* (2014) estimates that reduced tillage can sequester up to 1.1 Mg C/ha annually. This practice also decreases fuel use for mechanical tillage, reducing indirect emissions.
- **Long-Term Impacts:** Reduced tillage improves soil structure, enabling better root penetration and water infiltration, which are critical for crop resilience during droughts.
- **Recent Findings:** Recent studies by Six *et al.* (2021) emphasize that reduced tillage increases microbial diversity, which enhances nutrient cycling and soil health.
- **Economic Impacts:** Reduced tillage practices also lower operational costs by decreasing fuel consumption and labor requirements, making them more accessible for smallholders.

Composting and Organic Amendments

Applying compost and organic residues enriches SOC, improves soil fertility, and recycles agricultural waste.

- **Empirical Evidence:** Field trials in **India** (Saha *et al.*, 2021) found that compost application increased crop yields by 20%, enhanced SOC levels, and improved microbial diversity in the soil.
- **Additional Benefits:** Composting reduces reliance on synthetic fertilizers and provides an effective way to manage organic waste, thus contributing to circular agriculture.
- **Recent Findings:** Experiments in sub-Saharan Africa (Mutegi *et al.*, 2021) revealed that compost application increased maize yields by **25–30%** while enhancing SOC levels.
- **Circular Economy:** Composting promotes a circular approach by recycling agricultural waste, thus reducing methane emissions from unmanaged organic residues.

Enhanced Grazing Management

Rotational grazing systems, which allocate specific recovery times for pastures, prevent overgrazing, reduce soil compaction, and enhance carbon storage.

- **Empirical Evidence:** Teague *et al.* (2016) found that well-managed grazing systems significantly increased SOC levels, improved forage quality, and boosted livestock productivity.
- **Additional Benefits:** Enhanced grazing management promotes pasture regeneration, reduces erosion, and increases water infiltration, supporting the overall resilience of pastoral systems.
- **Recent Findings:** A study by Derner *et al.* (2020) found that rotational grazing increased SOC by **15%** over ten years in semi-arid rangelands.
- **Additional Benefits:** Enhanced grazing improves forage quality, supports livestock productivity, and reduces soil compaction, which is critical in preventing land degradation.

Challenges in Implementing Carbon Farming

Despite its benefits, carbon farming faces significant barriers that limit its adoption among smallholder farmers.

Technical Constraints

- **Lack of Knowledge and Skills:** Smallholders often lack technical expertise to implement carbon farming practices effectively. Weak extension services and limited access to training exacerbate this issue (World Bank, 2020). Reports by IFAD (2022) highlight insufficient access to training and extension services as a critical bottleneck.
- **Knowledge Gaps:** Misconceptions about the time required for benefits to materialize or uncertainty about the compatibility of practices with local farming systems hinder uptake.
- **Access to Resources:** Limited availability of tools, quality seeds, and organic inputs further restricts adoption, particularly in resource-poor regions.

Economic Barriers

- **High Upfront Costs:** Investments in agroforestry seedlings, composting infrastructure, or biochar production can be prohibitively expensive for smallholders.
- **Market Access:** Farmers often face challenges in accessing carbon credit markets due to high certification costs and a lack of intermediaries to facilitate transactions. In other words, smallholders face significant challenges in accessing carbon markets due to high transaction costs, complex verification requirements, and limited institutional support (Goldstein *et al.*, 2022).

Policy and Institutional Gaps

- **Lack of Incentives:** The absence of subsidies or financial support for sustainable farming practices limits adoption. Carbon pricing mechanisms are often underdeveloped in regions with high smallholder populations. In other words, in many developing countries, the lack of supportive policies, such as subsidies for sustainable practices or incentives for carbon sequestration, limits the scalability of carbon farming (FAO, 2023).
- **Tenure Security:** Unclear land ownership or user rights discourage farmers from investing in long-term carbon farming practices, such as agroforestry.

Measurement and Verification Challenges

- **SOC Quantification:** Accurately measuring SOC increases is complex, requiring advanced tools and expertise. This complicates farmers' ability to link their efforts to climate finance or carbon credit programs.
- **Baseline Data:** Lack of historical soil carbon data further complicates monitoring and reporting. The absence of robust baseline data complicates efforts to quantify and monetize carbon sequestration (Rumpel *et al.*, 2021).

Evidence of Climate Resilience

Empirical studies underscore the role of carbon farming in enhancing the resilience of smallholder systems to climate variability and shocks.

India

- **Findings:** Cover cropping systems enriched with organic carbon demonstrated a **40% higher water retention capacity** during drought conditions (Singh *et al.*, 2018).
- **Implications:** Increased water retention stabilizes yields during periods of low rainfall, ensuring food security.

Kenya

- **Findings:** Agroforestry systems reduced surface runoff by **30%** and increased crop yields under erratic rainfall (Nyong *et al.*, 2016).
- **Implications:** Improved water management reduces soil erosion and enhances productivity in rainfed systems.

Latin America

- **Findings:** Conservation tillage practices reduced the vulnerability of maize farms to extreme weather events, stabilizing household incomes during climatic shocks (Altieri *et al.*, 2017).
- **Implications:** Sustained production under adverse conditions highlights the potential of carbon farming to mitigate economic risks for smallholders.

West Africa

- **Findings:** A recent study (Bayala *et al.*, 2022) reported that farmer-managed natural regeneration of trees increased SOC by **0.5 Mg/ha/year** and reduced wind erosion by **40%**.
- **Community Engagement:** The participatory nature of these practices also fostered community collaboration and knowledge sharing, strengthening social resilience.

*Cross-Cutting Themes**Gender and Social Equity*

Carbon farming presents opportunities for empowering marginalized groups, particularly women, who play critical roles in smallholder agriculture. Targeted interventions, such as training programs and access to credit, can enhance women's participation and benefit distribution.

- **Recent Evidence:** Women-led composting initiatives in India have increased household incomes by **30%** while improving food security (Sharma *et al.*, 2023).

Ecosystem Services

Beyond carbon sequestration, practices like agroforestry and cover cropping enhance ecosystem services, including water filtration, pest control, and biodiversity conservation.

Co-Benefits of Carbon Markets

Linking carbon farming to climate finance through carbon credits can provide additional income streams for smallholders. However, ensuring equitable access to these markets remains a challenge that requires institutional support and streamlined verification processes.

- **Income Diversification:** Linking carbon farming with carbon credits can provide a steady income stream for smallholders.
- **Recent Developments:** Projects like Kenya's Livelihoods Carbon Fund have shown that smallholder farmers can earn up to **\$20/ha/year** from carbon credits while adopting sustainable practices (Livelihoods Fund, 2023).

Case Studies

This section presents case studies from different regions, highlighting the application and outcomes of carbon farming practices in smallholder systems. These examples provide empirical evidence of the environmental, economic, and social benefits, as well as challenges faced in implementation.

1. India: Organic Carbon Management through Cover Cropping

- **Location:** Maharashtra, India
- **Practice:** Smallholder farmers adopted leguminous cover crops to improve soil organic matter and reduce dependency on chemical fertilizers.
- **Findings:**
 - **Water Retention:** SOC-enriched soils demonstrated **40% higher water retention** during severe drought periods (Singh *et al.*, 2018).
 - **Yield Stability:** Yields increased by **20–25%** in rainfed systems due to improved soil fertility.
- **Challenges:** Initial costs for seeds and lack of technical support slowed adoption in some areas.
- **Implications:** Scaling cover cropping in semi-arid regions could significantly enhance climate resilience and reduce input costs for farmers.

2. Kenya: Agroforestry for Soil and Water Conservation

- **Location:** Central and Western Kenya
- **Practice:** Farmers incorporated fast-growing tree species such as *Grevillea robusta* and *Sesbania sesban* in agroforestry systems to combat soil erosion and enhance productivity.
- **Findings:**
 - **Runoff Reduction:** Surface runoff was reduced by **30%**, lowering the risk of soil erosion during heavy rains (Nyong *et al.*, 2016).
 - **Economic Benefits:** Tree products like timber and fuelwood contributed an additional **15–20%** to household income.
 - **Biodiversity Gains:** Agroforestry provided habitats for pollinators and pest predators, reducing crop losses.
- **Challenges:** Weak land tenure systems discouraged long-term investments in tree planting.
- **Implications:** Policies ensuring land rights and subsidies for seedlings could accelerate adoption.

3. Latin America: Conservation Tillage for Maize Farmers

- **Location:** Central and South America (Mexico and Brazil)
- **Practice:** Adoption of no-till farming with crop residues to preserve SOC and improve water use efficiency in maize systems.
- **Findings:**
 - **Yield Stability:** Farms experienced **15% less yield variability** during drought years (Altieri *et al.*, 2017).
 - **SOC Gains:** SOC levels increased by **0.8 Mg/ha/year** after five years of continuous practice.
 - **Economic Savings:** Reduced fuel and labor costs led to a **10–15% reduction in production expenses**.

- **Challenges:** Adoption was slow among smallholders due to limited access to no-till machinery.
 - **Implications:** Providing affordable equipment and training could enhance adoption rates.
4. Ethiopia: Composting and Soil Fertility Enhancement
- **Location:** Amhara Region, Ethiopia
 - **Practice:** Community-led composting initiatives focused on improving soil fertility using crop residues, manure, and kitchen waste.
 - **Findings:**
 - **Yield Improvement:** Maize and teff yields increased by **30%**, attributed to enhanced nutrient availability (Tesfaye *et al.*, 2020).
 - **Carbon Sequestration:** SOC levels rose by **0.6 Mg/ha/year** after three years of compost application.
 - **Economic Co-Benefits:** Farmers reduced dependency on chemical fertilizers, saving **25% of production costs**.
 - **Challenges:** Labor-intensive composting processes and limited access to organic residues hindered scaling.
 - **Implications:** Promoting farmer cooperatives and knowledge-sharing platforms could improve uptake and efficiency.
5. West Africa: Farmer-Managed Natural Regeneration (FMNR)
- **Location:** Niger and Burkina Faso
 - **Practice:** FMNR involves regenerating native tree species by protecting and managing natural root systems and saplings.
 - **Findings:**
 - **SOC Sequestration:** SOC levels increased by **0.4 Mg/ha/year** (Bayala *et al.*, 2022).
 - **Erosion Control:** Tree roots reduced wind erosion by **35–40%**, preserving topsoil.
 - **Community Engagement:** Participatory approaches fostered collaboration and collective decision-making.
 - **Challenges:** Resistance to reducing grazing areas and weak policy support limited the spread of FMNR.
 - **Implications:** Integrating FMNR into national reforestation programs could amplify its impact.
6. Australia: Rotational Grazing in Semi-Arid Grasslands
- **Location:** Queensland, Australia
 - **Practice:** Rotational grazing with planned rest periods allowed pastures to recover, promoting carbon storage and biodiversity.
 - **Findings:**
 - **SOC Increase:** SOC levels increased by **1.2 Mg/ha/year** over a decade (Derner *et al.*, 2020).
 - **Livestock Productivity:** Improved pasture quality led to a **25% increase in livestock weight gain**.
 - **Challenges:** Initial investments in fencing and monitoring equipment were prohibitive for smaller ranchers.
 - **Implications:** Subsidies for fencing and technical assistance could make rotational grazing more accessible.
7. Southeast Asia: Biochar Application in Rice Systems

- **Location:** Vietnam and Indonesia
 - **Practice:** Application of biochar derived from rice husks to enhance soil fertility and reduce methane emissions from flooded fields.
 - **Findings:**
 - **Emission Reduction:** Methane emissions dropped by **30–50%** compared to traditional rice farming (Nguyen *et al.*, 2021).
 - **SOC Levels:** SOC increased by **1 Mg/ha/year**, enhancing soil health.
 - **Yield Gains:** Rice yields rose by **15%** due to improved nutrient availability.
 - **Challenges:** The high cost of biochar production technology limited its adoption.
 - **Implications:** Expanding low-cost biochar production units and providing subsidies could drive uptake.
- 8. Europe: Carbon Sequestration through Perennial Grasses**
- **Location:** Northern Europe (Sweden and Denmark)
 - **Practice:** Planting perennial grasses such as switch grass and miscanthus on degraded lands to improve carbon sequestration and reduce soil erosion.
 - **Findings:**
 - **SOC Gains:** SOC levels increased by **0.7–1.0 Mg/ha/year** within three years of establishment (Schmidt *et al.*, 2022).
 - **Erosion Control:** Perennial grasses reduced soil loss by **50%** on sloped terrains.
 - **Economic Benefits:** Farmers earned additional income by selling biomass for bioenergy production.
 - **Challenges:** Limited awareness and market linkages for biomass hindered broader adoption.
 - **Implications:** Policy support for biomass energy markets could incentivize the use of perennial grasses.
- 9. Tanzania: Agroforestry with Faidherbia Albida**
- **Location:** Southern Highlands, Tanzania
 - **Practice:** Integration of Faidherbia albida (a nitrogen-fixing tree) in maize and sorghum fields.
 - **Findings:**
 - **Soil Fertility:** SOC levels increased by **0.8 Mg/ha/year**, enhancing nutrient availability for crops (Kimaro *et al.*, 2021).
 - **Yield Gains:** Maize yields increased by **40%** due to improved soil fertility and reduced competition for water during the growing season.
 - **Water Use Efficiency:** Tree canopies reduced evaporation, retaining soil moisture longer.
 - **Challenges:** Limited availability of quality saplings and inadequate farmer awareness of agroforestry benefits.
 - **Implications:** Establishing nurseries and community-led awareness programs can enhance adoption rates.
- 10. Malawi: Soil Cover through Mulching in Smallholder Farms**
- **Location:** Central Malawi
 - **Practice:** Use of maize stover and grass as mulch to retain soil moisture and enhance organic matter.
 - **Findings:**
 - **Erosion Control:** Mulched fields experienced **70% less soil erosion** during heavy rainfall compared to unmulched plots (Chilimba *et al.*, 2020).

- **SOC Levels:** SOC increased by **0.5 Mg/ha/year**, supporting sustainable crop growth.
- **Crop Yields:** Mulching improved maize yields by **15–20%**, particularly in degraded soils.
- **Challenges:** Competing uses of crop residues (e.g., animal fodder) limited the availability of materials for mulching.
- **Implications:** Encouraging balanced residue management could address competing demands and promote mulching adoption.

11. China: Biochar for Paddy Fields

- **Location:** Guangxi Province, China
- **Practice:** Application of biochar derived from bamboo in rice fields to improve soil properties and reduce methane emissions.
- **Findings:**
 - **Emission Reduction:** Methane emissions decreased by **40%** due to improved soil aeration (Zhang *et al.*, 2022).
 - **SOC Sequestration:** SOC levels increased by **1.5 Mg/ha/year**, exceeding conventional practices.
 - **Yield Stability:** Rice yields increased by **25%**, even during drought years.
- **Challenges:** High costs of biochar production limited scaling among smallholders.
- **Implications:** Government subsidies for biochar production could make it more accessible to smallholder farmers.

12. Uganda: Rotational Grazing for Pastoral Systems

- **Location:** Karamoja Region, Uganda
- **Practice:** Controlled rotational grazing to improve grassland productivity and prevent soil compaction.
- **Findings:**
 - **Pasture Regeneration:** Biomass production increased by **30%**, supporting larger livestock populations (Byakagaba *et al.*, 2020).
 - **SOC Storage:** SOC levels increased by **0.6 Mg/ha/year** in rotationally grazed pastures.
 - **Livestock Health:** Improved pasture quality resulted in healthier livestock and higher milk yields.
- **Challenges:** Resistance from traditional grazing communities and lack of fencing infrastructure slowed adoption.
- **Implications:** Integrating traditional knowledge with rotational grazing systems could increase acceptance.

13. Indonesia: Multi-Strata Agroforestry for Cocoa Production

- **Location:** Sulawesi, Indonesia
- **Practice:** Cocoa farms incorporated shade trees and undergrowth species in multi-strata agroforestry systems.
- **Findings:**
 - **SOC Gains:** SOC increased by **0.9 Mg/ha/year** as a result of organic matter inputs from tree litter (Wulan *et al.*, 2021).
 - **Biodiversity:** Increased tree and plant diversity supported pollinators and natural pest predators, reducing dependency on chemical pesticides.
 - **Economic Benefits:** Cocoa yields were stabilized, and shade trees provided additional income from timber and fruit sales.

- **Challenges:** Farmers faced challenges in managing tree densities to balance shade and crop productivity.
- **Implications:** Providing training on agroforestry management could optimize system benefits.

14. Niger: Zaï Pits for Water Conservation and Carbon Storage

- **Location:** Sahel Region, Niger
- **Practice:** Use of Zaï pits-small water-harvesting pits filled with organic matter-to regenerate degraded soils and store water.
- **Findings:**
 - **SOC Increase:** SOC levels rose by **0.4 Mg/ha/year**, supporting millet and sorghum production (Reij *et al.*, 2020).
 - **Yield Gains:** Crop yields improved by **50–100%**, particularly in previously unproductive lands.
 - **Water Retention:** Zaï pits retained water longer, enabling crop growth during short rains.
- **Challenges:** Labor-intensive digging of pits limited adoption in resource-constrained households.
- **Implications:** Introducing mechanized tools for Zaï pit construction could reduce labor requirements.

15. United States: Perennial Grasses for Carbon Farming

- **Location:** Midwest United States
- **Practice:** Planting switch grass and prairie grasses on marginal lands to sequester carbon and restore degraded soils.
- **Findings:**
 - **SOC Gains:** SOC levels increased by **1.2 Mg/ha/year**, enhancing soil fertility and stability (Mitchell *et al.*, 2021).
 - **Economic Co-Benefits:** Farmers generated additional income by selling biomass for biofuel production.
 - **Erosion Control:** Perennial grasses reduced soil erosion by **60%**, especially on sloped lands.
- **Challenges:** Competition with food crops for land use limited expansion.
- **Implications:** Promoting perennial grasses on marginal lands could optimize land use without affecting food production.

16. Senegal: Participatory Composting Programs

- **Location:** Dakar Region, Senegal
- **Practice:** Community-led composting programs used agricultural and urban waste to improve soil fertility in peri-urban farming.
- **Findings:**
 - **SOC Gains:** SOC levels increased by **0.5 Mg/ha/year** in compost-amended soils (Diouf *et al.*, 2022).
 - **Food Security:** Vegetable yields increased by **35%**, supporting urban food systems.
 - **Waste Management:** Composting diverted significant organic waste from landfills, reducing methane emissions.
- **Challenges:** Limited infrastructure for organic waste collection hindered scaling.
- **Implications:** Municipal partnerships could enhance waste management and composting initiatives.

Conclusion

Carbon farming presents a transformative opportunity for smallholder agriculture by combining climate mitigation with resilience-building. Practices such as agroforestry, cover cropping, and composting not only sequester carbon but also enhance soil fertility, water management, and biodiversity. However, realizing its full potential requires addressing technical, economic, and policy barriers. Multilateral collaborations, carbon financing mechanisms, and capacity-building initiatives will be crucial for scaling carbon farming across smallholder landscapes.

Recommendations

- **Capacity Building:** Governments and NGOs should invest in farmer education programs to promote knowledge of carbon farming techniques.
- **Incentives for Adoption:** Subsidies, grants, and carbon credits can lower entry barriers for smallholders.
- **Policy Support:** National policies should integrate carbon farming into agricultural strategies and provide institutional frameworks for carbon credit markets.
- **Research and Development:** Continued research on low-cost, locally adapted carbon farming practices is essential for success.
- **Public-Private Partnerships:** Collaborations can enhance resource mobilization and innovation in carbon farming technologies.

References

- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., & Funes, F. (2017). Agroecology and resilience to climate change: Principles and applications. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3), 15.
- Bayala, J., et al. (2022). Agroforestry and climate resilience in West Africa. *Journal of Agroecology*, 18(3), 223-237.
- Blanco-Canqui, H., et al. (2022). Benefits of cover cropping for soil health. *Agronomy Journal*, 114(1), 123-138.
- Byakagaba, P., et al. (2020). Rotational grazing practices and their impact on pastoral systems in Uganda. *Journal of Arid Environments*, 181, 104213.
- Chilimba, A., et al. (2020). Effects of mulching on soil erosion and crop productivity in Central Malawi. *Soil and Tillage Research*, 204, 104736.
- Derner, J. D., et al. (2020). Rotational grazing and SOC in rangelands. *Global Change Biology*, 26(5), 2891-2902.
- Diouf, A., et al. (2022). Urban and peri-urban composting initiatives in Senegal: Impacts on soil health and food security. *Waste Management & Research*, 40(2), 197–205.
- FAO (2023). Scaling climate-smart agriculture for smallholders. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Gattinger, A., et al. (2012). Enhanced SOC storage under organic farming: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1), 39–48.
- Goldstein, A., et al. (2022). Barriers to carbon credit market access for smallholders. *Climate Policy Journal*, 22(7), 901-920.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
- IFAD (2022). Strengthening extension services for smallholder farmers. *International Fund for Agricultural Development Annual Report*.

- Kimaro, D. N., et al. (2021). Agroforestry systems with *Faidherbia albida* for sustainable maize production in Tanzania. *Agroforestry Systems*, 95(5), 997–1010.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Lasco, R. D., et al. (2021). Agroforestry systems for sustainable livelihoods and ecosystem services. *Sustainability Science*, 16(1), 100–110.
- Livelihoods Fund (2023). Unlocking carbon credit potential in Africa. *Livelihoods Carbon Fund Report*.
- Mbow, C., et al. (2019). Agroforestry solutions for smallholder farmers in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 34, 87–91.
- Mitchell, R. B., et al. (2021). The role of perennial grasses in restoring degraded lands and sequestering carbon in the Midwest U.S. *Journal of Environmental Quality*, 50(4), 851–864.
- Mutegi, J., et al. (2021). Composting practices and soil health improvements. *Soil Science Society of East Africa Proceedings*.
- Nguyen, T. T., et al. (2021). Biochar application in rice systems: Mitigation potential and SOC enhancement. *Agricultural Systems*, 187, 103027.
- Nyong, A., Adesina, F., & Elasha, B. O. (2016). The value of indigenous knowledge in climate change mitigation and adaptation strategies in Africa. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5), 787–797.
- Powlson, D. S., et al. (2014). Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4(8), 678–683.
- Pretty, J., et al. (2018). Sustainable intensification of agriculture. *Nature Sustainability*, 1(6), 421–427.
- Reij, C., et al. (2020). Zaï pits and their role in restoring degraded soils in the Sahel. *Land Degradation & Development*, 31(3), 325–335.
- Rumpel, C., et al. (2021). Soil carbon monitoring challenges and opportunities. *Nature Climate Change*, 11(2), 124–130.
- Saha, S., et al. (2021). Impact of compost on yield and SOC: Evidence from India. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 543–553.
- Schmidt, A., et al. (2022). The role of perennial grasses in improving degraded lands in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 37(2), 145–157.
- Sharma, P., et al. (2023). Women-led composting initiatives: A pathway to economic empowerment. *Gender and Development Journal*, 31(1), 112–123.
- Singh, M., et al. (2018). Cover cropping in semi-arid regions of India: Water retention and SOC benefits. *Agricultural Water Management*, 210, 144–152.
- Singh, R., et al. (2018). Enhancing drought resilience through soil management. *Agricultural Water Management*, 203, 142–151.
- Teague, W. R., et al. (2016). Grazing management impacts on soil carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 234, 111–120.
- Tesfaye, A., et al. (2020). Community composting for improved soil fertility in Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 15(4), 201–209.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability, and transformability in social–ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), 5.
- World Bank (2020). Scaling up climate-smart agriculture in Africa. *World Bank Publications*.
- Wulan, M., et al. (2021). Multi-strata agroforestry systems for cocoa production in Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Today*, 33(4), 17–23.

Zhang, Y., et al. (2022). Biochar application in paddy fields: A strategy for methane mitigation and soil carbon enhancement. *Environmental Pollution*, 305, 119272.

Zomer, R. J., et al. (2020). Global assessment of agroforestry carbon storage. *Environmental Research Letters*, 15(11), 115003.

THE ROLE OF AGRIBUSINESS IN FACILITATING FARMERS' ACCESS TO CARBON MARKETS

Sadiq, M.S¹., Singh, I.P²., Ahmad, M.M³., and Sani, B.S⁴.



¹Department of Agricultural Economics and Agribusiness, FUD, Dutse, Nigeria

²Department of Agricultural Economics, SKRAU, Bikaner, India

³Department of Agricultural Economics and Extension, BUK, Kano, Nigeria

⁴PhD Scholar, Department of Agricultural Economics and Agribusiness, FUD, Dutse, Nigeria

Author's correspondence address: Sadiq, Mohammed Sanusi, Department of Agricultural Economics and Agribusiness, FUD, P.M.B. 7156, Dutse, Nigeria

0000-0003-4336-5723^a,  0000-0002-1886-5956^b,  0000-0003-4565-0683^c, 0000-0001-7773-3796^d

Abstract

The evolving challenges of climate change have spotlighted the potential of carbon markets as a mechanism for reducing greenhouse gas emissions. Farmers play a crucial role in mitigating climate change, yet their access to carbon markets remains limited due to barriers such as lack of technical knowledge, high transaction costs, and market complexity. Agribusiness entities have emerged as intermediaries capable of bridging this gap, offering services like capacity building, financing, and market access. This review examines the critical role of agribusiness in enabling farmers' participation in carbon markets, analyzing theoretical and conceptual frameworks, case studies, and recent developments. Recommendations for enhancing this facilitation include policy reforms, technological interventions, and fostering collaboration among stakeholders.

Keywords: Agribusiness; Carbon markets; Climate change; GHG emissions; Farmers

Introduction

Agriculture plays a dual role in the climate change narrative: it is both a significant contributor to greenhouse gas (GHG) emissions and a critical player in potential mitigation strategies. Current estimates attribute roughly 24% of global GHG emissions to agricultural activities, including deforestation for crop production, methane emissions from livestock, and nitrous oxide emissions from fertilizer use and soil degradation (IPCC, 2021). These emissions underscore the urgent need for systemic reforms in agricultural practices to align with global climate goals.

However, agriculture also possesses unparalleled potential to sequester carbon and mitigate climate change impacts. Sustainable farming practices such as agroforestry, conservation tillage, crop diversification, and the use of cover crops can significantly enhance soil carbon storage, reduce emissions, and restore ecosystem health. These methods not only combat climate change but also improve soil fertility and long-term agricultural productivity, creating a dual benefit for farmers and the environment.

Carbon markets, which provide mechanisms to trade carbon credits generated through these practices, represent a viable pathway for incentivizing and scaling such efforts. Farmers can generate carbon credits by adopting practices that lead to measurable reductions in GHG emissions or increases in carbon sequestration. These credits can then be sold to entities seeking to offset their emissions, providing farmers with an additional revenue stream.

Despite the promising nature of carbon markets, their potential remains largely untapped by smallholder farmers, who constitute the majority of agricultural producers globally. Barriers to entry include a lack of technical knowledge about carbon credit generation, high upfront costs for adopting sustainable practices, complex verification and monitoring requirements, and limited access to the necessary infrastructure. For many smallholders, these challenges make participation in carbon markets financially and logistically prohibitive (World Bank, 2022).

Agribusiness entities have emerged as critical facilitators in this context. These companies, which often operate at the intersection of agriculture and commerce, possess the networks, resources, and expertise required to bridge the gap between smallholder farmers and carbon markets. Agribusinesses can support farmers by offering training on sustainable practices, assisting with carbon credit verification and registration, and providing access to technologies such as satellite monitoring and digital carbon accounting platforms. Moreover, they can reduce transaction costs by aggregating carbon credits from multiple farmers, increasing market competitiveness and making participation more viable for smallholders.

Given their strategic position within the agricultural value chain, agribusinesses have a unique opportunity to address systemic barriers and unlock the potential of carbon markets for farmers. This paper delves into the theoretical underpinnings of this dynamic, analyzes successful interventions by agribusinesses, and identifies strategies to further enhance their role in facilitating farmer access to carbon markets. By bridging the gap between smallholder farmers and these emerging financial mechanisms, agribusinesses can play a pivotal role in fostering a more sustainable and inclusive agricultural system while advancing global climate goals.

Theoretical Framework

Understanding the role of agribusiness in facilitating farmer access to carbon markets requires examining key theoretical frameworks that provide insights into their operational strategies, challenges, and potential contributions to sustainable agriculture and climate change mitigation.

1. Market Intermediation Theory

Market intermediation theory explains the critical role of intermediaries, such as agribusinesses, in reducing inefficiencies within markets. In the context of carbon markets, these inefficiencies include high transaction costs, information asymmetry, and lack of trust between farmers and buyers. Farmers, particularly smallholders, often lack the expertise and resources to navigate the complexities of carbon credit certification, monitoring, and trading. Agribusinesses address these gaps by:

- **Providing Expertise:** Agribusinesses offer technical assistance to farmers, helping them implement sustainable farming practices that meet carbon market standards.
- **Facilitating Market Access:** Through established relationships with carbon market buyers and regulatory bodies, agribusinesses act as trusted intermediaries, ensuring that farmers can sell their carbon credits at competitive prices.
- **Risk Mitigation:** By assuming some of the financial and operational risks involved in carbon credit transactions, agribusinesses encourage farmer participation and foster market confidence.

Moreover, by pooling resources and centralizing processes, agribusinesses reduce the administrative burden for farmers, making carbon market participation more accessible and efficient (Spulber, 1996).

2. Transaction Cost Economics

Transaction cost economics emphasizes the costs associated with engaging in market activities, including search, negotiation, and enforcement costs. In carbon markets, these costs are particularly high due to the technical and regulatory requirements for generating and verifying carbon credits. For farmers, the following costs often act as deterrents:

- **Search Costs:** Identifying buyers for carbon credits or platforms for trading them is challenging without prior knowledge or networks.
- **Verification Costs:** Carbon markets demand rigorous validation of carbon sequestration practices, which involves third-party audits, field assessments, and advanced monitoring technologies.
- **Enforcement Costs:** Ensuring compliance with carbon credit contracts and standards requires continuous oversight, which many farmers cannot afford.

Agribusinesses play a pivotal role in reducing these costs by standardizing processes, aggregating carbon credits, and leveraging economies of scale. For instance, an agribusiness may bundle carbon credits from multiple smallholders, allowing farmers to benefit from reduced costs per credit while making these aggregated credits more attractive to buyers due to their volume (Williamson, 1985).

Furthermore, agribusinesses often act as guarantors for quality and compliance, shouldering the responsibility of ensuring that carbon credits meet market requirements. This reduces the enforcement burden on farmers and buyers alike.

3. Sustainability Transition Theory

Sustainability transition theory explores the systemic shifts required to move from traditional, unsustainable practices to sustainable, climate-friendly alternatives. This framework highlights the importance of "niche innovations" and the role of key actors, such as agribusinesses, in driving these transitions. Agribusinesses, due to their influence and scale, can act as catalysts for systemic change by:

- **Promoting Sustainable Practices:** Agribusinesses can encourage farmers to adopt regenerative agriculture, agroforestry, and other carbon-friendly techniques by demonstrating their financial and environmental benefits.
- **Scaling Niche Innovations:** Small-scale experiments, such as pilot projects for carbon sequestration, can be scaled to broader regional or national levels through agribusiness networks.
- **Influencing Policy and Market Dynamics:** Agribusinesses often have the capacity to engage with policymakers, advocating for regulatory frameworks that support carbon market participation for smallholder farmers.

Additionally, sustainability transitions involve multi-level interactions between micro (farm-level), meso (regional networks), and macro (policy and global market) scales (Geels, 2011). Agribusinesses operate across these scales, connecting local farmers with broader economic and policy structures. By aligning farmer incentives with global sustainability goals, they enable the agricultural sector to contribute meaningfully to climate change mitigation.

4. Network Theory

While not previously discussed, network theory offers an additional lens to understand agribusiness roles. It focuses on how relationships and collaborations within networks can enhance resource access and information flow. Agribusinesses act as network hubs, connecting farmers with stakeholders such as carbon credit certifiers, technology providers, financial institutions, and buyers. These networks foster trust, reduce barriers to entry, and create a supportive ecosystem for farmers entering carbon markets.

5. Resource-Based View (RBV) Theory

The resource-based view theory posits that organizations derive competitive advantage from unique resources and capabilities. Agribusinesses leverage their unique assets, including technological tools, financial strength, and established market connections, to address the challenges of carbon markets. Their ability to aggregate resources and provide tailored support to farmers positions them as indispensable intermediaries.

Integrating Theories

By synthesizing these theoretical lenses, we gain a comprehensive understanding of how agribusinesses facilitate farmer access to carbon markets. They reduce costs and complexity (transaction cost economics), foster innovation and system change (sustainability transition theory), and serve as efficient intermediaries (market intermediation theory). Additionally, their role as network facilitators and resource aggregators amplifies their impact, creating pathways for inclusive and sustainable agricultural development.

Conceptual Framework

The conceptual framework for agribusiness involvement in carbon markets emphasizes their multi-faceted role as facilitators, connectors, and enablers of farmer participation in these markets. The framework integrates critical components that address systemic challenges, bridge gaps, and enhance the effectiveness of carbon market participation. These components include stakeholder relationships, capacity building, technology adoption, policy advocacy, and financial intermediation. Together, they form a holistic approach to leveraging agribusiness capabilities for sustainable and inclusive carbon market engagement.

1. Stakeholder Relationships

Agribusinesses act as crucial intermediaries in a complex network of stakeholders involved in carbon markets, including farmers, carbon credit certifiers, regulatory agencies, buyers, and financial institutions. Effective stakeholder management involves:

- **Building Trust:** Many smallholder farmers are hesitant to engage with carbon markets due to past experiences of inequity or lack of transparency. Agribusinesses must establish trust through fair practices and transparent communication.
- **Facilitating Collaboration:** Agribusinesses serve as a bridge between farmers and carbon credit buyers, ensuring both parties understand and fulfill their roles. This collaboration often involves:
 - Liaising with third-party certifiers to validate carbon credits.
 - Connecting buyers with aggregated carbon credits from farmer networks.
 - Ensuring compliance with regulations to maintain market credibility.
- **Creating Synergies:** By fostering partnerships among NGOs, technology providers, and financial institutions, agribusinesses create synergies that amplify the impact of carbon markets.

Strong stakeholder relationships enable streamlined operations, reduce transactional conflicts, and promote long-term market stability.

2. Capacity Building

Farmers often lack the knowledge and skills required to participate effectively in carbon markets. Agribusinesses address this through robust capacity-building initiatives that include:

- **Training Programs:** Educating farmers on sustainable agricultural practices such as agroforestry, reduced tillage, and cover cropping. These practices are essential for generating measurable carbon credits.
- **Carbon Literacy:** Introducing farmers to the basics of carbon markets, including carbon credit generation, certification, and trading processes.
- **Monitoring and Reporting Skills:** Providing training on data collection, record-keeping, and reporting for carbon sequestration. This often involves the use of digital tools and templates to simplify documentation.
- **Demonstration Projects:** Implementing pilot programs to showcase successful examples of carbon credit generation and monetization, building farmer confidence in the system.

Capacity-building initiatives ensure that farmers are well-equipped to adopt practices that align with carbon market requirements, reducing barriers to entry and ensuring compliance with market standards.

3. Technology Adoption

Technology is a critical enabler in carbon markets, helping farmers monitor, verify, and optimize carbon sequestration practices. Agribusinesses play a pivotal role in promoting and facilitating access to cutting-edge technologies:

- **Precision Agriculture:** Tools such as soil sensors, GPS mapping, and drone-based monitoring enable precise measurement of soil carbon levels and emission reductions.
- **Carbon Monitoring Platforms:** Digital platforms and apps simplify carbon accounting by automating data collection, analysis, and reporting. These platforms also connect farmers to carbon marketplaces.
- **Blockchain Technology:** By utilizing blockchain, agribusinesses ensure transparency and traceability in carbon credit transactions, reducing fraud and enhancing buyer confidence.
- **Satellite Imagery:** Remote sensing technologies provide cost-effective, large-scale monitoring of land use changes and carbon sequestration, particularly for smallholder farmers with limited resources.
- **Affordable Access:** Agribusinesses often subsidize or lease these technologies, making them accessible to smallholders who may otherwise lack the financial means to invest in them.

Adoption of technology not only increases the accuracy and reliability of carbon credit verification but also enhances farmer efficiency and productivity.

4. Policy Advocacy

Agribusinesses play a key role in shaping regulatory frameworks that govern carbon markets. Their involvement in policy advocacy ensures that regulations are inclusive, equitable, and supportive of farmer participation:

- **Lobbying for Incentives:** Advocating for subsidies, tax credits, or financial incentives for farmers adopting carbon sequestration practices.
- **Simplifying Compliance:** Pushing for streamlined regulatory processes and standardized protocols to reduce the administrative burden on farmers.
- **Enhancing Accessibility:** Supporting the development of localized carbon markets that cater to smallholder farmers, as opposed to global markets that may favor larger-scale operations.
- **Promoting Fair Pricing:** Ensuring that farmers receive a fair share of the revenue generated from carbon credits, addressing issues of inequity in profit distribution.
- **Engaging in Multilateral Dialogues:** Participating in international negotiations on carbon market mechanisms, ensuring that the interests of smallholder farmers are represented in global climate agreements.

Policy advocacy by agribusinesses can create a more enabling environment for farmer engagement, increasing participation and impact.

5. Financial Intermediation

One of the biggest barriers to farmer participation in carbon markets is the high upfront cost associated with adopting sustainable practices. Agribusinesses address this challenge through financial intermediation:

- **Providing Upfront Financing:** Offering loans, grants, or credit lines to help farmers cover the initial costs of implementing carbon-friendly practices such as planting trees or purchasing precision farming equipment.
- **Revenue Sharing Models:** Establishing profit-sharing agreements where agribusinesses cover the upfront costs in exchange for a share of the revenue generated from carbon credits.
- **Bundling Carbon Credits:** Aggregating credits from multiple farmers into larger bundles, making them more attractive to buyers and reducing individual farmer costs.
- **Risk Mitigation:** Offering insurance or guarantees against market volatility, ensuring that farmers are not left vulnerable to fluctuations in carbon credit prices.
- **Accessing Subsidies:** Assisting farmers in applying for government or NGO subsidies designed to promote sustainable agricultural practices.

By reducing financial barriers, agribusinesses enable broader participation in carbon markets, ensuring that even resource-constrained smallholder farmers can benefit.

Integrated Conceptual Framework

The integrated framework highlights the interconnectedness of these factors. Effective stakeholder relationships facilitate capacity building and technology adoption, while policy advocacy and financial intermediation create an enabling environment for farmers to participate in carbon markets. Agribusinesses, positioned at the nexus of these factors, act as the linchpin driving inclusive and sustainable carbon market engagement. This holistic approach ensures that carbon markets are not only accessible but also equitable, empowering farmers to contribute to climate change mitigation while enhancing their livelihoods.

Below is a step-by-step depiction of the **Integrated Conceptual Framework** for agribusiness involvement in facilitating farmer access to carbon markets. The framework is built around interlinked components that collectively address systemic challenges, emphasizing how each factor interacts with others.

Step 1: Stakeholder Relationships as the Core

Agribusinesses sit at the nexus of stakeholder relationships, acting as intermediaries between farmers, carbon market regulators, buyers, certifiers, policymakers, and financial institutions. This forms the foundation for all subsequent activities:

- Agribusinesses **coordinate** with regulators to ensure compliance with market standards.
- They **connect** farmers with buyers and facilitate access to certification bodies.
- Partnerships with technology providers and NGOs ensure complementary expertise and resources.

Step 2: Capacity Building

Building farmer capacity is a prerequisite for effective participation in carbon markets. Agribusinesses leverage their stakeholder networks to deliver training and resources:

- They train farmers in **sustainable practices** such as agroforestry and conservation tillage.
- Provide workshops on **carbon credit generation, monitoring, and trading**.
- Use demonstration projects to **showcase success stories**, encouraging adoption.

The success of capacity building depends on the agribusiness's ability to **tap into technological tools** and collaborate with technical experts, creating a feedback loop that strengthens farmer confidence and market readiness.

Step 3: Technology Adoption

Technology adoption amplifies the impact of capacity building, providing farmers with tools to implement and monitor sustainable practices effectively:

- Precision agriculture technologies enable **real-time data collection** on soil health and carbon sequestration.
- Carbon monitoring platforms simplify **record-keeping and compliance**.
- Blockchain ensures **transparent and traceable transactions**, instilling trust in the system.

Agribusinesses act as a conduit, **subsidizing or leasing** these technologies to make them accessible to smallholder farmers. Technology, in turn, supports policy advocacy and financial intermediation by generating accurate, verifiable data for decision-making.

Step 4: Policy Advocacy

Using data and insights gained from working with farmers and markets, agribusinesses advocate for policies that enhance farmer access to carbon markets:

- Lobby for **financial incentives** such as subsidies or tax breaks for sustainable practices.
- Push for **streamlined regulatory frameworks** to reduce administrative complexity.
- Ensure **fair revenue distribution** to address equity concerns.

Strong policies reduce barriers and enhance the scalability of agribusiness interventions, feeding back into capacity building and financial intermediation.

Step 5: Financial Intermediation

Financial intermediation is the mechanism that makes the transition to carbon markets feasible for farmers:

- Agribusinesses provide **upfront financing** to support the adoption of sustainable practices.
- Bundle and sell carbon credits, sharing revenue with farmers to **maximize profitability**.
- Offer insurance products to protect farmers from **market risks**.

This financial support reinforces adoption and retention of practices taught during capacity building while addressing the economic barriers highlighted during stakeholder interactions.

Step 6: Integrated Impact

By interlinking these components, agribusinesses create a sustainable ecosystem for farmer participation in carbon markets. The components interact as follows:

1. **Stakeholder Relationships** facilitate resource and information flow, supporting other components.
2. **Capacity Building** equips farmers with the skills to engage effectively.
3. **Technology Adoption** ensures compliance, monitoring, and market readiness.
4. **Policy Advocacy** creates an enabling environment for carbon market participation.
5. **Financial Intermediation** addresses economic barriers, making sustainable practices viable.

Visualization of the Framework

Here is a simplified **flow diagram** representation of the integrated framework:

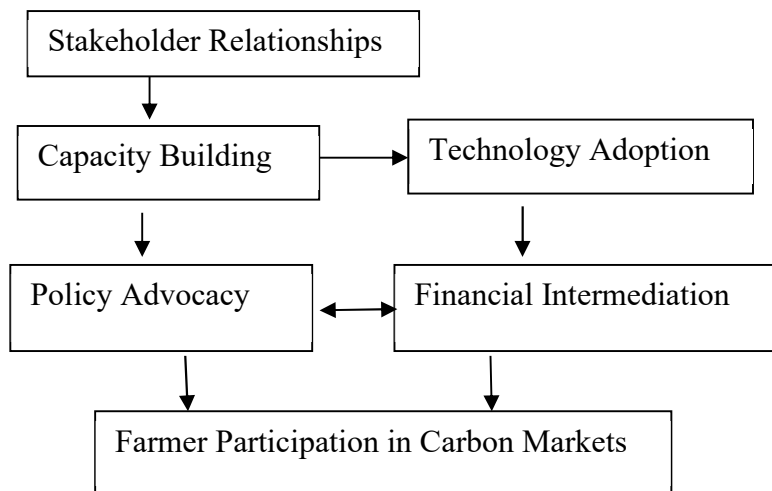


Figure 1: Conceptual framework

Key Insights

1. **Central Role of Stakeholder Relationships:** Agribusinesses operate as the connecting hub that integrates all components.
2. **Feedback Loops:** Each component strengthens the others, creating a system of continuous improvement.
3. **Farmer Empowerment:** The framework prioritizes building farmer capacity, ensuring equitable access and participation.

This step-by-step linkage demonstrates how agribusinesses holistically facilitate farmer access to carbon markets, addressing challenges through an interconnected, multi-pronged approach.

Research Methodology

The present study relied on secondary data sourced from journals, conference proceedings, articles, manuals, monographs, edited books, newspapers, internet to generate data. Furthermore, to have an insight into the research review, the collected data were systematically analyzed.

Results and Discussion

The role of agribusiness in facilitating farmer access to carbon markets is multifaceted, with notable successes, challenges, and implications for policy development. This section delves deeper into case studies, the barriers addressed by agribusinesses, challenges they face, and the policy measures that can enhance their effectiveness.

1. Case Studies

Case studies provide real-world examples of how agribusinesses have successfully enabled farmer participation in carbon markets:

- **Nori Platform:** Nori partners with agribusiness companies to aggregate carbon credits generated by smallholder farmers, ensuring compliance with market standards (Nori, 2022). This aggregation approach:
 - Reduces the financial and administrative burden on individual farmers.
 - Makes carbon credits more marketable by increasing their scale and standardization.
 - Uses blockchain technology to ensure transparency and traceability, boosting buyer confidence.
- **Corteva Agriscience Initiative:** Corteva provides financial incentives to farmers who adopt regenerative agricultural practices, directly linking these practices to carbon credit generation (Corteva, 2023). Highlights include:
 - Offering technical support to farmers, ensuring they meet carbon market eligibility requirements.
 - Providing upfront financing to cover the costs of implementing practices such as cover cropping and conservation tillage.
 - Enhancing soil health and agricultural productivity while generating verifiable carbon credits.
- **Indigo Ag:** Indigo Ag leverages digital platforms and blockchain technology to help farmers quantify, verify, and monetize carbon sequestration (Indigo Ag, 2023). Their approach involves:
 - Simplified carbon credit registration through user-friendly digital tools.
 - Satellite imagery and soil sensors for precise monitoring and verification.
 - Partnerships with buyers to secure fair pricing for farmers' carbon credits.
- **Soil Capital Initiative (Europe):** Soil Capital works with agribusiness networks to provide carbon payments to farmers transitioning to sustainable practices. This initiative:
 - Offers payments tied to both carbon sequestration and productivity improvements.
 - Emphasizes local adaptation of carbon market protocols to align with European regulations.

These case studies highlight diverse strategies used by agribusinesses, ranging from technical support to leveraging advanced technologies, underscoring their pivotal role in reducing market entry barriers for farmers.

Below are further case studies that illustrate the diverse ways agribusinesses are facilitating farmer access to carbon markets across the globe:

- a. Kenya's Smallholder Agroforestry Carbon Initiative
 - **Overview:**
A collaboration between Vi Agroforestry, agribusiness cooperatives, and local farmers in Kenya focuses on smallholder agroforestry to generate carbon credits.
 - **Key Features:**
 - Farmers receive training on tree planting and sustainable land management practices.
 - Carbon credits are aggregated and sold through international platforms like Plan Vivo.
 - Revenue from carbon credits is shared with farmers, who also benefit from improved soil fertility and crop yields.

- **Impact:**
Over 30,000 smallholder farmers are involved, sequestering millions of tons of CO₂ while improving household incomes (Vi Agroforestry, 2021).
- b. Bayer's Carbon Farming Initiative
 - **Overview:**
Bayer, a leading agribusiness company, runs carbon farming programs in the United States, Brazil, and Europe. These initiatives incentivize farmers to adopt regenerative practices.
 - **Key Features:**
 - Practices include cover cropping, conservation tillage, and diversified crop rotations.
 - Bayer provides access to digital tools like FieldView to track and verify carbon sequestration.
 - The company connects farmers with buyers seeking high-quality carbon credits.
 - **Impact:**
Farmers report increased soil health and water retention, along with new revenue streams from carbon credits (Bayer, 2022).
- c. Cargill's Regenerative Agriculture Program
 - **Overview:**
Cargill, a global agribusiness giant, partners with farmers in North America and Latin America to promote regenerative agricultural practices that generate carbon credits.
 - **Key Features:**
 - Offers financial incentives and technical support to farmers adopting sustainable methods such as reduced tillage and improved grazing.
 - Leverages partnerships with verification platforms like Soil Health Institute and Indigo Ag.
 - Bundles carbon credits for large-scale corporate buyers.
 - **Impact:**
By 2030, Cargill aims to improve soil health on 10 million acres while generating verifiable carbon reductions (Cargill, 2022).
- d. Rabobank's Acorn Initiative
 - **Overview:**
Rabobank, through its Acorn initiative, enables smallholder farmers in Africa, Asia, and Latin America to access voluntary carbon markets.
 - **Key Features:**
 - Focuses on agroforestry and regenerative practices.
 - Uses satellite data to measure and verify carbon sequestration.
 - Provides payments directly to farmers through blockchain-based smart contracts.
 - **Impact:**
Over 25,000 farmers have joined, generating significant carbon credits while building resilient agroforestry systems (Rabobank, 2023).
- e. Pepsico's Positive Agriculture Program
 - **Overview:**
Pepsico's Positive Agriculture Program aims to reduce the company's supply chain emissions by incentivizing farmers to adopt climate-smart practices.
 - **Key Features:**
 - Offers monetary rewards to farmers implementing carbon sequestration techniques like precision agriculture and rotational grazing.

- Collaborates with local agribusinesses to train farmers and monitor results.
- Engages in multi-stakeholder partnerships with NGOs and governments to scale impact.
- **Impact:**
Pepsico aims to reduce 3 million metric tons of CO₂ by 2030 through its farming initiatives (Pepsico, 2022).
- f. Nestlé's Soil Carbon Initiative
- **Overview:**
Nestlé works with coffee and dairy farmers to reduce emissions and sequester carbon through improved soil management and agroforestry.
- **Key Features:**
 - Provides farmers with upfront payments for adopting carbon-positive practices.
 - Implements digital tracking systems to monitor carbon sequestration and ensure traceability.
 - Partners with certification bodies to integrate carbon credits into sustainable product labeling.
- **Impact:**
The initiative has increased farmer income while aligning with Nestlé's commitment to net-zero emissions by 2050 (Nestlé, 2023).
- g. Australia's Carbon Farming Initiative (CFI)
- **Overview:**
The Australian government partners with agribusinesses under the CFI to engage farmers in carbon markets.
- **Key Features:**
 - Focus on soil carbon enhancement, reforestation, and methane capture from livestock.
 - Provides a structured framework for credit verification and trading.
 - Agribusinesses such as Nufarm act as intermediaries to ensure compliance and market access.
- **Impact:**
Over 1.2 million tons of carbon credits have been generated, with widespread adoption of sustainable practices among Australian farmers (Australian Carbon Market Institute, 2022).
- h. Danone's Livelihoods Carbon Fund
- **Overview:**
Danone, through its Livelihoods Carbon Fund, invests in projects that support smallholder farmers in adopting sustainable practices while generating carbon credits.
- **Key Features:**
 - Targets agroforestry, organic farming, and water conservation.
 - Provides upfront investments and technical support through agribusiness partners.
 - Focuses on long-term farmer engagement, emphasizing capacity building and community involvement.
- **Impact:**
Projects have improved rural livelihoods while offsetting over 10 million tons of CO₂ globally (Danone, 2023).
- i. Syngenta's Carbon Credit Program
- **Overview:**
Syngenta collaborates with farmers in North America and Europe to implement practices such as biochar application and enhanced soil management.
- **Key Features:**

- Provides digital platforms to calculate potential carbon credits.
- Facilitates direct access to voluntary carbon markets, ensuring fair pricing.
- Partners with technology companies for precise carbon measurement.
- **Impact:**
Over 5,000 farmers have participated, generating measurable carbon reductions and improved farm profitability (Syngenta, 2022).

2. Barriers Addressed by Agribusiness

Agribusinesses address several critical barriers that hinder farmer participation in carbon markets:

- **Technical Expertise:** Farmers often lack knowledge about carbon sequestration practices, measurement protocols, and market dynamics. Agribusinesses bridge this gap by:
 - Offering hands-on training through extension services and workshops.
 - Providing resources such as instructional guides and case studies tailored to local contexts.
 - Partnering with research institutions to develop location-specific solutions.
- **Verification Challenges:** Accurate monitoring and verification of carbon credits are essential for credibility in carbon markets. Agribusinesses invest in:
 - **Satellite imagery and remote sensing** to track land use changes.
 - **Soil testing technologies** for precise carbon measurements.
 - **Blockchain systems** to ensure tamper-proof verification records, reducing fraud risks.
- **Economic Constraints:** The high costs of adopting sustainable practices deter many smallholder farmers. Agribusinesses mitigate this by:
 - Offering grants, loans, or shared investment schemes.
 - Aggregating credits from multiple farmers to reduce per-unit transaction costs.
 - Providing revenue-sharing models where upfront costs are offset by a share in carbon credit profits.

3. Challenges for Agribusiness

While agribusinesses play a vital facilitative role, they encounter significant challenges in scaling their efforts:

- **Market Volatility:** The price of carbon credits can fluctuate due to changes in regulatory environments, demand from buyers, or shifts in market sentiment. This volatility:
 - Reduces the predictability of farmer earnings.
 - Discourages long-term investment in carbon market initiatives.
- **Regulatory Hurdles:** Carbon market regulations vary widely across countries and regions, making standardization difficult. Challenges include:
 - Adapting to diverse certification protocols and legal requirements.
 - Navigating complex bureaucratic processes that increase transaction costs.
 - Aligning international standards with local realities, especially for smallholders.
- **Trust Issues:** Historical exploitation in agricultural dealings has led to skepticism among farmers. Agribusinesses must:
 - Build transparent and equitable partnerships, clearly outlining profit-sharing mechanisms.
 - Involve farmers in decision-making to foster a sense of ownership and trust.
 - Demonstrate long-term commitment to farmer well-being, rather than short-term profitability.

4. Policy Implications

Policymakers play a critical role in creating an enabling environment for agribusinesses and farmers to thrive in carbon markets. Key recommendations include:

- **Standardizing Carbon Credit Protocols Globally:** A unified global framework for carbon credits can:
 - Simplify compliance for farmers and agribusinesses.
 - Increase the credibility of carbon credits in international markets.
 - Encourage cross-border investments in agricultural carbon projects.
- **Offering Subsidies for Sustainable Farming Practices:** Governments should incentivize farmers to adopt practices that generate carbon credits. This can include:
 - Direct subsidies for equipment, seeds, and labor costs associated with regenerative practices.
 - Tax breaks for agribusinesses supporting smallholder farmers in carbon markets.
- **Encouraging Public-Private Partnerships (PPPs):** PPPs can amplify the impact of agribusiness efforts by pooling resources and expertise. Examples include:
 - Collaborative pilot projects to test new carbon monitoring technologies.
 - Joint training programs for farmers, co-funded by governments and private entities.
 - Development of community-based carbon markets to ensure inclusivity and local adaptation.
- **Streamlining Regulatory Processes:** Simplified and transparent certification and verification processes reduce transaction costs and administrative burdens for both farmers and agribusinesses.
- **Promoting Fair Revenue Distribution:** Policies must ensure that farmers receive a significant share of the revenue generated from carbon credits, addressing equity concerns and encouraging broader participation.

Conclusion and Recommendations

Agribusinesses are pivotal in overcoming barriers to farmer participation in carbon markets. By acting as intermediaries, they reduce transaction costs, provide technical expertise, and ensure market access. However, their effectiveness depends on supportive policies, technological advancements, and stakeholder collaboration.

Recommendations:

- **Strengthen Capacity Building:** Invest in farmer training programs focused on carbon sequestration practices.
- **Enhance Technological Adoption:** Promote affordable and accessible tools for carbon measurement and verification.
- **Foster Collaborative Networks:** Encourage partnerships between agribusinesses, governments, NGOs, and technology providers.
- **Regulatory Reform:** Harmonize carbon credit standards and incentivize farmer participation through subsidies or tax benefits.
- **Transparency Initiatives:** Build trust with farmers through clear and fair profit-sharing mechanisms.

References

Australian Carbon Market Institute (2022). *Carbon farming in Australia: Frameworks and outcomes for sustainable agriculture*. Retrieved from [Australian Government Climate Initiatives](#).

Bayer (2022). *Carbon farming: Creating sustainable agriculture through regenerative practices*. Retrieved from [Bayer Official Website](#).

- Cargill (2022). *Regenerative agriculture and sustainability goals: Carbon credits and soil health*. Retrieved from [Cargill Sustainability Reports](#).
- Corteva Agriscience (2023). *Sustainability initiatives and carbon markets*. Retrieved from <https://www.corteva.com>
- Danone (2023). *Livelihoods Carbon Fund: Investing in sustainable practices for global carbon offsetting*. Retrieved from Danone Livelihoods Carbon Fund.
- Geels, F. W. (2011). *Sustainability transitions: A sociotechnical perspective*. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 19-32.
- Indigo Ag (2023). *Carbon by Indigo: Unlocking carbon market opportunities for farmers*. Retrieved from <https://www.indigoag.com>
- IPCC (2021). *Climate Change and Land*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch>
- Nestlé (2023). *Carbon-neutral farming practices for a sustainable future*. Retrieved from Nestlé Sustainability Commitment.
- Nori (2022). *Carbon removal made accessible*. Retrieved from <https://www.nori.com>
- Pepsico (2022). *Positive agriculture: Reducing emissions through sustainable practices*. Retrieved from Pepsico Sustainability Goals.
- Rabobank (2023). *Acorn initiative: Connecting smallholder farmers to voluntary carbon markets*. Retrieved from Rabobank Acorn Program.
- Spulber, D. F. (1996). *Market microstructure and intermediation*. *Journal of Economic Perspectives*, 10(3), 135-152.
- Syngenta (2022). *Driving carbon credits through innovative agricultural practices*. Retrieved from Syngenta Sustainability Initiatives.
- Vi Agroforestry (2021). *Empowering smallholder farmers through agroforestry for climate resilience and carbon credits*. Retrieved from Vi Agroforestry.
- Williamson, O. E. (1985). *The economic institutions of capitalism*. Free Press.
- World Bank (2022). *Agricultural carbon markets: Opportunities and challenges*. Retrieved from <https://www.worldbank.org>

HYDROCARBON POTENTIAL AND PETROLEUM SYSTEM OF THE OLIGO-MIOCENE QOM FORMATION, IRAN: A REVIEW

Ebrahim Mohammadi

Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract

The Qom Formation is the main reservoir and source rock for hydrocarbons in middle Iran. This formation is isochronous with the Asmari Formation in the Zagros Basin in southern and southwestern Iran, which is a reservoir that contains 12% of the world's oil. The Qom limestones are the reservoir for the Alborz, Sarajeh, Arun and Fakhreh oil/gas fields in Central Iran. Alborz and Sarajeh are two adjacent anticlines in Central Iran, formed at Late Miocene-Pliocene and are closely related in terms of geometry, geological setting and timing of development. Yet the Alborz anticline is an oil field producing up to 35 000 barrels of oil per day, while the Sarajeh anticline is a gas field producing over 40 million cubic feet of gas (mmsfc) per day. Despite its economic importance, existing knowledge of petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation is quite limited, and little research work on the petroleum system of the Qom Formation had been done up to now. Besides, only a few of them has been published, and most of them are unpublished or published in non-English Journals (i.e. French, German and Chinese Journals with English abstract). This paper is a review on the hydrocarbon potential and petroleum system of the Qom Formation in Central Iran back arc basin. The data presented here are based on the scattered data extracted from relevant published and unpublished works. The abundance, types and maturity of organic matter in Shemshak Formation (Jurassic) and Qom Formation (Oligocene-Miocene), and oil source correlation in Qom basin, show that the Shemshak Formation is the most possible source rock, and the Qom Formation has hydrocarbon generation potential. The Qom Formation is deposited along more than 1800 km of the NE margin of the Tethyan Seaway in the Oligocene-Early Miocene during the final sea transgression on the Iranian Plate. This formation is one of the main source rocks for the youngest petroleum of Iran.

Key words: Hydrocarbon potential, Petroleum system, Qom Formation, Alborz oil field, Oligo-Miocene

Introduction

The Qom Formation is the main reservoir and source rock for hydrocarbons (Abaie et al., 1964; Morley et al., 2009; Mohammadi et al., 2019) in Middle Iran. This formation is isochronous with the Asmari Formation in the Zagros Basin in southern and southwestern Iran, which is a well-known fractured reservoir that contains 12% of the world's oil (Xu et al., 2007; Mohammadi, 2020, 2021). The Qom limestone is the reservoir for the Alborz, Sarajeh, Arun, and Fakhreh oil/gas fields in Central Iran (Xu et al., 2007; Jalali et al., 2017; Mohammadi, 2020). In general, the Rupelian–Burdigalian (Early Oligocene–Early Miocene) Qom Formation was deposited at the northeastern margin of the Tethyan Seaway (during the final sea transgression on the Iranian Plate) in three northwest–southeast-trending basins (> 1800 km length), including the Central Iran back-arc basin, the Urumieh–Dokhtar magmatic arc (intra-arc) basin, and the Sanandaj–Sirjan fore-arc basin (Fig. 1; Mohammadi et al., 2011, 2013, 2015, 2019; Mohammadi, 2020, 2021, 2023a,b, 2024).

Despite its economic importance, existing knowledge of the petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation is quite limited, and little research work on the petroleum system of the Qom Formation has been done up to now (Mohammadi & Rahmani, 2018). Besides, only a few of them has been published, and most of them are unpublished or published in non-English Journals (i.e. Persian, French, German and Chinese Journals with English abstract). This paper is a review on the hydrocarbon potential and petroleum system of the Qom Formation in the Central Iran back arc basin. Therefore, the aim of this article is 1) to review the petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation based on scattered data available in relevant published and unpublished works; and 2) to introduce studies related to the petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation to those who are interested.

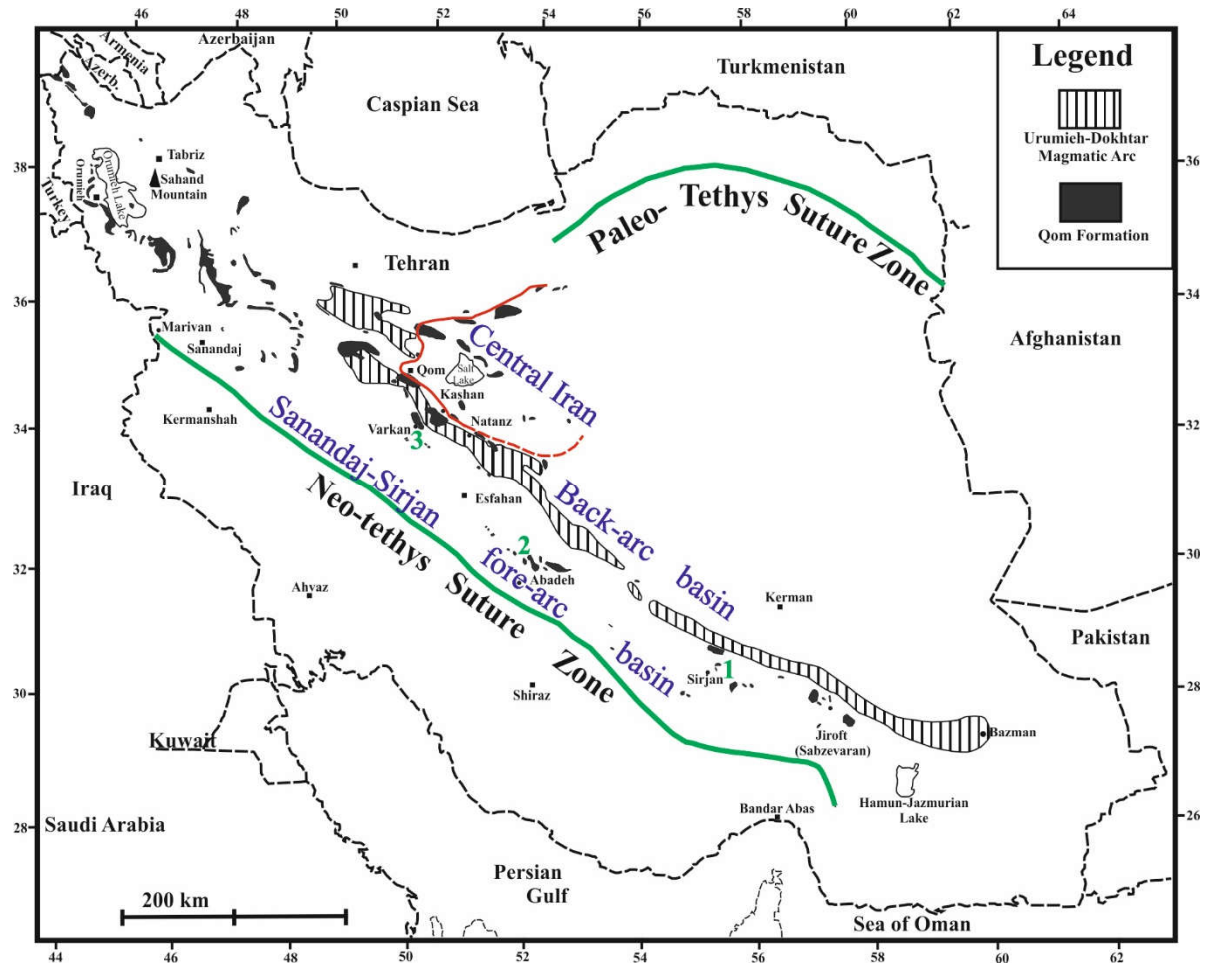


Figure 1. Map showing the distribution of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, the Qom Formation outcrops, evaporate deposits (concave side of the red line), and suture zones of Paleotethys and Neotethys in Iran (Mohammadi, 2021d).

Materials and Methods

Despite its economic importance, existing knowledge on the petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation is quite limited. Due to the economic significance (hydrocarbon resources) and the connective role between the eastern Tethys (the proto-Indian Ocean) and the western Tethys (the proto-Mediterranean Sea) regions, during the past 16-17 years, the author's studied on different properties of Qom Formation, including: biostratigraphy, foraminifera, corals, ostracods, microfacies and paleoenvironment, sequence stratigraphy, Paleoecology, event stratigraphy, Tethyan Seaway transgression trend (Mohammadi et al., 2008, 2009, 2010, 2011, 2013a,b, 2014, 2015, 2016, 2019, 2022; Mohammadi, 2009, 2014, 2020a,b, 2021a,b,c,d,e, 2022a,b, 2023a,b, 2024; Safari et al., 2014, 2020; Mohammadi & Ameri, 2015, 2017, 2018, 2024; Mohammadi & Rahmani, 2018; Sadeghi et al., 2018; Mohammadi & Hassani, 2021; Ghaedi et al., 2022; Mohammadi & Kiani Shahvandi, 2023; Mohammadi & Nikfard, 2023; Mohammadi & Ghaedi, 2024a,b; Mohammadi & Sadeghi, 2024). However, the author's knowledge on the petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation is quite limited. Besides, there is no comprehensive and complete information on the topic. An attempt, therefore, was made to investigate all literature related to the Qom Formation and to collect all data (available in various articles) related to the hydrocarbon potential of the Qom Formation. Then, the collected information was categorized and the petroleum potential of the Qom Formation was analyzed and interpreted based on the available data.

Findings and Discussion

Geological investigation of the Qom Formation started with the work of Loftus (1855). After oil was discovered in porous bioclastic limestones in 1934, the Qom Formation moved into the focus of scientific research as many authors studied different properties of it (Mohammadi et al., 2011; 2015; Mohammadi, 2021c,d). Exploration for hydrocarbons in the Central Iran Basin began in the early decades of the 20th century, and indications of oil were first reported in a Qanat (underground water channel) to the south of Qom in 1934 (Gansser, 1956; Abbasi et al., 2020). Oil indications were first found in the vicinity of Qom in north central Iran in 1934, when a freshly-dug irrigation ditch began to fill with oil (Mostofi & Gansser, 1957; Rosenberg, 1975). Between 1951 and 2016, a total of 45 exploration, appraisal and development wells were drilled across the western part of the Central Iran Basin where the Alborz, Sarajeh and Aran fields are hydrocarbon discoveries (Abbasi et al., 2020).

An overview of 90 years of exploration efforts in the western part of the Central Iran Basin resulted in interesting findings. According to Economist (2020) the most significant discoveries in the Western Central Iran Basin are the Alborz, Sarajeh and Aran fields (Fig. 2; Abbasi et al., 2020; Mohammadi, 2020b, 2021d). Alborz-5 (A-5) drilled in 1956, penetrated about 2300 m of Cenozoic clastics and 380 m of underlying evaporites in the Miocene Upper Red Formation (Abaie et al., 1964; Gansser, 1956). The well then drilled 5 cm into the highly-overpressured fractured limestones of the Qom Formation, at which point it blew out violently. The well bridged itself after 82 days, during which an estimated 5-7 million barrels of oil had escaped together with large volumes of gas (Birks, 1963; Gretener, 1982). Subsequently, over the period between 1957 and 1962, six development wells were drilled on the Alborz field and about 5.2 million barrels of oil were produced (Abbasi et al., 2020). The Sarajeh gas-condensate field, discovered in 1959, was the second discovery made in the Qom sub-basin (Gretener, 1982). The Aran/Arun oil and gas field, discovered in 2004, was the first discovery to be made in the Kashan sub-basin (Xu et al., 2007). In 2010, the Sialk prospect was drilled in the northern Kashan sub-basin. Although the well failed to reach the planned depth (~ 5000 m) due to technical problems, several oil and gas shows were recorded in the upper part of the Qom Formation. (Abbasi et al., 2020). Less successful exploration efforts included the wells drilled on the Taraz Naeen anticline and South Siah Kuh anticline which failed to reach the Qom Formation because top-formation reflectors were incorrectly identified. Wells have also been drilled on the Yourt Shah and Fakhreh anticlines, but were either dry or yielded non-commercial hydrocarbons. At Yourt Shah, the reservoir is considered to have potential for gas storage. (Jalali et al., 2017; Abbasi et al., 2020).

A petroleum system composed of source rock, reservoir rock and cap rock. Due to its diverse facies and microfacies types, the Qom Formation can act as source rock, reservoir rock and cap rock, providing all the components of an effective oil system (Fig. 3; e.g., Rezaei & Honarmand, 2001; Aftabi Arani et al., 2023).

Potential source rocks in the Central Iran Basin have been the subject of some debate. Extensive geochemical analyses of surface samples, cores and oil samples have pointed to two candidate source rocks: organic-rich mudstones in the Qom e- and c-members (Morley et al., 2013; Schmidt & Sweintek, 2010); and Jurassic shales in the Shemshak Formation (Fig. 3; Research Institute of Petroleum Industry, 1996; Wang et al., 2004b; 2009; Shengli Oilfield Company, 2005; SINOPEC, 2006; Abbasi et al., 2020). However, according to Xu et al. (2009), in the Kashan area there are three sets of source rocks of Jurassic Shemshak Formation, Cretaceous mudstone and Qom Formation.

According to Wang et al. (2004b), the organic matter of the Shemshak Formation entered into the oil window in the Early Cretaceous, and evolved into wet gas and condensate window in about 17 Ma. Based on Schmidt and Sweintek (2010), hydrocarbon generation from the Qom e-member in general occurred between 15 Ma and 5 Ma, after which generation ceased due to uplift. Morley et al. (2013) suggested that hydrocarbon generation had been completed by 6 Ma, and showed that the main stage of expulsion from the Qom source rock took place between 10 Ma and 6 Ma (Abbasi et al., 2020).

Generated hydrocarbon reserved in the reservoir rocks. porous and fractured limestones in the Qom e-member are the major reservoir rocks; carbonates in the Qom c-member serve as a secondary reservoir, particularly in the Qom sub-basin (Fig. 3; Abbasi et al., 2020).

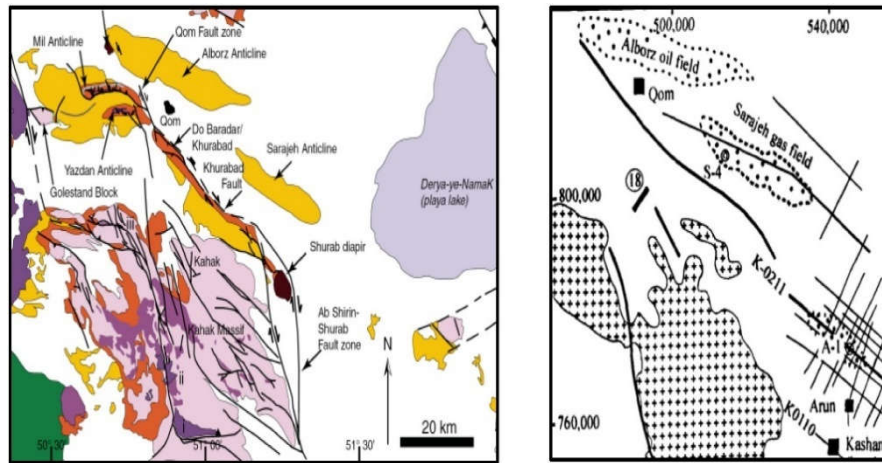


Figure 2. Location of the Alborz, Sarajeh, and Arun oil/gas fields in Central Iran (Left: Morley et al. 2009; Right: XU et al., 2007)

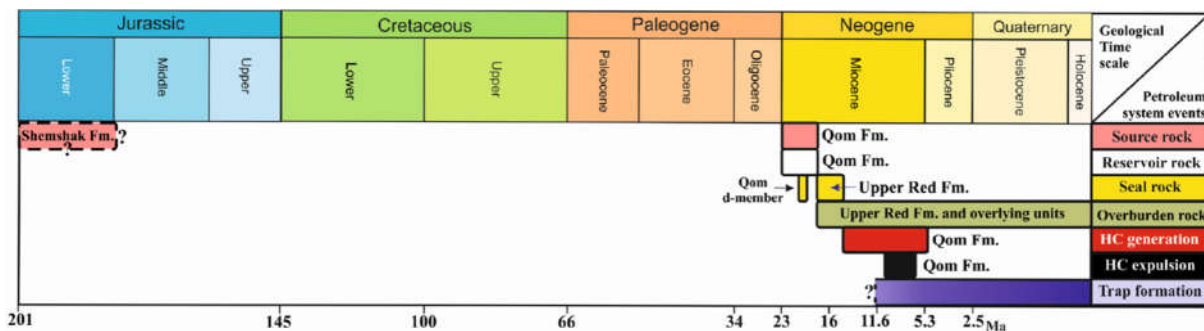


Figure 3. Petroleum system event chart for the western part of the Central Iran Basin (Abbasi et al., 2020).

Hydrocarbon generation and expulsion from the Qom source rock unit occurred during the middle and late Miocene (Wang et al., 2004b; 2009). Major hydrocarbon traps are NW-SE oriented, and trap evolution occurred during late Miocene – Pliocene compression (Morley et al., 2013; Abbasi et al., 2020).

Evaporitic or mudstone intervals in the basal part of the Upper Red Formation act as an effective seal. The sealing lithologies in the Sarajeh, Alborz and Sialk anticlines consist of salt and anhydrite. The average thickness of the evaporites (cap rock) is 105 m and 220 m in the Sarajeh and Alborz anticlines, respectively (Abaei et al., 1964; Abbasi et al., 2020). Apart from the Upper Red Formation evaporites, anhydrites in the Qom d-member are regarded as a secondary cap rock. (Fig. 3; Abbasi et al., 2020).

The fields so far discovered in the Central Iran Basin (Alborz, Sarajeh and Aran) occur where a complete stratigraphic sequence of the Qom Formation is present. Where the formation is thin or incomplete, as for example at the Yourt Shah structure, drilling results are disappointing (Abbasi et al., 2020).

Conclusion and Recommendations

The Qom Formation is the main objective of oil and gas exploration and is the main reservoir and source rock for hydrocarbons in central Iran (Abaie et al., 1964; Morley et al., 2009). The Qom Formation is both the main reservoir and source-rock interval, secondary seals also exist within the Qom Formation (Morley et al., 2013). Two potential source rocks have been proposed in the Central Iran Basin: mudstones in the Qom e- and c-members, and Jurassic shales in the Shemshak Formation. Hydrocarbon generation and expulsion from the Qom source rock unit occurred during the middle and late Miocene (Abbasi et al., 2020). There are two very good sets of source, reservoir and cap rock. One is composed of the lithologic units of Sub-Member C3 to the D-Member, the other is the F-Member (Xu et al., 2007). Alborz and Sarajeh are two adjacent anticlines in Central Iran, formed at Late Miocene-Pliocene and are closely related in terms of geometry, geological

setting and timing of development. Yet the Alborz anticline is an oil field producing up to 35 000 barrels of oil per day, while the Sarajeh anticline is a gas field producing over 40 million cubic feet of gas (mmsfc) per day (Abaie et al., 1964; Gretener, 1982; Morley et al., 2013).

Thanks and Information Note

Chavare Bayazidi and Dr. Mehdi Ghaedi are thanked for valuable help, and suggestions.

References

- Abaie, I.L., Ansari, H.J., Badakhshan, A. & Jaafari, A. (1964). History and development of the Alborz and Sarajeh fields of Central Iran. *Bulletin of Iranian Petroleum Institute*, 15, 561–574.
- Abbasi, G., Motamedi, H., Orang, K. & Nickandish, A.A. (2020). Petroleum geology of the western part of the Central Iran basin. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 43(2), 171-190.
- Aftabi Arani, A., Ashouri, A.R., Daneshian, J., Ghaderi, A. & Wood, D.A. (2023). Biostratigraphy, microfacies, and reservoir quality of the Oligocene Qom Formation (Kharzan Section, Northwest of Ardestan, Central Iran). *Geological Quarterly*, 67(3), 1-24.
- Gansser, A. (1956). The oil discovery of Qum (Iran). *National Iranian Oil Company Geological Report*, 22 pp.
- Gansser, A. (1957). Die geologische erforschung der Qum gegend, Iran. *Bulletin der Verengung Schweizerisches Petroleum Geologen und Ingenieur*, 23, 1-16.
- Ghaedi, M., Yazdi, M., Mohammadi, E., & Bahrami, A. (2022). Ichnological analysis of the Miocene marine deposits of Makran (SE Iranjaz): implication for paleoenvironmental interpretations. *Carbonates and Evaporites*, 37, 1-15.
- Gretener, P.E. (1982). Another look at Alborz Nr. 5 in central Iran. *Bulletin der Vereinigung Schweitzerisches Petroleum Geologen und Ingenieur*, 48, 1-8.
- Jalali, M., Sadeghi, A. & Adabi M.H. (2017). Microfacies, sedimentary environment and sequence stratigraphy of the Qom Formation in Yort e Shah no-1 well and Morreh Kuh surface section (South of Tehran). *Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 33, 25-48 (in Persian).
- Loftus, W.K. (1855). On the geology of portions of the Turko-Persian frontier, and of the districts adjoining. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 11(pt 1), 247–344.
- Mohammadi, E., (2009). Biostratigraphy, microfacies and sedimentary environments of the Qom Formation in Jaze area (south of Kashan). *Unpublished MSc. Dissertation*, University of Isfahan, 157 pp. (in Persian).
- Mohammadi, E. (2014). Systematics and paleoecology of the ostracods and foraminifera of the Oligo–Miocene Qom Formation in Qom and Esfahan–Sirjan sedimentary basins. *Unpublished PhD thesis*, Shahid Bahonar University of Kerman, 362 pp. (in Persian).
- Mohammadi, E. (2020a). An introduction to stratigraphy and paleontology of the Qom Formation in southeast of the Kerman province. *The 5th National Geology and Mining Explorations Symposium*, Kerman, 8 pp (in Persian).
- Mohammadi, E. (2020b). Sedimentary Facies and Depositional Environments of the Oligocene–Early Miocene Marine Qom Formation, Central Iran Back-Arc Basin, Iran (Northeastern Margin of the Tethyan Seaway). *Carbonates and Evaporites*, 35, 1–29.
- Mohammadi, E. (2020c). Sequence stratigraphy of the Qom Formation in the Sirjan–Abadeh region. *Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 82, 67-94 (in Persian).
- Mohammadi, E. (2021a). Conglomerate and sandstones of the Qom Formation: temporal and spatial distribution and depositional environments. *Proceeding of the 14th symposium of Iranian paleontological society*. Graduate University of Advanced Technology, Kerman, 79-90 (in Persian).

- Mohammadi, E. (2020b). Foraminiferal morphogroups of the Qom Formation in E Sirjan and SW Kashan: implication for paleoenvironmental and paleoecological interpretations. *Iranian Journal of Petroleum Geology*, 20, 82-94 (in Persian).
- Mohammadi, E. (2021c). Oligo-Miocene Coral Reefs. *Proceeding of the 14th symposium of Iranian paleontological society*. Graduate University of Advanced Technology, Kerman, 91-97 (in Persian).
- Mohammadi, E. (2021d). Sedimentary facies and paleoenvironmental interpretation of the Oligocene larger-benthic-foraminifera-dominated Qom Formation in the northeastern margin of the Tethyan Seaway. *Palaeoworld*, 30, 356–372.
- Mohammadi, E. (2021e). Sequence stratigraphy of the Qom Formation in the Natanz-Qom region. *Advanced Applied Geology*, 18, 113-132 (in Persian).
- Mohammadi, E. (2022a). Evolution and Geological Significance of Larger Benthic Foraminifera (by BouDagher-Fadel, M.K., 2018). Translated into Persian. *Ferdowsi University of Mashhad Press*. 748 pp (in Persian).
- Mohammadi, E. (2022b). Temporal and spatial distribution of the Qom Formation pyroclastic deposits with special emphasis on SE Kerman Province: Their application in (tephra) event stratigraphy. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 87, 117-134 (in Persian).
- Mohammadi, E. (2023a). Foraminiferal biozonation, biostratigraphy, and trans-basinal correlation of the Oligo-Miocene Qom Formation, Iran (northeastern margin of the Tethyan Seaway). *Palaeoworld*, 32, 156–173.
- Mohammadi, E. (2023b). Introducing the newly-established “Varkan Member” in SW Kashan as the oldest member of the Qom Formation: *Advanced Applied Geology*, 13(1), 364–383 (in Persian).
- Mohammadi, E. (2024). Re-examination of biostratigraphy and age interpretations in the Sanandaj–Sirjan and Central Iran basins (NE margin of the Tethyan Seaway). *Journal of Foraminiferal Research*, 54, 202–216.
- Mohammadi, E. & Ameri, H. (2015). Biotic components and biostratigraphy of the Qom Formation in northern Abadeh, Sanandaj–Sirjan fore-arc basin, Iran (northeastern margin of the Tethyan Seaway). *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 10789–10802.
- Mohammadi, E. & Ameri, H. (2017). Microfacies analysis and depositional model of the Qom Formation in the Khurabad area (southeastern Qom). *Researches in Earth Sciences*, 28, 37–58 (in Persian).
- Mohammadi, E. & Ameri, H. (2018). Facies, depositional environment and depositional model of the Qom Formation in northern Abadeh (Sanandaj–Sirjan fore-arc basin). *Sedimentary Facies*, 26, 30 pp (in Persian).
- Mohammadi, E., Ameri, H., 2024, Foraminiferal biostratigraphy and Paleoecology of the southeasternmost outcrops of the Oligocene Qom Formation, SE Iran: *Journal of the Geological Society of India*, 100, 115-126.
- Mohammadi, E., Ameri, H., Ghaedi, M., Vaziri, M.R., Dastanpour, M. & Sadeghi, R. (2016). Biostratigraphy, microfacies and depositional model of the Qom Formation in northeastern Natanz (southeastern Qom back-arc basin). *Paleontology* 3,1–24 (in Persian).
- Mohammadi, E. & Ghaedi, M. (2024a). Biostratigraphic and Geological Significance of Planktonic Foraminifera (by BouDagher-Fadel, M.K., 2015). Translated into Persian. Graduate University of Advanced Technology Press, 405 pp (in Persian).
- Mohammadi, E. & Ghaedi, M. (2024b). Diversity and paleoecological significance of zooxanthellate corals of Oligocene Qom Formation, SE Iran. *Earth Sciences Research Journal*, 28, 127-137.
- Mohammadi, E., Ghaedi, M., Rameh, H., Sadeghi, R., Ahmadi, T. & Vaziri, M.R. (2022). Foraminiferal morphogroups of the Qom Formation in the Natanz and Qom regions: implication for paleoenvironmental and paleoecological interpretations. *Advanced Applied Geology*, Vol 12 (1), 75-89 (in Persian).
- Mohammadi, E., Hasanzadeh-Dastgerdi, M., Ghaedi, M., Dehghan, R., Safari, A., Vaziri-Moghaddam, H., Baizidi, C., Vaziri, M. & Sfidari, E. (2013a). The Tethyan Seaway Iranian Plate Oligo-Miocene deposits (the Qom Formation): distribution of Rupelian (Early Oligocene) and evaporate deposits as evidences for timing and trending of opening and closure of the Tethyan Seaway. *Carbonates and Evaporites*, 28, 321–345.

- Mohammadi, E., Hasanzadeh-Dastgerdi, M., Safari, A. & Vaziri-Moghaddam, H. (2019). Microfacies and depositional environments of the Qom Formation in Barzok area, SW Kashan, Iran. *Carbonates and Evaporites*, 26, 255–271.
- Mohammadi, E. & Hassani, M.J. (2021). Paleoecology of the Qom Formation ostracods in eastern Sirjan and southwestern Kashan (Sanandaj–Sirjan fore-arc basin). *Geosciences*, 120, 65-78 (in Persian).
- Mohammadi, E. & Kiani Shahvandi, M. (2023). Changes of the Chronostratigraphic Chart of the Oligocene-Lower Miocene during the last 20 years and its effects on biozones of Qom and Asmari formations. *16th Conference of the Iranian Paleontological Society*. Tabriz. 111-116 (in Persian).
- Mohammadi, E. & Nikfard, M. (2023). Scrutiny of the newest Biozonation of the (Oligo-Miocene) Qom and Asmari formations. *16th Conference of the Iranian Paleontological Society*. Tabriz. 105-110 (in Persian).
- Mohammadi, E. & Rahmani, A. (2018). A review of petroleum system and hydrocarbon potential of the Qom Formation (Oligo-Miocene). *4th Symposium of Sedimentological Society of Iran*. Zanjan, 884-890 (in Persian).
- Mohammadi, E. & Sadeghi, R. (2024). The lower parts of the Oligo–Miocene Qom Formation in the Kegharaki (SE Jiroft) and Shurab (SE Qom) areas: biostratigraphy, microfacies, and depositional environments. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 97, 23-40 (in Persian).
- Mohammadi, E., Safari, A. & Vaziri-Moghaddam, H. (2008). Lithostratigraphy of the Qom Formation in Jaze area (south of Kashan). *2nd Conference of the Iranian Paleontological Society*. Isfahan (Khorasgan Islamic Azad University) (in Persian).
- Mohammadi, E., Safari, A., Vaziri-Moghaddam, H. & Dastanpour, M. (2010). Biostratigraphy of the Qom Formation in Jaze area (south of Kashan). *4th Conference of the Iranian Paleontological Society*. Shiraz (Islamic Azad University). 5 pp (in Persian).
- Mohammadi, E., Safari, A., Vaziri-Moghaddam, H. & Mohammadi Monfared, M. (2009). Microfacies analysis and depositional environment of the Qom Formation in the Jazeh area (South of Kashan). *Sedimentary Facies*, 1, 81-94 (in Persian).
- Mohammadi, E., Safari, A., Vaziri-Moghaddam, H., Vaziri, M.R. & Ghaedi, M. (2011). Microfacies analysis and paleoenvironmental interpretation of the Qom Formation, south of the Kashan, central Iran. *Carbonate and Evaporites*, 26, 255–271.
- Mohammadi, E., Vaziri, M.R. & Dastanpour, M. (2013b). The last paleontologic and sedimentologic findings on the Qom Formation. *The 1st Geological Conference of the Iranian Plateau*, Kerman (Mahan), 11 pp (in Persian).
- Mohammadi, E., Vaziri, M.R. & Dastanpour, M. (2014). Microfacies analysis and depositional environment reconstruction of the Qom Formation, Sirjan area, southwest of the Kerman. *Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 55, 35–54 (in Persian).
- Mohammadi, E., Vaziri, M.R. & Dastanpour, M. (2015). Biostratigraphy of the Nummulitids and Lepidocyclinids bearing Qom Formation based on Larger Benthic Foraminifera (Sanandaj–Sirjan fore-arc basin and Central Iran back-arc basin, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 403-423.
- Morley, C.K., Kongwung, B., Julapour, A.A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D., Warren, J., Otterdoom, H., Srisuriyon, K. & Kazemi, H. (2009). Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in central Iran: the Central Basin in the Qom-Saveh area. *Geosphere*, 5, 1-38.
- Morley, C.K., Kongwung, B., Waples, D., Warren, J., Julapour, A.A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Otterdoom, H., Srisuriyon, K., Kazemi, H. & Rawanchaikul M. (2008). Impact of structural history and style on the petroleum system of the Central Basin in the Saveh-Qom area, Iran. *8th Middle East Geosciences Conference*, GEO 2008. GeoArabia, Abstract, v. 13, no. 1, p. 206.
- Morley, C.K., Waples, D.W., Boonyasaknanon, P., Julapour, A.A. & Loviruchsutee, P. (2013). The origin of separate oil and gas accumulations in adjacent anticlines in Central Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 44, 96-111.

- Mostofi, B. & Gansser, A. (1957). The Story behind the 5 Alborz. *Oil and Gas Journal*, January 21, 55, 78-84.
- Rezaei, M.R. & Honarmand, J. (2001). Controller parameters the reservoir quality of Qom Formation in Alborz field, Qom basin, Central Iran (in Persian). *Tehran University Science Journal*, 27, 1–6 (in Persian).
- Rosenberg, R. (1975). Qum-1956: a misadventure in Iranian Oil. *Business History Review*, Cambridge University Press, 49, 81–104.
- Sadeghi, R., Vaziri-Moghaddam, H. & Mohammadi, E. (2018). Biofacies, depositional model, and sequence stratigraphy of the Asmari Formation, Interior Fars sub-zone, Zagros Basin, SW Iran. *Carbonates and Evaporites*, 33, 489–507.
- Safari, A., Ghanbarloo, H. & Mohammadi, E. (2020). Microfacies, sedimentary environment, and sequence stratigraphy of the Qom Formation in the Maragh area (Southwest of Kashan). *Iranian Journal of Petroleum Geology*, 20, 94 41-61 (in Persian).
- Safari, A., Mohammadi, E. & Ameri, H. (2014). Analysis of the Qom Formation microfacies and controlling factors on their deposition, Varkan area (Southwest of Kshan), Sanandaj-Sirjan fore arc basin. *Paleontology*, 2, 187–204 (in Persian).
- Schmidt, R. & Sweintek, O. (2010). 1D Basin and Petroleum System Modeling in Saveh, Kashan and Zavareh (Central Iran Sedimentary Basin). *National Iranian Oil Company Geological Report*, no. 2203, 69 pp.
- Wang S.H., Li, Z., Zhu, R.F., Zhou, W. & Liu, Q. (2004a). A primary study on petroleum accumulation in the Qom basin; Iran. *Petroleum Geology and Experiment*, 260, 126-248.
- Wang S.H., Li, Z., Zhu, R.F., Zhou, W. & Liu, Q. (2004b). Petroleum system in Qom Basin, Iran. *Petroleum exploration and development*, 31(4), 139-142.
- Wang, G.Z., Liu, S., Shi, H.X., Xu, G.Q., Zhou W., Xum G.S., Zhum Q. & Yong, Z.Q. (2009). Geochemistry trace of hydrocarbon-bearing fluid source in qom formation from Kashan block, Iran. *Journal of Chengdu University of Technology* (Science and Technology Edition), 29(2), 72 – 77
- Xu, G., Zhang, S., Li, Z., Song, L. & Liu, H. (2007). Carbonate sequence stratigraphy of a back-arc basin: A case study of the Qom Formation in the Kashan area, central Iran. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 81(3), 488–500.
- Xu, X.K., Liu, S., Shi, H.X., Xu, G.Q. & Zhou, W. (2009). The hydrocarbon geology conditions of kashan area in central iranian basin. *Journal of Southwest Petroleum University* (Sci Technol Edn), 7, 62-68.



THE MICROCLIMATE OF SCREEN HOUSE: AN OPTIMAL ENVIRONMENT FOR GROWTH, DISEASE RESISTANCE, AND QUALITY FRUIT DEVELOPMENT IN SOLANACEOUS CROPS (CHERRY TOMATO AND CHILI)

Farhan Ahmad¹, Kusumiyati Kusumiyati^{1*}, Mochamad Arief Soleh¹, Muhammad Rabnawaz Khan², Ristina Siti Sundari³

¹ Department of Agronomy, Agricultural Faculty. Universitas Padjadjaran. Jl. Bandung-Sumedang km 21 Jatinangor, Sumedang. West Java. Indonesia

² Department of Agronomy, Faculty of Crop Production Sciences, The University of Agriculture Peshawar, Peshawar. Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan

³ Department of Agribusiness, Faculty of Agriculture, Universitas Perjuangan. Jl. PETA No. 177 Tasikmalaya, West Java. Indonesia

Abstract

For solanaceous crops like cherry tomatoes and chili, screen houses offer a regulated microclimate that protects plants from harmful environmental stresses and infections, improving development, production, and fruit quality. Since these crops are susceptible to light, humidity, and temperature changes, screen buildings provide a better-growing environment than open fields. This systematic review investigates the effects of screen house microclimate on solanaceous crop growth, fruit quality, and disease resistance. Data comparing fruit quality, production, and the occurrence of pests and diseases between screen houses and other farming systems—like open fields and greenhouses—were gathered from multiple peer-reviewed research. The crops produced in screen houses were regularly found to have higher levels of disease resistance, enhanced fruit firmness, and greater marketability. The incidence of diseases, especially fungal infections, was considerably lower in screen house circumstances because of the controlled environment, which makes it less favorable for the growth of pathogens. Additionally, cherry tomatoes and chili cultivated in screen houses produced superior commercial yields due to increased fruit quality metrics like size, color, and antioxidant levels. A meta-analysis of disease incidence and yield from multiple studies is also included in the paper, offering statistical support for the advantages of screen house cultivation. The economic ramifications for farmers are covered in the conclusion, focusing on the enhanced profitability even with the early setup expenditures.

Keywords; Screen house microclimate, disease resistance, fruit quality, marketable fruits, protected cultivation

Introduction

Solanaceous crops are critical agricultural products with a rising global demand, especially cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) and chili peppers (*Capsicum annuum*) (Kumar et al., 2021). These crops are highly prized for their nutritional worth as well as their commercial significance in international markets (M. T. Islam, 2011). However, environmental conditions frequently challenge their development, particularly in open-field systems (Ge et al., 2022). Extremes in temperature, moisture content, and light intensity can cause poor growth, lower yields, and heightened vulnerability to pests and diseases in cherry tomatoes and chili. Solanaceous crops grown in open fields are subject to erratic weather patterns, leading to erratic yields and heightened susceptibility to diseases such as viral infections, late blight, and bacterial wilt (Shamshiri et al., 2018). Similarly, although greenhouses offer a more regulated atmosphere, they can also attract certain pests and diseases because of their high humidity and enclosed space and their high energy expenses (Dayan et al., 1993). Screen houses have evolved as a sustainable and cost-effective alternative for reducing the limits of both open-field and greenhouse systems. They offer a semi-controlled environment that permits natural ventilation and light penetration while protecting from excessive rainfall, pests, and diseases (Chapagain et al., 2012). Screen houses preserve a microclimate conducive to crop growth, lowering the need for chemical inputs and improving fruit quality (Pickens et al., 2020). In addition to reducing the prevalence of diseases and pests, screen houses enhance solanaceous crops' morphological and physiological

characteristics. To increase photosynthesis, water use efficiency, and nutrient uptake, for example, screen houses can assist in maintaining an ideal temperature range, lessen humidity changes, and provide controlled light settings (Chaudhry & Sidhu, 2022). These benefits result in increased yields and improved quality of marketable fruit, which are essential for commercial and small-scale growers (Teitel, 2007). This systematic review aims to assess how screen house microclimates affect cherry tomato and chili plant growth, disease resistance, and fruit quality, with a particular emphasis on marketable production. The review synthesizes data from multiple studies, presents a comparative analysis with alternative farming methods, and examines the economic consequences of adopting screen house systems for these crops.

Materials and methods

Scopus, PubMed, Google Scholar, and Web of Science databases were used to review the literature systematically. Combinations of the terms "screen house," "microclimate," "Solaneous crops," "cherry tomato," "chili," "disease resistance," "fruit quality," and "marketable yield" were among the search results. Peer-reviewed studies that contrasted screen house agriculture with other farming practices, such as open-field and greenhouse farming, were the main emphasis of the studies published between 2000 and 2023.

Data extraction

Data about fruit quality, insect infestation, disease incidence, yield, and growth characteristics were retrieved. The categories created from the retrieved data were determined by the types of cultivation used (greenhouse, open field, screen house). Key results, including disease incidence and yield, may be compared to tabulated data (Table 1).

Study	Crop	Cultivation method	Yield (tons/ha)	Disease incidence (%)
(Smith et al., 2019)	Cherry tomato	Screen house	35.5	12.3
(Kim et al., 2022), (Ahmad et al., 2023)	Chili	Open field	28.7	34.5
(A. H. M. S. Islam et al., 2020)	Cherry tomato	Greenhouse	31.2	25.7
(Ge et al., 2022) (Rajasekar et al., 2013)	Chili	Screen house	33.8	10.8

Study selection process

Reported on the impact of screen house microclimates on solanaceous plants, such as chili and cherry tomato. Metrics include fruit quality, yield, pest incidence, and disease resistance. Conducted tests using similar crop varieties, irrigation systems, and pest control techniques.

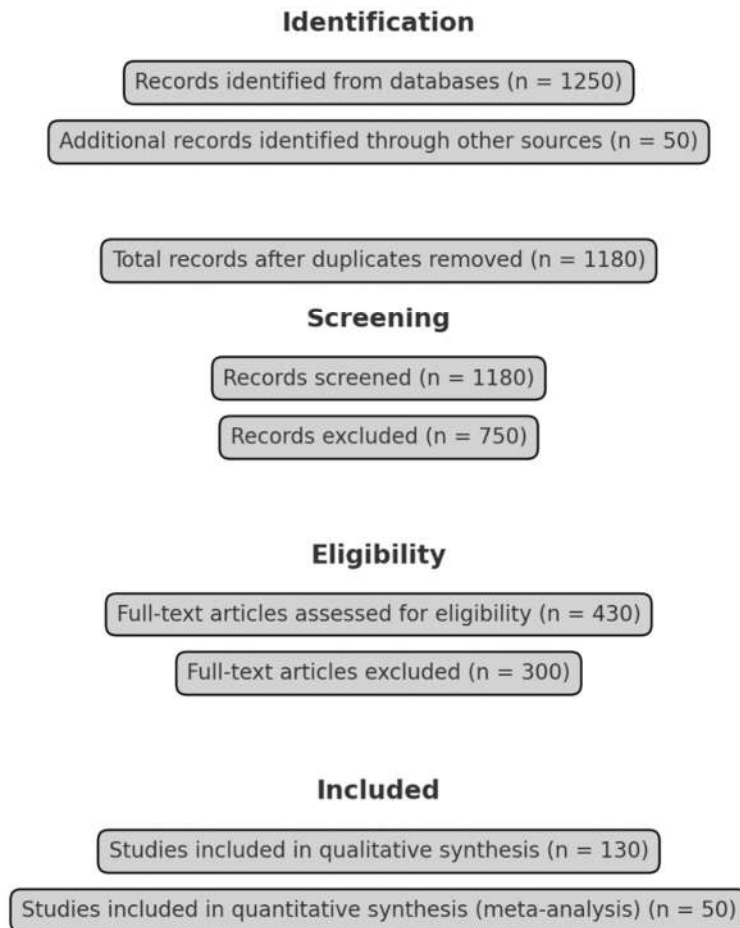


Figure 1.

Research was only included if they considered genetic modification without environmental information. The study selection followed the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines. This process involved several steps:

Data Analysis

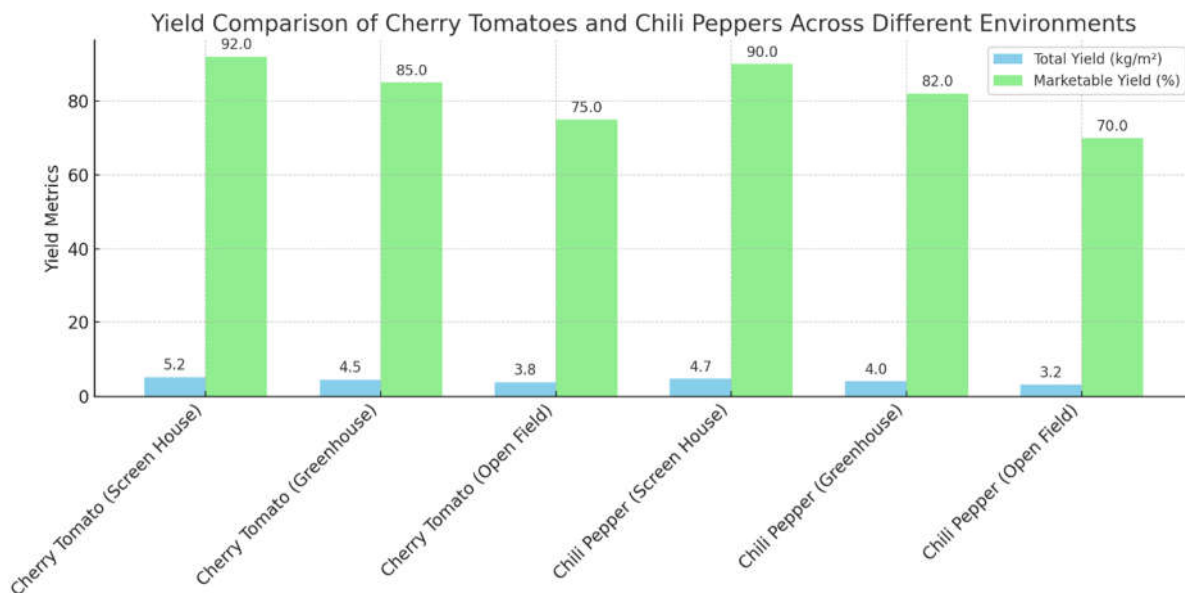
A meta-analysis was performed using a random-effects model. The analysis focused on quantifying the effects of the screen house microclimate on key parameters, such as yield and disease resistance. SPSS software was employed to perform descriptive statistics and assess overall trends.

Results and discussion

Crop	Growing environment	Plant height (cm)	Leaf Area (cm ²)	Biomass (g/plant)
Cherry tomato	Screen house	120	218	625
Chili pepper	Screen house	100	247	548
Cherry tomato	Greenhouse	110	231	597
Chili pepper	Greenhouse	95	254	481
Cherry tomato	Open field	90	179	434
Chili pepper	Open field	87	160	382

Several research findings show that screen house horticulture routinely beats open-field farming in terms of output for cherry tomatoes and chili. The controlled microclimate, which lessens environmental pressures like heat and water loss and promotes more constant growth and fruit development, is responsible for this boost in

production (Kesumawati et al., 2020). Diseases like late blight in tomatoes and anthracnose in chili peppers are far less common in screen houses because they act as a barrier against various airborne and soil-borne pathogens (Sharma et al., 2017). The incidence of disease in chili plants planted in open fields exceeds than in plants grown in screen houses (Ruiz-Nieves et al., 2021). Because screen houses are semi-protected, they reduce the risk of contracting diseases linked to moisture by controlling humidity levels and enhancing air circulation (Kusumiyati et al., 2023). The studies demonstrate that one of the most notable benefits of screen house agriculture is the increase in total and marketable yield. The ideal growing conditions offered by the screen house environment increased fruit set and decreased post-harvest losses from pests and diseases (Masabni et al., 2016).



Crops produced in screen houses had higher fruit quality characteristics like firmness, size, and sugar content. Compared to cherry tomatoes cultivated in open fields, the cherry tomatoes grown in screen houses had an increase in firmness and a 10% rise in sugar content (Kotilainen et al., 2018). The screen house's regulated lighting and comfortable temperature promote consistent ripening, which lessens fruit flaws like sunscald and cracking (Gustiar et al., 2023). Although the initial investment in screen house infrastructure can be significant, the long-term economic benefits outweigh the expenditures (Subiastuti et al., 2021). Farmers benefit from enhanced marketability and higher earnings due to the higher yield, lower disease-related losses, and higher-quality fruits. The return on investment for screen house cultivation may be attained within two growing seasons due to reduced pesticide use and improved fruit sales (Sumiyati et al., 2021). By preserving ideal temperatures and lowering water stress, screen houses improved the growth of cherry tomato plants, increasing their vegetative growth. Compared to plants in open fields, more constant development was possible in screen houses due to the decreased wind exposure and pest pressure (Kesumawati et al., 2020). A microclimate created by screen houses differs from open fields and greenhouses. While reducing the extremes of the outside weather, the semi-protected environment provides natural light and ventilation advantages (Mudiyanti et al., 2019). This balance is especially advantageous for solanaceous crops, which are susceptible to changes in the environment. To prevent heat stress during peak hours and regulate temperature, the screen house reduces exposure to direct sunshine (Hemming et al., 2020). This is especially important for crops like cherry tomatoes that are vulnerable to sunscald. A screen house's partially enclosed atmosphere maintains ideal humidity levels necessary for both development and disease control (Razmjoo et al., 2008).

Conclusion

This systematic analysis highlights the many benefits of growing solanaceous crops—cherry tomatoes and chili peppers in screen houses by creating a microclimate. In addition to improving growth circumstances, the regulated environment that screen houses offer is essential for boosting disease resistance, lowering insect populations, and raising fruit quality overall. Screen houses produce a microclimate that protects crops from

harsh external influences, including excessive heat, heavy rainfall, and pest invasions, in contrast to more exposed growth situations like open fields. The crops' improved growth characteristics, including biomass, leaf area, and plant height, result from this shielding effect, making their growth cycle steadier and more predictable. In addition, the research showed that screen houses greatly lower the incidence of disease in comparison to open fields and even greenhouses while encouraging higher resistance levels in cherry tomatoes and chili peppers. This suggests that the screen house structure's-controlled ventilation and filtration create an ideal balance between air circulation and protection, thereby reducing the spread of fungal infections and other disease agents that prefer humid or poorly ventilated environments. Another significant result is the noticeable increase in fruit quality for crops grown in screen houses. The findings suggest that cherry tomatoes and chili peppers from screen houses showed higher firmness, greater average fruit weight, and higher vitamin C content than their counterparts produced in open fields or greenhouses. Screen-house-grown fruits are more marketable because of these qualities, which are crucial for the produce's post-harvest shelf life and nutritional content. Additionally, marketable yields were much more significant in screen house environments, according to the data, indicating that the ideal growth circumstances resulted in fewer rejected fruits from disease or pest damage and fewer deformed fruits. Screen house agriculture has become more economical and sustainable, allowing growers to supply the market with more significant amounts of superior produce. On the other hand, open field settings are less costly to maintain but expose crops to varying environmental pressures that result in uneven yields, a higher risk of disease, and poorer-quality fruit. Although protected, greenhouses can also be more humid and have less efficient ventilation than screen houses, which accounts for their mediocre yield and quality. In summary, the screen house system proves to be a very beneficial microclimate for solanaceous crops. It perfectly balances natural airflow and protection, promoting healthy growth, resistance to pests, and superior fruit quality. This system is an excellent option for farmers looking to boost marketable yields and crop profitability.

Authors declaration

Ethics Approval

Not applicable to this paper

Consent to participate

Not applicable

Consent for publication

Not applicable

Data availability statement

All of the research data are presented in this manuscript

Competing interest

The authors declare no competing interest among each other

Author Contributions

Conceptualization; F.A., K.K., R.S.S., Methodology; F.A., K.K., M.R.K., Software; F.A., K.K., M.R.K., R.S.S., Validation; K.K., M.R.K., M.A.S., Formal analysis; F.A., K.K., Investigation; F.A., K.K., Writing draft; F.A., K.K., R.S.S., Review and editing; K.K., M.A.S., Visualization; F.A. and M.R.K.

References

- Ahmad, F., Kusumiyati, K., Khan, M. R., Soleh, M. A., & Sundari, R. S. (2023). Pakistan Journal of Phytopathology. *Pakistan Journal of Phytopathology*, 35(02), 245–257. <https://doi.org/10.33866/phytopathol.035.02.968>
- Chapagain, T. R., Khatri, B. B., & Mandal, J. L. (2012). Performance of Tomato Varieties during Rainy Season under Plastic House Conditions. *Nepal Journal of Science and Technology*, 12, 17–22. <https://doi.org/10.3126/njst.v12i0.6473>
- Chaudhry, S., & Sidhu, G. P. S. (2022). Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. In *Plant Cell Reports* (Vol. 41, Issue 1). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>
- Dayan, E., van Keulen, H., Jones, J. W., Zipori, I., Shmuel, D., & Challa, H. (1993). Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model. *Agricultural Systems*, 43(2), 145–163. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(93\)90024-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(93)90024-V)
- Ge, J., Zhao, L., Yu, Z., Liu, H., Zhang, L., Gong, X., & Sun, H. (2022). Prediction of Greenhouse Tomato Crop Evapotranspiration Using XGBoost Machine Learning Model. *Plants*, 11(15), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants11151923>
- Gustiar, F., Lakitan, B., Budianta, D., & Negara, Z. P. (2023). Assessing the impact on growth and yield in different varieties of chili pepper (*Capsicum frutescens*) intercropped with chaya (*Cnidoscolus aconitifolius*). *Biodiversitas*, 24(5), 2639–2646. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240516>
- Hemming, S., de Zwart, F., Elings, A., Petropoulou, A., & Righini, I. (2020). Cherry tomato production in intelligent greenhouses-sensors and ai for control of climate, irrigation, crop yield, and quality. *Sensors (Switzerland)*, 20(22), 1–30. <https://doi.org/10.3390/s20226430>
- Islam, A. H. M. S., Schreinemachers, P., & Kumar, S. (2020). Farmers' knowledge, perceptions and management of chili pepper anthracnose disease in Bangladesh. *Crop Protection*, 133(August 2019), 105139. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105139>
- Islam, M. T. (2011). Effect of temperature on photosynthesis, yield attributes and yields of aromatic rice genotypes. *International Journal of Sustainable Crop Production*, 6(1), 14–16.
- Kesumawati, E., Apriyatna, D., & Rahmawati, M. (2020). The effect of shading levels and varieties on the growth and yield of chili plants (*Capsicum annum* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 425(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/425/1/012080>
- Kim, K. H., Shawon, M. R. A., An, J. H., Lee, H. J., Kwon, D. J., Hwang, I. C., Bae, J. H., & Choi, K. Y. (2022). Effect of Shade Screen on Sap Flow, Chlorophyll Fluorescence, NDVI, Plant Growth and Fruit Characteristics of Cultivated Paprika in Greenhouse. *Agriculture (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/agriculture12091405>
- Kotilainen, T., Matthew Robson, T., & Hernández, R. (2018). Light quality characterization under climate screens and shade nets for controlled-environment agriculture. *PLoS ONE*, 13(6), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199628>
- Kumar, A. J. S., Kyriacou, M. C., Roupael, Y., & Kumar, P. (2021). *Productive Characteristics and Fruit Quality Traits of Cherry Tomato Hybrids as Modulated by Grafting on Different Infested Greenhouse Soil*.
- Kusumiyati, K., Ahmad, F., Khan, M. R., Soleh, M. A., & Sundari, R. S. (2023). Productivity of Cherry Tomato Cultivars as Influenced by Watering Capacities and Microclimate Control Designs. *The Open Agriculture Journal*, 17(1), 1–12. <https://doi.org/10.2174/0118743315280566231119172531>
- Masabni, J., Sun, Y., Niu, G., & Del Valle, P. (2016). Shade effect on growth and productivity of tomato and chili pepper. *HortTechnology*, 26(3), 344–350. <https://doi.org/10.21273/horttech.26.3.344>
- Mudiayanti, R., Aminudin, A., & Hasanah, L. (2019). Design watering system on greenhouse using microcontroller with matrix based. *Journal of Physics: Conference Series*, 1280(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1280/2/022067>

- Pickens, J. M., Danaher, J. J., Sibley, J. L., Chappell, J. A., & Hanson, T. R. (2020). Integrating greenhouse cherry tomato production with biofloc tilapia production. *Horticulturae*, 6(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6030044>
- Rajasekar, M., Arumugam, T., & Kumar, S. R. (2013). Influence of weather and growing environment on vegetable growth and yield. *Journal of Horticulture and Forestry*, 5(10), 160–167. <https://doi.org/10.5897/JHF2013.0317>
- Razmjoo, K., Heydarizadeh, P., & Sabzalian, M. R. (2008). Effect of salinity and drought stresses on growth parameters and essential oil content of *Matricaria chamomila*. *International Journal of Agriculture and Biology*, 10(4), 451–454.
- Ruiz-Nieves, J. M., Ayala-Garay, O. J., Serra, V., Dumont, D., Vercambre, G., Génard, M., & Gautier, H. (2021). The effects of diurnal temperature rise on tomato fruit quality. Can the management of the greenhouse climate mitigate such effects? *Scientia Horticulturae*, 278(October). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109836>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sharma, H., Shukla, M. K., Bosland, P. W., & Steiner, R. (2017). Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. *Agricultural Water Management*, 179, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>
- Smith, M. R., Veneklaas, E., Polania, J., Rao, I. M., Beebe, S. E., & Merchant, A. (2019). Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *PLoS ONE*, 14(6), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217099>
- Subiastuti, A. S., Putri, A. C., Permadani, C. G., & Daryono, B. S. (2021). Effect of screen house on disease severity and coat protein diversity of Begomovirus-infected *Capsicum frutescens* L. Cempluk' from Indonesia. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 44(2), 449–463. <https://doi.org/10.47836/PJTAS.44.2.11>
- Sumiyati, Madrini, I. A. G. B., & Tika, I. W. (2021). The effect of screen materials on the microclimate and growth of chili pepper plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012082>
- Teitel, M. (2007). The effect of screened openings on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3–4), 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.01.005>



LİTYUM-İYON BATARYANIN ŞARJ DURUMUNUN MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARIYLA TAHMİNİ

Yasir Ziya GÜLTAK¹

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Mersin, Türkiye.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6376-9730>

Alkan ALKAYA²

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Mersin, Türkiye.

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8235-6726>

Özet

Fosil yakıtların kullanımı, atmosferdeki karbondioksit miktarının artmasına ve iklim krizinin derinleşmesine neden olmaktadır. Bu durum, enerji sektöründe çevre dostu çözümlere geçişi zorunlu hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra, enerji depolama teknolojileri de bu geçiş sürecinde kritik bir rol üstlenmektedir. Son yıllarda popülerliği hızla artan lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun kullanım ömrü ve düşük kendiliğinden deşarj özellikleri sayesinde enerji depolama alanında öne çıkmıştır. Li-ion bataryalar, sundukları avantajlara rağmen, elektrokimyasal yapıları güvenli çalışma koşullarının sağlanmasında ciddi bir engel oluşturmaktadır. Bu sebeple, Li-ion bataryaların güvenli ve kararlı bir şekilde çalışabilmesi için batarya yönetim sistemi (BMS) kullanımı zorunlu hale gelmiştir. BMS, hücre izleme, hücre dengeleme, sıcaklık kontrolü ve şarj durumu (SOC) tahmini gibi işlevler sunar. SOC, bataryanın enerji seviyesini gösteren önemli bir parametredir ve genellikle yüzde (%) olarak ifade edilir. SOC, doğru belirlendiğinde bataryanın verimliliğini artırır, şarj ve deşarj işlemlerinde ortaya çıkabilecek problemleri önler. SOC, doğrudan ölçülememektedir. Ancak voltaj, akım ve sıcaklık gibi ölçülebilir parametreler kullanılarak tahmin edilebilmektedir. SOC tahmini için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasından makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, SOC tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Makine öğrenmesi sayesinde batarya verileri ayrıntılı olarak incelenebilmekte ve daha isabetli tahminler elde edilmektedir. Bu çalışmada, SOC tahmininde çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarının etkinliği incelenmiş ve performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Batarya verileri elde etmek amacıyla bir deney düzeni oluşturulmuştur. Enerjisi tam dolu olan bir batarya, DC yük modülü kullanılarak farklı akım seviyelerinde deşarj edilmiş, bu süreç boyunca akım ve gerilim değerleri veri toplama kartı ile kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, %80 eğitim ve %20 test verisi olarak iki gruba ayrılmış ve veri ön işleme adımlarıyla analiz için hazır hale getirilmiştir. Bataryanın SOC tahmininde, Doğrusal Regresyon, Polinom Regresyon, Destek Vektör Regresyonu, K-En Yakın Komşu ve Karar Ağaçları algoritmaları kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Modeller, test verileri üzerinden çeşitli performans değerlendirme metrikleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, en yüksek başarı oranını Karar Ağaçları algoritmasının sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, Li-ion batarya teknolojisinin gelecekteki uygulamalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya, Lityum-iyon batarya, Batarya yönetim sistemi, Şarj durumu, Yapay zekâ, Makine öğrenmesi.

ESTIMATING THE STATE OF CHARGE OF A LITHIUM-ION BATTERY USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Abstract

The use of fossil fuels is causing the amount of carbon dioxide in the atmosphere to increase and the climate crisis to deepen. This situation has necessitated a transition to environmentally friendly solutions in the energy sector. In addition to renewable energy sources, energy storage technologies also play a critical role in this

transition. Lithium-ion (Li-ion) batteries, which have rapidly increased in popularity in recent years, have become prominent in the field of energy storage thanks to their high energy density, long lifetime and low self-discharge characteristics. Despite the advantages of Li-ion batteries, their electrochemical structure poses a severe obstacle in ensuring safe operating conditions. For this reason, the use of a battery management system (BMS) has become mandatory for the safe and stable operation of Li-ion batteries. The BMS offers functions such as cell monitoring, cell balancing, temperature control, and state of charge (SOC) estimation. SOC is an important parameter that indicates the energy level of the battery and is usually expressed as a percentage (%). When determined correctly, SOC increases the efficiency of the battery and prevents problems that may arise during charging and discharging. SOC cannot be measured directly. However, it can be estimated using measurable parameters such as voltage, current, and temperature. Different methods are used for SOC estimation. Among these methods, machine learning-based approaches have significantly improved the accuracy of SOC estimation. Thanks to machine learning, battery data can be analyzed in detail, and more accurate estimates can be obtained. In this study, the effectiveness of various machine learning algorithms in SOC estimation was examined, and their performances were comparatively evaluated. An experimental setup was created to obtain battery data. A fully charged battery was discharged at different current levels using a DC load module, and the current and voltage values were recorded with a data acquisition card during this process. The data obtained were divided into two groups: 80% training data and 20% test data. The data was then prepared for analysis with data preprocessing steps. Linear Regression, Polynomial Regression, Support Vector Regression, K-Nearest Neighbor, and Decision Trees algorithms were used to predict the SOC of the battery. The models were analyzed with various performance evaluation metrics on test data. The results of the analysis showed that the Decision Trees algorithm provided the highest success rate. This study aims to contribute to the future applications of Li-ion battery technology.

Keywords: Battery, Lithium-ion battery, Battery management system, State of charge, Artificial intelligence, Machine learning.

1. Giriş

Artan fosil yakıt kullanımı, atmosferdeki karbondioksit seviyesini artırarak çevresel sorunların şiddetlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, enerji verimliliğini artırmayı ve çevre dostu alternatifler geliştirmeyi zorunlu hale getirmiştir. Çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler arasında yenilenebilir enerji kaynakları öncelikli bir yer tutmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynaklardan elde edilen enerji, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak çevresel etkileri en aza indirir. Ancak bu kaynakların doğal olarak değişken olması, enerji üretiminde sürekliliğin sağlanmasını zorlaştırabilir. Bu noktada, enerji depolama teknolojileri devreye girer ve üretilen enerjinin ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılmasına olanak tanır. Depolama sistemleri sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliği artırılırken, enerji arz güvenliği de desteklenir (Li vd., 2024).

Enerji depolama teknolojileri arasında öne çıkan lityum iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömürleri sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Lityum iyon bataryalar taşınabilir cihazlardan elektrikli araçlara kadar birçok uygulamada tercih edilmekte olup, yenilenebilir enerji sistemlerinde de kritik bir depolama çözümü sunmaktadır. Düşük kendi kendine deşarj oranı ve hafıza etkisinin olmaması gibi avantajlar, bu bataryaları hem bireysel hem de endüstriyel kullanıcılar için cazip hale getirmiştir (Kumar ve Das, 2024). Ancak, lityum iyon bataryaların güvenli ve kararlı bir şekilde çalışması, elektrokimyasal yapılarından kaynaklanan zorluklar nedeniyle dikkat gerektirmektedir. Bu doğrultuda tasarlanan batarya yönetim sistemleri (BMS), bataryaların ömrünü uzatmayı ve güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. BMS, hücre izleme, SOC tahmini, hücre dengelemesi ve ısı yönetim gibi bir dizi işlevi yerine getirmektedir. Elektrikli araçlar ve enerji depolama istasyonları gibi çoklu hücreli uygulamalarda BMS'nin önemi daha da artmaktadır (Kumar vd., 2023).

SOC, bataryanın enerji seviyesini yansıtan kritik bir parametredir. SOC, doğrudan ölçülememekte, yalnızca hücre voltajı, akım ve sıcaklık gibi ölçülebilir parametrelerden tahmin edilebilmektedir (Muratoğlu, 2017). Bu tahminin doğruluğu, bataryanın kullanım koşullarına ve yaşlanma durumuna bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden SOC tahmini akademik olarak çalışma konusu haline gelmiştir (Liang vd., 2021). SOC tahmini için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Hou vd., 2024). SOC tahmin yöntemleri genel olarak doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Doğrudan yöntemler, açık devre gerilimi, yük sayma, elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve iç direnç yöntemleri gibi fiziksel ve elektrokimyasal

parametrelere dayalı teknikleri içermektedir. Öte yandan, dolaylı yöntemler daha karmaşık yaklaşımlar sunmakta olup, model tabanlı, adaptif filtreleme dayalı ve yapay zekaya dayalı gibi yenilikçi yöntemlerden oluşmaktadır. Son yıllarda, makine öğrenmesi ve diğer veri odaklı yöntemlerin yaygınlaşması, SOC tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Bu yöntemler, batarya verilerini işleyerek daha kesin ve güvenilir tahminler yapılmasını sağlamaktadır (Raooft ve Yıldız, 2023).

Bu çalışmada, SOC tahmininde makine öğrenmesi algoritmalarının etkinliği incelenmiştir. Laboratuvar ortamında elde edilen lityum iyon batarya verileri kullanılarak Doğrusal Regresyon, Polinom Regresyon, Destek Vektör Regresyon, K-En Yakın Komşu ve Karar Ağaçları algoritmalarına dayalı modeller geliştirilmiştir. Modellerin performansları karşılaştırılmış ve en başarılı algoritmanın Karar Ağaçları olduğu belirlenmiştir.

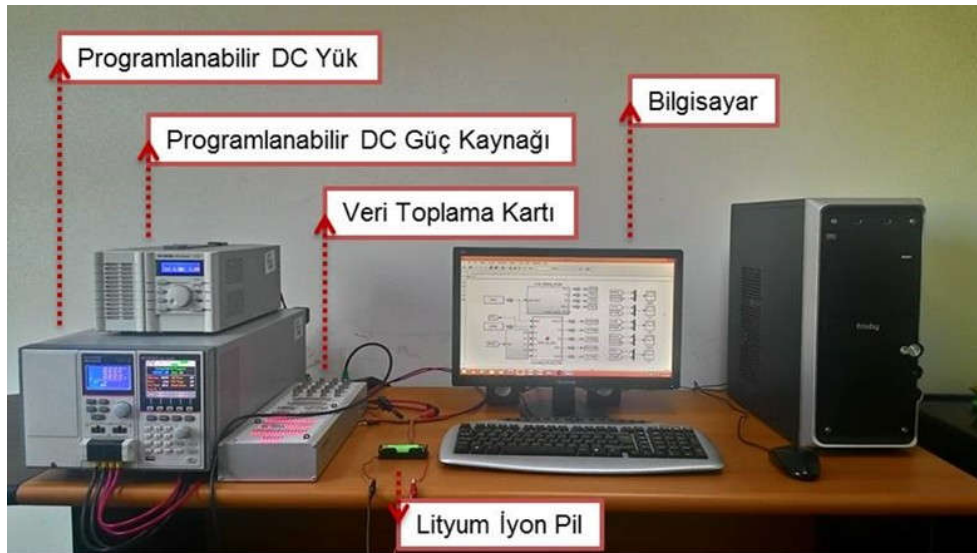
2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Bu çalışmada, batarya verilerinin toplanması amacıyla, Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Enerji Depolama Sistemleri Araştırma Laboratuvarı'nda bir deney düzeneği kurulmuştur. Düzenekte kullanılan materyaller ise aşağıda verilmiştir.

1. Batarya olarak Panasonic'in NCR18650B kodlu lityum iyon bataryası tercih edilmiştir.
2. Bataryayı şarj etmek için GW Instek'in PSH-3620A kodlu ayarlanabilir DC güç modülü tercih edilmiştir.
3. Bataryayı deşarj etmek için GW Instek'in PEL-2002/2040 kodlu ayarlanabilir DC yük modülü tercih edilmiştir.
4. Bataryadan elde edilen verilerin görüntülenmesi ve depolanması için Dspace'in DS1104 kodlu veri toplama kartı tercih edilmiştir.

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için Şekil 2.1'de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 2.1. Deney Düzeneği

2.2 Yöntem

Çalışmada kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarının yanı sıra, veri ön işleme ve model değerlendirme süreçlerine ilişkin ayrıntılar aşağıda sunulmaktadır.

- Destek Vektör Regresyon

Destek Vektör Regresyonu (SVR), bağımlı değişkeni tahmin ederken belirli bir tolerans (epsilon) aralığı tanımlayarak tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki sapmaları bu aralığın sınırları içinde tutmaya çalışır. Bu sınırların dışında kalan veri noktalarına ceza terimi (C) eklenir. Veriler doğrusal bir yapıya sahip değilse, çekirdek fonksiyonları (kernel) kullanılarak veri daha yüksek boyutlu bir özellik uzayına haritalanır. Bu haritalama sayesinde doğrusal olmayan bir problemi doğrusal olarak çözmek mümkün hale gelir. Algoritmanın başarımı, epsilon ve C gibi hiper parametrelere bağlıdır. Epsilon, modelin hata toleransını ve destek vektörlerini belirlerken, C parametresi hataya uygulanacak ceza miktarını ayarlar. Düşük C değerleri daha genel, ancak daha fazla hatayı tolere eden bir model oluştururken, yüksek C değerleri daha spesifik, ancak aşırı öğrenmeye yatkın bir model sağlar. (Cai vd., 2023).

- **K-En Yakın Komşu**

K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması, bir veri noktasını tahmin etmek için veri setindeki diğer noktalarla olan mesafesini hesaplamayı temel alır. Mesafe hesaplaması sonucunda, en yakın K komşu belirlenir ve bu komşuların bağımlı değişken değerlerinin ortalaması dikkate alınarak tahmin gerçekleştirilir. Genellikle Öklid mesafesi tercih edilse de Manhattan veya Minkowski gibi farklı mesafe metrikleri de kullanılabilir. KNN algoritmasının performansı, büyük ölçüde K parametresine bağlıdır. K değeri küçükse, model aşırı öğrenmeye meyilli olabilir. Bunun aksine, K değeri çok büyükse, model daha genel bir tahmin yapar ancak bu durum doğruluk oranını olumsuz etkileyebilir (Tang vd., 2023).

- **Karar Ağaçları**

Karar Ağaçları, veri setindeki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri bir ağaç yapısı üzerinden modellemeyi amaçlar. Ağaç yapısındaki her düğüm, bir bağımsız değişkene dayalı olarak veri setini iki veya daha fazla alt gruba ayırır. Nihai hedef, yaprak düğümlerine ulaşıldığında hedef değişkenin tahminini yapmaktır. Bölünme işlemleri, genellikle bilgi kazancı veya ortalama kare hatası gibi metriklere dayanarak yapılır. Karar Ağaçları'nın performansı, ağacın derinliği ve veri bölünmelerinin nasıl optimize edildiği gibi faktörlere bağlıdır. Çok derin ağaçlar aşırı öğrenme riskine yol açarken, çok sığ ağaçlar yetersiz öğrenmeye neden olabilir (Costa vd., 2024).

- **Doğrusal Regresyon**

Doğrusal Regresyon, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde temsil edecek bir doğrusal fonksiyon oluşturmayı amaçlar. Doğrusal Regresyon algoritması, genellikle en küçük kareler yöntemi ile öğrenme sürecini yürütür. Bu yöntemde, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların kareleri toplamı minimize edilerek en uygun doğrusal ilişki belirlenir (Huang vd., 2023).

- **Polinom Regresyon**

Polinom Regresyon, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi belirli bir polinom derecesine göre eğrilerle temsil etmeyi amaçlar. Modelin eğitimi, genellikle en küçük kareler yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu süreçte, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki hata minimize edilerek en uygun eğri elde edilir. Polinom derecesi, modelin performansı üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Daha yüksek polinom dereceleri, modelin veriyle daha fazla ayrıntıyı yakalamasını sağlarken aşırı öğrenme riskini artırabilir. Öte yandan, düşük dereceli polinomlar veriyi yeterince temsil edemez (Xu vd., 2024).

- **Veri Ölçeklendirme**

Veri ölçeklendirme, farklı değişkenlerin değer aralıklarını ortak bir ölçeğe çekerek, algoritmaların veriler arasında adil bir karşılaştırma yapmasını sağlar. Farklı ölçeklerdeki değişkenler, özellikle mesafeye dayalı algoritmalar için ciddi sorunlar yaratabilir. Büyük değerlere sahip değişkenler model üzerinde gereğinden fazla ağırlık kazanabilir. Bu durum, algoritmanın yanlış sonuçlar üretmesine ve model performansının düşmesine yol açabilir. Veri ölçeklendirme, yalnızca doğruluğu artırmakla kalmaz aynı zamanda eğitim sürecini önemli

ölçüde hızlandırır (Pei vd., 2023). Veri ölçeklendirme için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada, Min-Max ölçeklendirme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, veri setindeki her bir değişkeni belirli bir aralıkta normalize ederek ortak bir ölçeğe getirir. Genellikle veriler 0 ile 1 aralığına dönüştürülse de farklı aralıklar da tercih edilebilir.

- **K-Katlı Çapraz Doğrulama**

K katlı çapraz doğrulama, modelin genelleme kabiliyetini ölçmek için sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, veri seti eşit boyutlarda K alt kümeye ayrılır. Her iterasyonda, model K-1 alt küme kullanılarak eğitilir ve geriye kalan bir alt küme ile test edilir. Bu süreç, her alt kümenin bir kez test verisi olarak kullanıldığı toplam K kez tekrarlanır. Test sonuçları, modelin doğruluk ve genel başarımını değerlendirmek için birleştirilerek ortalama bir performans metriği elde edilir. K katlı çapraz doğrulama, modeli veri setine aşırı uyumdan koruyarak daha güvenilir ve genellenebilir bir değerlendirme sağlar (Elkari vd., 2024).

- **Performans Değerlendirme Metrikleri**

Bu çalışmada, model performansını değerlendirmek için sıklıkla başvurulan iki temel metrik, Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE) ve R^2 metrikleri ele alınmıştır.

RMSE, modelin tahmin ettiği değerlerle gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanır. RMSE değeri düşük olduğunda, modelin tahminlerinin gerçek değerlere daha yakın olduğu ve dolayısıyla performansının daha iyi olduğu kabul edilir.

R^2 , bir modelin veriyi ne kadar iyi açıkladığını belirten önemli bir performans ölçütüdür. Bu değer 0 ile 1 arasında değişir ve R^2 'nin 1'e yaklaşması, modelin bağımlı değişkeni yüksek doğrulukla açıkladığını gösterir. Buna karşın, R^2 'nin 0'a yakın bir değer alması, modelin bağımlı değişkeni açıklama konusunda yetersiz olduğunu ifade eder.

- **Hiper Parametre Optimizasyonu**

Hiper parametre optimizasyonu, modellerinin performansını artırmak için en uygun hiper parametre değerlerinin belirlenmesi işlemidir. Hiper parametrelerin doğru bir şekilde seçilmesi, modelin doğruluğunu ve genelleme kapasitesini önemli ölçüde iyileştirirken, yanlış seçimler performansı ciddi şekilde düşürebilir (Imani, M. and Arabnia, H. R., 2023). Bu çalışmada hiper parametre optimizasyonu için GridSearchCV yöntemi kullanılmıştır. GridSearchCV, belirlenen hiper parametrelerin olası tüm kombinasyonlarını sistematik bir şekilde değerlendirir ve her kombinasyonu çapraz doğrulama yöntemi ile test eder. Her bir parametre kombinasyonu için modelin performansı hesaplanır ve en iyi sonucu sağlayan kombinasyon seçilir. Bu süreç boyunca model, eğitim ve test verileri üzerinde birçok denemeden geçer. Böylece, genelleme yeteneği daha yüksek, güvenilir bir model elde edilmesi sağlanır.

3. Bulgular ve Tartışma

Lityum iyon batarya farklı akım seviyelerinde deşarj edilerek akım ve voltaj verileri toplanmıştır.

Bütün algoritmalar için;

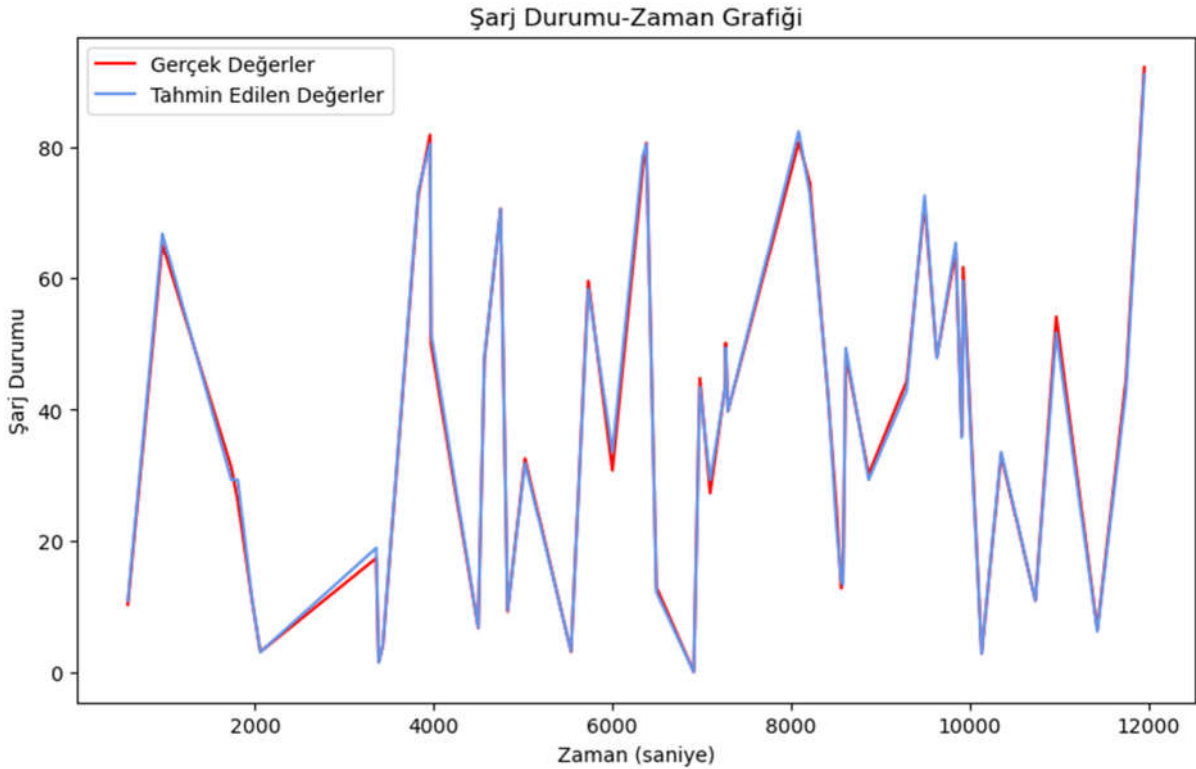
- Veri seti, %80'i eğitim verisi ve %20'si test verisi olacak şekilde iki ayrı gruba bölünmüştür.
- Modelin performansını değerlendirmek için RMSE değeri ve R^2 değeri hesaplanmıştır.
- Modelin genelleme yeteneği analizi için 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır.
- Hiper parametre optimizasyonu, GridSearchCV yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Optimize edilmiş modellerin performanslarını değerlendirmek için hesaplanan metrikler tablo 3.1’de verilmiştir. Tablodaki sonuçlar, Karar Ağaçları algoritmasının diğer makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla daha düşük hata oranı ve yüksek doğruluk ile öne çıktığını göstermektedir.

Tablo 3.1. Sonuçlar

Algoritma	Model Sonuçları		Çapraz Doğrulama Sonuçları	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
Destek Vektör Regresyonu	0.0240	0.9910	0.0260	0.9900
K-En Yakın Komşu	0.0180	0.9950	0.0210	0.9930
Doğrusal Regresyon	0.1210	0.8470	0.1250	0.8420
Karar Ağaçları	0.0150	0.9980	0.0170	0.9960
Polinom Regresyon	0.0430	0.9830	0.0460	0.9800

Şekil 3.1’de, Karar Ağaçları algoritmasıyla oluşturulan modelin tahmin ettiği değerlerle gerçek değerlerin karşılaştırıldığı bir görsel sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Karar Ağaçları Sonuçları

4.Sonuçlar ve Öneriler

Makine öğrenmesi algoritmalarının SOC tahminindeki etkinliği, laboratuvar ortamında elde edilen batarya verileriyle analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, modellerin performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Karar Ağaçları'nın, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha düşük hata oranı ve yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir.

Gelecek çalışmalar için genişletilmiş veri setlerinin kullanılması önerilmektedir. Özellikle, farklı sıcaklık koşulları ve bataryaların yaşlanma süreçlerini içeren veri setleri, algoritmaların daha çeşitli ve karmaşık senaryolardaki performansını değerlendirmek açısından önemlidir. Bunun yanı sıra, farklı algoritmaların bir

arada kullanıldığı hibrit modeller geliştirilerek tahmin doğruluğu artırılabilir. Bu yöntem, bireysel modellerin güçlü yönlerini birleştirerek daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir.

Kaynaklar

- Li, M., Li, C., Chen, C., Zhang, Q., Liu, X., Liao, W. and Rao, Z. (2024). “Effect of data enhancement on state-of-charge estimation of lithium-ion battery based on deep learning methods.” *Journal of Energy Storage*, Vol. 82, pp. 110573.
- Kumar, R. R., Bharatiraja, C., Udhayakumar, K., Devakirubakaran, S., Sekar, K. S. and Mihet-Popa, L. (2023). “Advances in batteries, battery modeling, battery management system, battery thermal management, SOC, SOH, and charge/discharge characteristics in EV applications.” *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 105761-105809.
- Kumar, R. and Das, K. (2024). “Lithium battery prognostics and health management for electric vehicle application—A perspective review.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 65, pp. 103766.
- Muratoğlu, Y. (2017). Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon pillerin şarj durumlarının kokusuz Kalman filtresi ile kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye.
- Liang, L., Li, X., Zhao, F., Zhang, J., Liu, Y., Hou, L. and Yuan, C. (2021). “Construction and operating mechanism of high-rate Mo-doped Na₃V₂(PO₄)₃@C nanowires toward practicable wide-temperature-tolerance Na-ion and hybrid Li/Na-ion batteries.” *Advanced Energy Materials*, Vol. 11, No. 21, pp. 2100287.
- Hou, J., Xu, J., Lin, C., Jiang, D. and Mei, X. (2024). “State of charge estimation for lithium-ion batteries based on battery model and data-driven fusion method.” *Energy*, Vol. 290, pp. 130056.
- Raoofi, T. and Yildiz, M. (2023). “Comprehensive review of battery state estimation strategies using machine learning for battery management systems of aircraft propulsion batteries.” *Journal of Energy Storage*, Vol. 59, pp. 106486.
- Cai, W., Wen, X., Li, C., Shao, J. and Xu, J. (2023). “Predicting the energy consumption in buildings using the optimized support vector regression model.” *Energy*, Vol. 273, pp. 127188.
- Tang, Y., Chang, Y. and Li, K. (2023). “Applications of K-nearest neighbor algorithm in intelligent diagnosis of wind turbine blades damage.” *Renewable Energy*, Vol. 212, pp. 855-864.
- Costa, V. G., Salcedo-Sanz, S. and Pedreira, C. E. (2024). “Efficient evolution of decision trees via fully matrix-based fitness evaluation.” *Applied Soft Computing*, Vol. 150, pp. 111045.
- Huang, L., Song, T. and Jiang, T. (2023). “Linear regression combined KNN algorithm to identify latent defects for imbalance data of ICs.” *Microelectronics Journal*, Vol. 131, pp. 105641.
- Xu, K., Zhang, Q., Guo, C. and Zhang, G. (2024). “A study on vegetable replenishment and pricing decisions based on polynomial regression and neural network prediction.” *Information Systems and Economics*, Vol. 5, No. 3, pp. 56-62.
- Pei, X., hong Zhao, Y., Chen, L., Guo, Q., Duan, Z., Pan, Y. and Hou, H. (2023). “Robustness of machine learning to color, size change, normalization, and image enhancement on micrograph datasets with large sample differences.” *Materials & Design*, Vol. 232, pp. 112086.
- Elkari, B., Chaibi, Y. and Kousksou, T. (2024). “Random forest with feature selection and K-fold cross validation for predicting the electrical and thermal efficiencies of air based photovoltaic-thermal systems.” *Energy Reports*, Vo. 12, pp. 988-999.
- Imani, M. and Arabnia, H. R. (2023). “Hyperparameter optimization and combined data sampling techniques in machine learning for customer churn prediction: a comparative analysis.” *Technologies*, Vol. 11, No. 6, pp. 167.

**HAVA SOĞUTMALI TERMAL YÖNETİM SİSTEMİNİN LİTYUM-İYON BATARYA MODÜLÜNDE HÜCRE SICAKLIKLARINA ETKİSİNİN DENEYSSEL İNCELENMESİ****Furkan MUMCU¹**¹Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye.¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3835-638X>**Bilal SUNGUR²**² Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun, Türkiye.²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7320-1490>**Alırıza KALELİ³**³ Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye.³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3234-5922>**Özet**

Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS), batarya performansını optimize etmek ve güvenliği sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Elektrikli Araçlar gibi enerji yoğun uygulamalarda kullanılan Lityum-iyon (Li-ion) batarya modüllerinin güvenilir ve verimli bir şekilde çalışabilmesi, etkili termal yönetim sistemleriyle mümkündür. Bu sistemler, batarya hücrelerinde oluşan ısının homojen bir şekilde dağıtılmasını, hücreler arasındaki sıcaklık farklarının minimize edilmesini ve aşırı ısınmanın önlenmesini sağlayarak batarya modülünün ömrünü ve performansını artırır. Termal yönetim stratejileri sıvı soğutma, hava soğutma ve faz değişim malzemelerinin kullanımı gibi yöntemlerden oluşmaktadır. Hava soğutma sistemi, tasarım basitliği, maliyet etkinliği ve bakım kolaylığı ile özellikle orta düzeyde ısı yayılımının söz konusu olduğu uygulamalarda öne çıkan bir seçenektir. Bununla birlikte, hava soğutma sistemlerinin hücreler arası sıcaklık farklılıklarını azaltma ve aşırı sıcaklık artışlarını önleme gibi sınırlamaları bulunmaktadır. Bu zorlukların aşılması, batarya modüllerinin güvenliği, verimliliği ve uzun ömürlülüğü açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Li-ion batarya modüllerinde sabit bir deşarj oranında (3C) hava soğutma tabanlı bir termal yönetim stratejisinin hücre sıcaklıklarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Hava soğutmalı fanlı sistem altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, hava soğutma sisteminin batarya hücrelerindeki sıcaklıkları önemli ölçüde düşürdüğü ve sıcaklık dağılımını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Li-ion batarya modüllerinde hava soğutma sistemlerinin avantajlarını ön plana çıkarmış ve gelecekteki termal yönetim tasarımlarına yönelik iyileştirme çalışmalarına değerli katkılar sunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Li-ion batarya, Elektrikli araçlar, Batarya termal yönetim sistemi, Hava soğutma, Batarya hücre sıcaklıkları.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR-COOLED THERMAL MANAGEMENT SYSTEM ON CELL TEMPERATURES IN A LITHIUM-ION BATTERY MODULE**Abstract**

Battery Thermal Management System (BTMS) is critical to optimize battery performance and ensure safety. Reliable and efficient operation of Lithium-ion (Li-ion) battery modules used in energy-intensive applications such as Electric Vehicles is possible with effective thermal management systems. These systems increase the life and performance of the battery module by homogeneously distributing the heat generated in the battery cells, minimizing temperature differences between cells and preventing overheating. Thermal management strategies include liquid cooling, air cooling and the use of phase change materials. Air cooling is a popular option for applications with moderate heat dissipation due to its simplicity of design, cost-effectiveness and

ease of maintenance. However, air cooling systems have limitations such as reducing inter-cell temperature differences and preventing extreme temperature spikes. Overcoming these challenges is of great importance for the safety, efficiency and longevity of battery modules. In this study, the effect of an air cooling-based thermal management strategy on cell temperatures at a constant discharge rate (3C) in Li-ion battery modules is experimentally investigated. Experiments conducted under an air-cooled fan system showed that the air cooling system significantly reduced the temperatures in the battery cells and improved the temperature distribution. These findings highlight the advantages of air cooling systems in Li-ion battery modules and provide valuable contributions to the improvement of future thermal management designs.

Keywords: Lithium-ion battery, Electric vehicles, Battery thermal management system, Air cooling, Battery cell temperatures.

Giriş

Son zamanlarda, iklim değişikliği nedeniyle elektrikli ve hibrit araçlar en temiz seçenekler olmaları nedeniyle büyük önem kazanmıştır. Ayrıca birçok araç üreticisi yakın gelecekte içten yanmalı motorlu araç üretimlerini durduracaklarını açıklamıştır. Bundan dolayı elektrikli ve hibrit araçların önemi katlanarak artmıştır ve bu durum neticesinde elektrikli ve hibrit araçların verimliliği ve sürdürülebilirliği üzerine çok sayıda araştırmaya zemin hazırlamıştır (Sahin et al., 2022). Elektrikli ve hibrit araçlarda verimliliği ve performansı etkileyen en önemli bileşen Lityum-ion (Li-ion) bataryalardır ve elektrikli araçların verimliliği, maliyeti ve kullanım ömrü bataryalardan büyük ölçüde etkilendiğinden dolayı literatürde Li-ion hücrelerin ve batarya paketlerinin performansını, ömrünü ve güvenliğini artırmaya yönelik birçok çalışma bulunmaktadır (Sahin et al., 2022). Li-ion bataryalar, enerji yoğunlukları, uzun döngü ömürleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle elektrikli araçlardan yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhao et al., 2021). Bununla birlikte, Li-ion bataryalar termal olarak hassastır ayrıca optimum ve güvenli çalışması için sıcaklıklarının dikkatlice kontrol edilmesi gerekir. Optimum çalışma verimliliği ve çevrim ömrü elde etmek için, bir Li-ion batarya modülündeki her bir Li-ion hücresinin sıcaklığının belirli bir aralıkta yönetilmesi ve modüldeki tüm hücreler arasında sıcaklık farkının en aza indirilmesi gerekmektedir (He & Ma, 2015) (Wang et al., 2016). Literatürde genellikle 20°C ile 40°C arası Li-ion bataryalar için en uygun çalışma aralığı olarak rapor edilmiştir. Bununla birlikte, uygun termal yönetim sistemleri olmadan, önceki çalışmaların sonucuyla elde edilen bu sıcaklık aralığı, ortam sıcaklığının ve şarj/deşarj döngülerinin geniş çeşitliliği dolayısıyla elektrikli ve hibrit araçlarda batarya modülleri için genellikle sağlanamaz (H. Wang et al., 2016). Yüksek sıcaklıklar, elektrokimyasal reaksiyon hızını artırarak bataryanın performansına geçici olarak pozitif şekilde etkiliyor fakat uzun vadede batarya içerisinde bulunan kimyasal malzemelerin bozulmasına, kapasite kaybına ve termal kaçak riskine yol açmaktadır. Öte yandan, düşük sıcaklıklar batarya iç direncini artırarak şarj-deşarj performansını olumsuz etkilemektedir. Bu kapsamda, lityum-iyon bataryalarda termal yönetim sistemleri (BTYS), sıcaklık dağılımını kontrol etmek ve termal dengesizliklerin önüne geçmek amacıyla hayati bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlardaki batarya modülleri için birçok BTYS geliştirilmiştir. Bu teknolojiler arasında hava soğutma, sıvı soğutma, faz değiştiren malzeme soğutma, ısı borusu soğutma ve çeşitli hibrit soğutma yöntemleri bulunmaktadır. Bu soğutma yöntemleri temel alınarak, ilgili araştırmacılar tarafından birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Genellikle, basit yapısı, düşük maliyeti, yüksek güvenilirliği ve kolay bakımı nedeniyle hava soğutma yaygın şekilde incelenmiş ve kullanılmıştır (Chen et al., 2017). Tang ve ark. (Tang et al., 2019), dikdörtgen batarya paketinin her iki yanına ve alt kısmına yerleştirilen mikro kanal soğuk plakaların soğutma performansını sayısal simülasyonla analiz etmiş ve deneylerle sayısal modelin güvenilirliğini doğrulamıştır. Wang ve ark. (T. Wang et al., 2014), farklı hücre düzenlemelerinin ve havalandırma konumlarının bir batarya modülünün soğutma performansı üzerindeki etkilerini tartışmıştır. Sonuçlar, hava girişinin üstte, çıkışının altta olduğu düzenlemenin en iyi soğutma etkisini sağladığını ve 5 × 5 kübik yapının soğutma performansı açısından en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir. Na ve ark. (Na et al., 2018), 2 × 10 dikdörtgen düzenindeki silindirik lityum bataryaları üst ve alt katmanlara ayırarak, karşıt yönlerde soğutma hava akımları uygulayarak sıcaklık dağılımını iyileştirmiştir. Jilte ve ark. (Jilte & Kumar, 2018), yüksekdeşarj oranında batarya modülünün soğutma performansını incelemiştir. Modülün yanal havalandırmasına dayalı olarak hava akış yönü, modül genişliği ve derinliğinin etkileri sayısal bir modelle analiz edilmiştir. Zhou ve ark. (Zhou et al., 2019), batarya paketi içerisine hava dağıtım hattı yerleştirerek sıcaklık dağılımını iyileştirmiş ve sayısal modelle delik parametreleri, giriş basıncı vedeşarj oranının soğutma performansına etkilerini analiz etmiştir.

Literatürden de görüleceği üzere hava soğutmalı sistemler, tasarım kolaylığı, düşük maliyet ve hafif yapıları nedeniyle en çok araştırılan ve tercih edilen termal yönetim stratejilerinden biridir. Ancak, hava soğutmalı sistemlerin etkinliği, soğutma akışkanının hızına, hava dağılımının homojenliğine ve batarya modülünün geometrik özelliklerine bağlıdır. Bu çalışmada, hava soğutmalı bir termal yönetim sisteminin lityum-iyon batarya modülündeki hücre sıcaklıklarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, sabit deşarj akımı altında fanlı ve fansız koşullarda her bir batarya hücresindeki sıcaklık dağılımlarını inceleyerek batarya modülünün güvenliğini ve performansını değerlendirmektir.

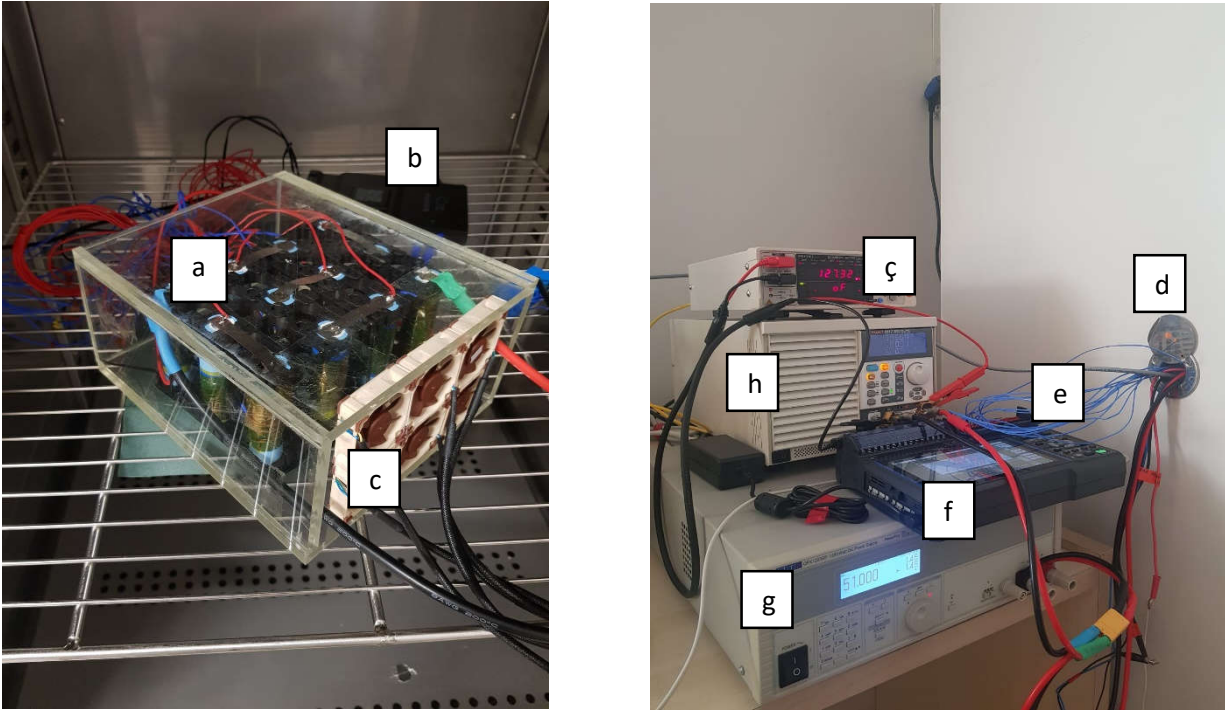
Materyal ve Metod

Yapılan çalışmada 2900 mAh kapasiteye sahip 4x3 dizilimindeki 12 adet Li-ion batarya hücresi kullanılarak oluşturulan Li-ion batarya modülünün 3C deşarj oranında, hava soğutma tabanlı bir termal yönetim stratejisinin hücre sıcaklıklarına ve batarya modülünün iç direnç değerine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında batarya modülü oluşturulurken kullanılan Lityum-İyon batarya hücresine ait temel özellikler Tablo 1’de belirtilmiştir.

Tablo 1. Deneyselerde kullanılan Li-ion pil hücresinin özellikleri

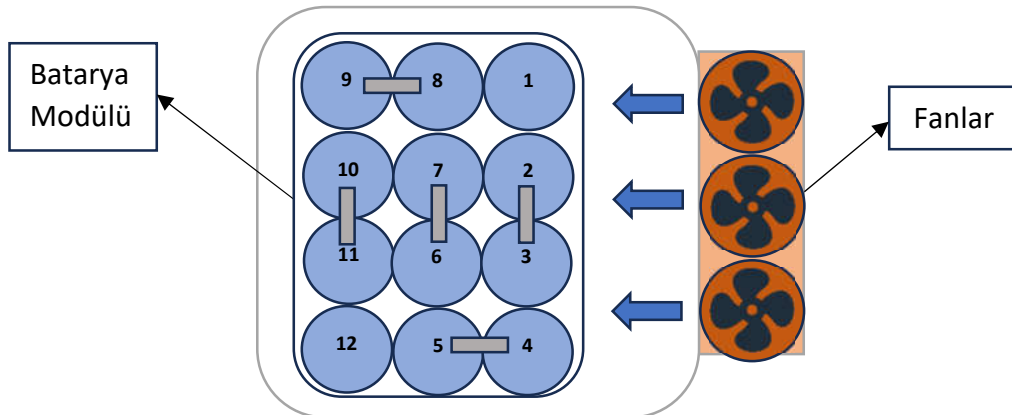
Li-ion Batarya Hücresinin Türü	Nominal Kapasite (mAh)	Maksimum Deşarj Akımı (mA)	Standart Şarj Akımı (mA)	Nominal Voltaj (V)	Deşarj Kesim Gerilimi (V)	Çalışma Sıcaklığı (°C)
ASPİLSAN INR18650A28	2900 mAh	14000 mA	1450 mA	3.68 V	2.5 V	0°C / 60°C (Şarj) -30°C / 60°C (Deşarj)

Çalışmada gerçekleştirilen deşarj oranı sabit olup 3C (8.7 A) değerindedir. Başlangıç aşamasında 12 adet ASPİLSAN Li-ion batarya hücresi seri şekilde bağlantıları gerçekleştirilerek ve batarya yönetim sistemi ile bağlantısı yapılarak Li-ion batarya modülü oluşturulmuştur. Sonraki aşamada paketin termal yönden soğutulması amacıyla tasarlanan fan matrisleri ile düzeneği tasarlanmış ve bu düzenek pleksiglastan imal edilmiş yapı içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Deney düzeneğini oluşturan elemanlara ait görüntüler: a) Batarya modülü, b) Batarya yönetim sistemi, c) Fanlı soğutma sistemi, ç) İç direnç ölçüm cihazı, d) Termal kabin, e) Termokupllar, f) Veri kaydedici, g) Doğru akım güç kaynağı(şarj), h) Programlanabilir elektronik yük(deşarj)

Daha sonrasında paket 15°C ortam sıcaklığına ayarlanmış termal kabin içerisinde 3C akım değerinde, hava soğutma tabanlı termal yönetim sistemi devredeyken (fanlı ve 5000 rpm devirde) ve devre dışıyken (fansız, 0rpm devirde) programlanabilir elektronik yük iledeşarj edilerek, her bir pil hücrelerine ait yüzey sıcaklıkları, batarya hücreleri üzerinden termokupllar yardımıyla kaydedilerek ölçümler yapılmıştır. Li-ion batarya modülünde seri bağlı 12 adet hücreye ait dizilim Şekil 2’de gösterilmiştir.

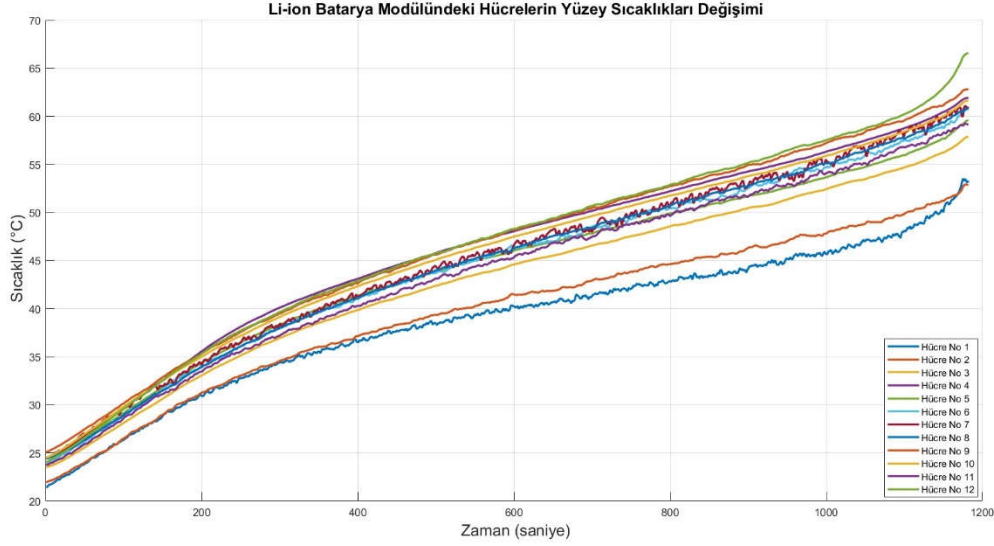


Şekil 2. Li-ion batarya modülünde seri bağlı 12 adet hücreye ait dizilim

Bulgular ve Tartışma

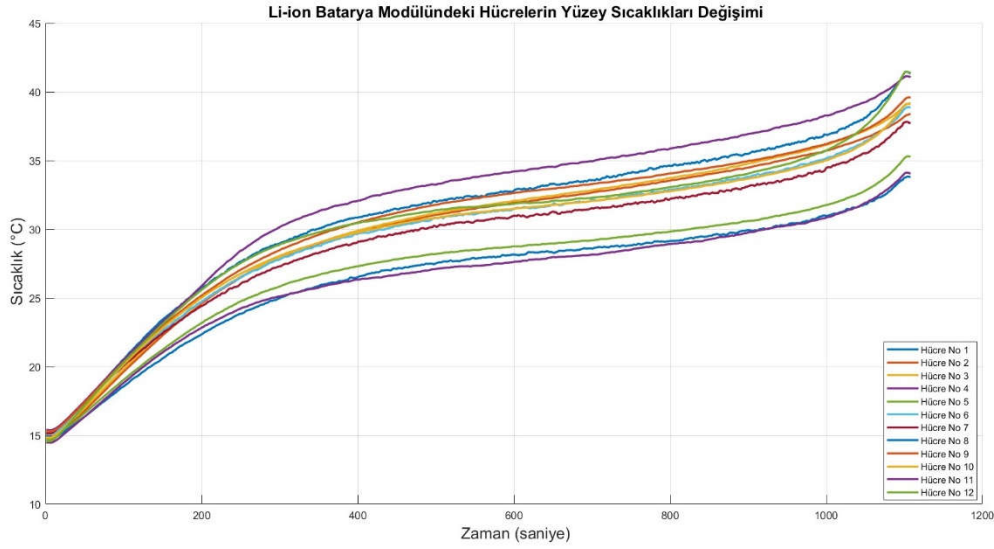
Çalışmanın bu kısmında Li-ion batarya modülü için 3Cdeşarj oranında, 15°C ortam sıcaklığında, hava soğutma tabanlı termal yönetim sistemi devrede ve devre dışıyken yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 3’te Li-ion batarya modülünde bulunan 12 adet hücre üzerinden 3C oranında ve hava soğutma tabanlı termal yönetim sistemi devre dışıyken termokupllar yardımıyla elde edilen sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğindedeşarj oranı 3C değerinde hücrelerin yüzeyinde meydana gelen sıcaklıkların zamanla arttığı görülmektedir. Batarya modülü içerisinde, hava soğutma tabanlı BTYS devre

dışyken en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 67°C ile Hücre no.12'de gerçekleştiği görülmektedir. Aynı deney koşullarında batarya modülündeki hücelere ait en düşük sıcaklık değeri ise 53°C civarında ve Hücre no.1'de olduğu kaydedilmiştir. Bu durum, zorlanmış bir soğutma mekanizması bulunmadığında termal yönetimin yetersiz kaldığını göstermektedir.



Şekil 3. Fansız sistemde 3C deşarj oranıyla yapılan deneylerde Li-ion batarya modülündeki hücre sıcaklıklarının zamanla değişimi

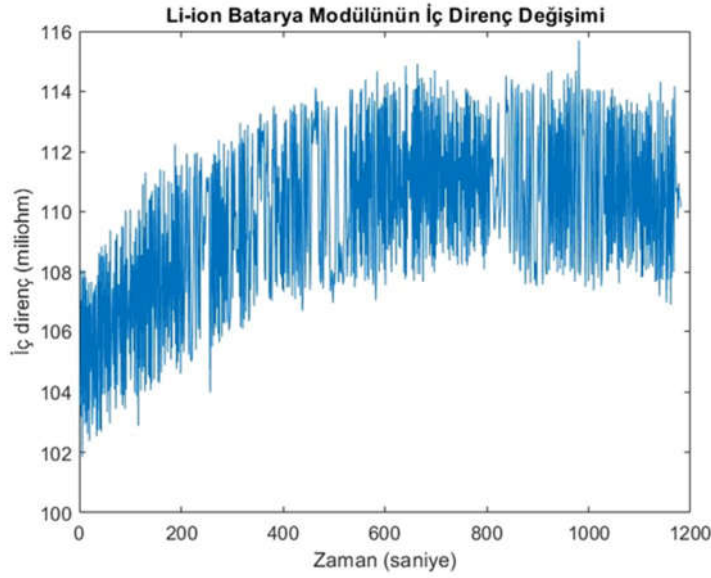
Şekil 4'te ise Li-ion batarya modülünde bulunan 12 adet hücre üzerinden 3C oranında ve hava soğutma tabanlı termal yönetim sistemi devredeyken termokupllar yardımıyla elde edilen sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde BTYS devrede olduğu durumda sıcaklık artışının daha kontrollü olduğu ve maksimum sıcaklıkların 40°C'nin altında tutulduğu görülmektedir. Batarya modülü içerisinde, hava soğutma tabanlı BTYS devredeyken en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 42°C ile Hücre no.12'de gerçekleştiği görülmektedir. Diğer taraftan aynı grafikte batarya modülündeki hücelere ait en düşük sıcaklık ise yaklaşık olarak 34°C olduğu görülmektedir ve bu değer BTYS devre dışı olduğu duruma göre 19°C daha düşük olduğu görülmektedir. Fanların devrede olduğu durum, hücreler arasındaki sıcaklık farkını da önemli ölçüde azaltmıştır. Fanların devrede olduğu durumda batarya modülünde hücreler arası sıcaklık farkı en fazla 8°C olduğu görülmektedir. Fanların devrede olmadığı diğer durumda ise modüldeki hücreler arası sıcaklık farkının en fazla 14°C olduğu görülmektedir. Hücre sıcaklıklarının daha homojen bir dağılım göstermesi, fanın sağladığı zorlanmış konveksiyon akışının etkinliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Fanlı (5000 rpm) sistemde 3C deşarj oranıyla yapılan deneylerde Li-ion batarya modülündeki hücre sıcaklıklarının değişimi

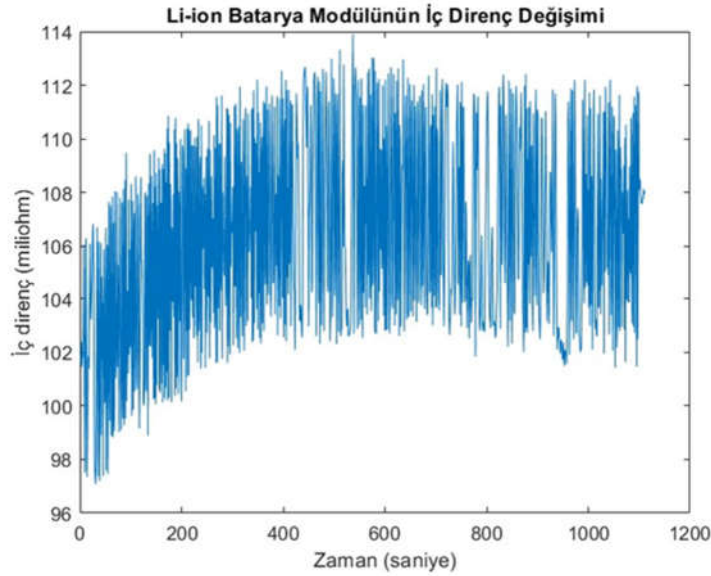
İki sistem incelendiğinde, fanlı sistemin termal yönetim açısından üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Fanların devre dışı olduğu durumda hücreler arasındaki sıcaklık farklarının yüksek olması, termal dengesizliklere neden olmuş ve lokal sıcak noktaların oluşumuna yol açmıştır. Buna karşın, fanlı sistem devredeyken hücreler arası sıcaklık farklarını azaltarak bu riski etkili bir şekilde ortadan kaldırarak termal dengeyi sağlamıştır. Ayrıca fanın maksimum sıcaklıkları yaklaşık 40°C'ın altına düşürdüğü görülmektedir, bu da bataryanın güvenliğini ve verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda meydana çıkan ısıyla beraber Li-ion batarya modülünde bulunan hücelere ait sıcaklıklar zamanla artmıştır. Hücrelerde gerçekleşen sıcaklık artışı sonucunda Li-ion batarya modülünün iç direnç değerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. İç direnç değeri Li-ion bataryaların performansı üzerinde etkili bir göstergedir. İç direnç değerinin artması, bataryanın şarj ve deşarj süreçlerinde daha fazla enerji kaybına neden olur. Bu kayıplar, ısı şeklinde açığa çıkar ve bataryanın termal yönetimini zorlaştırır. Yüksek iç direnç, bataryanın enerji yoğunluğunu ve çevrim verimliliğini düşürür. Şekil 5 incelendiğinde fanların devre dışı olduğu durumda batarya modülüne ait iç direnç değeri deney başlangıcında yaklaşık olarak 106 miliohm olduğu görülmektedir. Ancak deney süresince iç direnç değeri sıcaklık artışıyla doğru orantılı olacak şekilde belirli bir noktaya kadar artmış ve en yüksek iç direnç değerinin 115 miliohm olduğu kaydedilmiştir. Sıcaklık artışı belirli bir noktaya ulaştıktan sonra iç direnç değeri deney sonuna kadar sabit bir aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir. İç direnç değerinin artış eğilimi gösterdiği süreçte batarya performansı bu durumdan olumsuz yönde etkilenmiştir.



Şekil 5. Fansız sistemde 3C deşarj oranıyla yapılan deneylerde Li-ion batarya modülünün iç direncinin zamanla değişimi

Diğer taraftan Şekil 6 incelendiğinde termal yönetim sistemi devredeyken batarya modülüne ait iç direnç değeri deney başlangıcında ortalama 102 miliohm olduğu görülmektedir. Hava soğutma tabanlı BTYS etkisini deneyin başında göstermektedir ve iç direnç değerinin fanların devre dışı olduğu durumdaki değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan deney süresince aynı şekilde iç direnç değeri sıcaklık artışıyla doğru orantılı olacak şekilde belirli bir noktaya kadar artmış ve en yüksek iç direnç değerinin 114 miliohm olduğu kaydedilmiştir. Bu durumda hava soğutma tabanlı BTYS etkisiyle batarya modülünün iç direnç değeri belirli bir oranda düşmüş ve batarya modülünün performansı olumlu yönde etkilenmiştir.



Şekil 6. Fanlı sistemde 3C deşarj oranıyla yapılan deneylerde Li-ion batarya modülünün iç direncinin zamanla değişimi

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Li-ion batarya modülünün 3C deşarj oranında termal davranışları fanlı ve fansız soğutma durumlarında deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, fanlı sistemin termal yönetimde belirgin bir üstünlüğe sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmadan elde edilen ana bulgular şu şekildedir:

- Fansız durumda hücreler arasında önemli sıcaklık farkları oluşmuş ve maksimum sıcaklıklar 67°C seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, termal dengesizliklere ve potansiyel güvenlik risklerine yol açmıştır.
- Fanlı sistemde maksimum sıcaklıklar 40°C'nin altında tutulmuş ve hücreler arasındaki sıcaklık farkları minimize edilmiştir. Bu, zorlanmış konveksiyonun sıcaklık homojenliğini sağlamada etkili olduğunu kanıtlamıştır.
- Fansız durumda batarya modülünün iç direnci zamanla artmış, bu da performans kaybına neden olmuştur. Fanlı sistem ise iç dirençte düşüş sağlayarak modülün verimliliğini artırmıştır.
- Hava soğutmalı sistemler, tasarım basitliği ve maliyet etkinliği açısından avantaj sağlasa da hücreler arası sıcaklık farklarını daha da azaltmak için fan hızı ve hava akış düzenlemeleri optimize edilmelidir.

Bu çalışma, hava soğutmalı termal yönetim sistemlerinin Li-ion batarya modülleri için pratik bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Gelecekteki çalışmalarda bu sistemlerin etkinliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımlar üzerine odaklanmalıdır.

Kaynaklar

- Chen, K., Li, Z., Chen, Y., Long, S., Hou, J., Song, M., & Wang, S. (2017). Design of parallel air-cooled battery thermal management system through numerical study. *Energies*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/en10101677>
- He, F., & Ma, L. (2015). Thermal management of batteries employing active temperature control and reciprocating cooling flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.079>
- Jilte, R. D., & Kumar, R. (2018). Numerical investigation on cooling performance of Li-ion battery thermal management system at high galvanostatic discharge. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 957–969. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.015>
- Na, X., Kang, H., Wang, T., & Wang, Y. (2018). Reverse layered air flow for Li-ion battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 143, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.080>
- Sahin, R. C., Gocmen, S., & Cetkin, E. (2022). Thermal management system for air-cooled battery packs with flow-disturbing structures. *Journal of Power Sources*, 551. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232214>
- Tang, A., Li, J., Lou, L., Shan, C., & Yuan, X. (2019). Optimization design and numerical study on water cooling structure for power lithium battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113760>
- Wang, H., He, F., & Ma, L. (2016). Experimental and modeling study of controller-based thermal management of battery modules under dynamic loads. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.041>
- Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., & Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>
- Zhao, G., Wang, X., Negnevitsky, M., & Zhang, H. (2021). A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles. In *Journal of Power Sources* (Vol. 501). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230001>
- Zhou, H., Zhou, F., Xu, L., Kong, J., & QingxinYang. (2019). Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 984–998. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.116>



LİTYUM-İYON BATARYA MODÜLÜNDE FARKLI DEŞARJ ORANLARININ HÜCRE SICAKLIKLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Furkan MUMCU¹

¹Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3835-638X>

Bilal SUNGUR²

² Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun, Türkiye.

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7320-1490>

Alırıza KALELİ³

³ Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye.

³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3234-5922>

Özet

Li-ion bataryalar, enerji yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve yüksek şarj-deşarj verimlilikleri nedeniyle elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji entegrasyonları ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu bataryaların termal performansı, hücreler arası sıcaklık farkları ve aşırı sıcaklık artışlarının önlenmesi için dikkatle yönetilmelidir. Bu çalışmada, bir Li-ion batarya modülünde farklıdeşarj oranlarının (2C ve 3C) her bir hücre üzerindeki sıcaklık etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, farklıdeşarj oranlarının batarya modülü içerisindeki sıcaklık dağılımını nasıl etkilediğini anlamak amacıyla tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar,deşarj oranının artmasıyla birlikte hücre sıcaklıklarında belirgin bir artış olduğunu ve sıcaklıkların batarya ömrünü ve güvenliğini olumsuz etkileyebilecek seviyelere ulaşabileceğini göstermiştir. Ayrıca, yüksekdeşarj oranlarında batarya modülünün termal dengesini sağlamak ve hücrelerin aşırı ısınmasını önlemek için etkili bir soğutma sisteminin gerekliliği vurgulanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, Li-ion batarya modüllerinin termal yönetimi konusundaki kritik noktaları belirleyerek, gelecekteki termal yönetim sistemlerinin tasarımı için önemli veriler sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Li-ion batarya, Elektrikli araçlar, Farklıdeşarj oranları, Batarya hücre sıcaklıkları

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT DISCHARGE RATES ON CELL TEMPERATURES IN A LITHIUM-ION BATTERY MODULE

Abstract

Li-ion batteries are widely used in many fields such as electric vehicles, renewable energy integrations and portable electronic devices due to their energy density, long cycle life and high charge-discharge efficiency. However, the thermal performance of these batteries must be carefully managed to avoid inter-cell temperature differences and temperature extremes. In this study, the temperature effect of different discharge rates (2C and 3C) on each cell in a Li-ion battery module is experimentally investigated. The experiments were designed to understand how different discharge rates affect the temperature distribution inside the battery module. The results show that there is a significant increase in cell temperatures with increasing discharge rate, and the temperatures can reach levels that can adversely affect battery life and safety. Furthermore, the necessity of an effective cooling system to maintain the thermal stability of the battery module at high discharge rates and to prevent overheating of the cells is emphasized. The findings of the study have provided important data for the design of future thermal management systems by identifying critical points in the thermal management of Li-ion battery modules.

Keywords: Lithium-ion battery, Electric vehicles, Different discharge rates, Battery cell temperatures.

Giriş

Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, çeşitli enerji depolama teknolojisi türleri arasında, güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu nedeniyle taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Diğer enerji depolama çözümleriyle karşılaştırıldığında, Li-ion bataryalar nispeten yüksek güç yoğunluğu, yüksek enerji yoğunluğu, kararlılık ve düşük özdeşaj oranları dahil olmak üzere pek çok olumlu özelliğinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, Li-ion bataryaların elektrikli araçlarda ve hibrit araçlardaki uygulamaları küresel olarak genişlemeye devam etmektedir. Bununla birlikte, Li-ion bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde çeşitli uygulamalarda kullanılabilmesi için elektriksel, kimyasal ve termal davranışlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir (Wang et al., 2016). Diğer taraftan, bu bataryaların performansı, ömrü ve güvenliği, çalışma sıcaklıklarıyla yakından ilişkilidir. Özellikle yüksekdeşaj oranlarında gerçekleştirilen uygulamalarda Li-ion batarya hücrelerinde ısı ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu ısı, hücre sıcaklıklarında artışa neden olmakta ve batarya hücreleri arasında termal dengesizlik riskini artırmaktadır. Bu durum, Li-ion batarya modüllerinde termal yönetim sistemlerinin önemini vurgulamakla birlikte,deşaj oranının hücre sıcaklıklarına etkisinin anlaşılmasını gerektirmektedir. Pratik uygulamalarda, kullanım koşullarının değişmesi durumunda Li-ion batarya modüllerinin karakteristik davranışları çok farklı olacaktır. Anahtar faktör olarak,deşaj oranının batarya modülü termal davranışları üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu nedenle, farklıdeşaj oranlarına bağlı olarak hücrelerin sıcaklık değerlerinin değişimi ve sıcaklık dağılımının detaylı bir şekilde incelenmesi hem Li-ion batarya modülü tasarımı hem de termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Liu et al., 2022). Literatürde birçok çalışma,deşaj oranının Li-ion bataryaların performansı üzerindeki etkisi üzerine kapsamlı araştırma çalışmaları yürütmüştür. Daud ve ark. (2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014) farklıdeşaj oranlarında lityum pillerin sıcaklığını test etmiş vedeşaj oranı arttıkça batarya yüzeyindeki sıcaklık farkının da arttığını tespit etmiştir. Yu ve ark. (Yu et al., 2021) farklıdeşaj oranlarında batarya sıcaklığı değişimini ölçmek için fiber optik sensörler kullanmış ve daha yüksekdeşaj oranlarında yapılan deneylerde bataryaların düzlem içi sıcaklık farkının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Saw ve ark. (Saw et al., 2014) diğer çalışmaları destekler nitelikte yapmış oldukları deneylerde hücrelerden üretilen ısının artandeşaj oranlarıyla büyüdüğüne, hücre sıcaklığı iledeşaj oranı arasında pozitif bir ilişki olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca düşükdeşaj oranlarında, batarya hücresinde üretilen ısının doğal konveksiyon yoluyla etkili bir şekilde dağıtılabildiğini gözlemlemişlerdir. Ye ve ark. (Ye et al., 2012) farklı ortam sıcaklıklarında 0.2C, 0.5C, 1C, 2Cdeşaj oranlarında yapmış oldukları deneylerin sonuçları Li-ion batarya sıcaklığının daha büyükdeşaj akımı ile daha hızlı yükseldiğini göstermektedir. Buna ek olarakdeşaj akımı büyük olduğunda, sıcaklığın hızlı bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Chang ve ark. (Chang et al., 2023) çalışmalarındadeşaj oranındaki artışla birlikte batarya tepe sıcaklığının daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıcadeşaj oranının artmasıyla birlikte tümdeşaj sürecinde açığa çıkan ısının kademeli olarak arttığı görülmüştür. Huang ve ark. (Huang & Lai, 2019) yaptıkları çalışmanın sonucu, elektrokimyasal reaksiyon hızının ve üretilen ısının zaman ve mekânda tekdüze olmadığını ve tekdüze olmama durumunundeşaj hızının artmasıyla birlikte artacağını göstermiştir.

Literatürde,deşaj oranlarının hücre sıcaklıklarına etkisini ele alan birçok çalışma bulunmakla birlikte, farklı batarya konfigürasyonlarının ve soğutma stratejilerinin bu etki üzerindeki rolü tam anlamıyla anlaşılmamıştır. Bu çalışmada, lityum-iyon batarya modüllerinde farklıdeşaj oranlarının hücre sıcaklıklarına ve batarya modülünün iç direnç değerine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, farklıdeşaj oranlarında hücrelere ait yüzey sıcaklıkları ölçülerek analiz edilmiş ve bu oranların hücre sıcaklıkları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarının, batarya modülü tasarımlarının ve termal yönetim sistemlerinin optimize edilmesi için katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Materyal ve Metod

Yapılan çalışmada 2900 mAh kapasiteye sahip 4x3 dizilimindeki 12 adet Li-ion batarya hücresi kullanılarak oluşturulan Li-ion batarya modülünün 2C ve 3Cdeşaj oranlarında gerçekleştirilen deneylerin hücre sıcaklıklarına ve batarya modülünün iç direnç değerine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında batarya modülü oluşturulurken kullanılan Li-ion batarya hücresine ait temel özellikler Tablo 1'de belirtilmiştir.

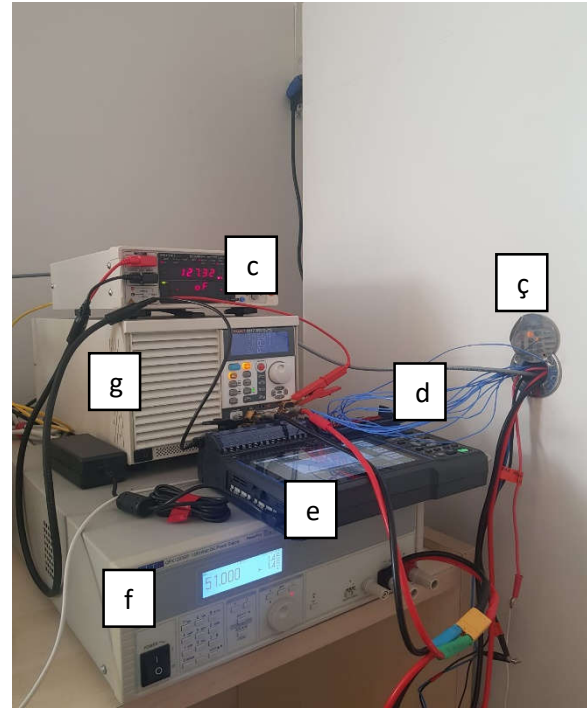
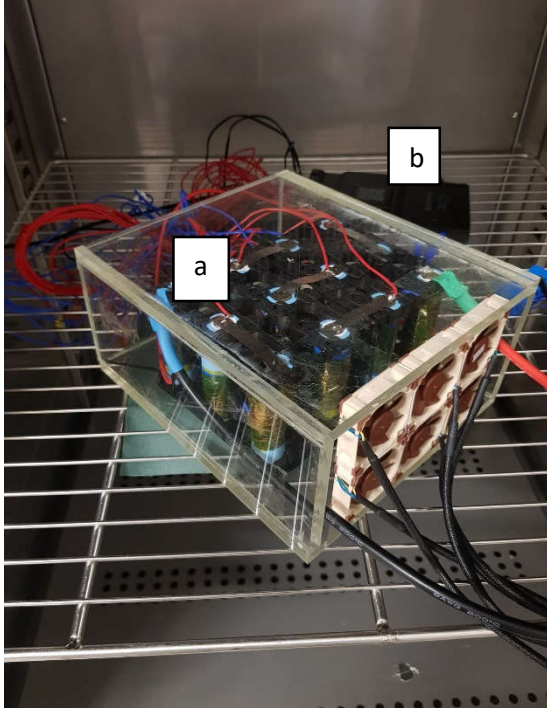
Tablo 1. Deneylerde kullanılan Li-ion batarya hücresinin özellikleri

Li-ion Batarya Hücresinin Türü	Nominal Kapasite (mAh)	Maksimum Deşarj Akımı (mA)	Standart Şarj Akımı (mA)	Nominal Voltaj (V)	Deşarj Kesim Gerilimi (V)	Çalışma Sıcaklığı (°C)
ASPİLSAN INR18650A28	2900 mAh	14000 mA	1450 mA	3.68 V	2.5 V	0°C/60°C (Şarj) -30°C/60°C (Deşarj)

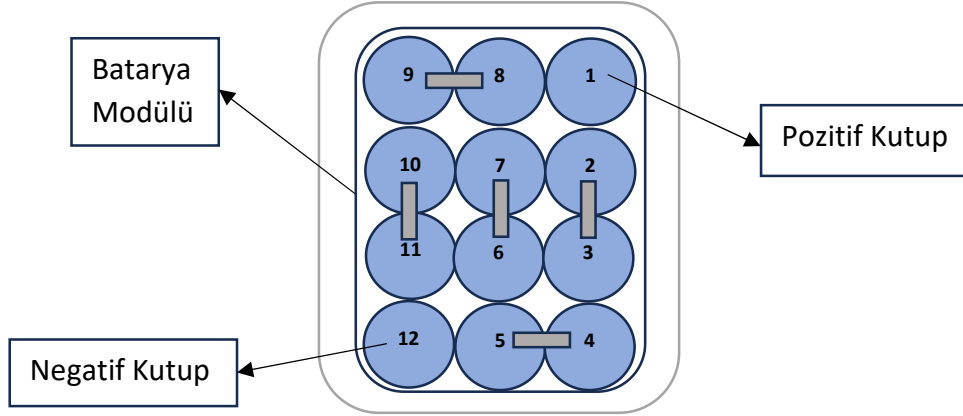
Bu çalışmada iki farklı deney gerçekleştirilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen deneylerdeki deşarj oranı ve akım değerleri Tablo 2’de belirtilmiştir. Başlangıç aşamasında 12 adet Li-ion batarya hücresi seri şekilde bağlantıları gerçekleştirilerek ve batarya yönetim sistemi (BYS) ile bağlantısı yapılarak Li-ion batarya modülü oluşturulmuştur. Daha sonrasında batarya modülünün 15°C ortam sıcaklığına ayarlanmış termal kabin içerisinde 2C ve 3C deşarj oranlarında programlanabilir elektronik yük ile deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler boyunca Li-ion batarya modülünde bulunan her bir Li-ion batarya hücresine ait yüzey sıcaklıkları, batarya hücreleri üzerinden termokupllar yardımıyla kaydedilerek ölçümler yapılmıştır. Li-ion batarya modülünde seri bağlı 12 adet hücreye ait dizilim Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Bu çalışma kapsamında deneylerde kullanılan Li-ion batarya modülü için deşarj oranları, akım değerleri ve ortam sıcaklığı.

Deşarj Oranı (C)	Deşarj Akımı (A)	Ortam Sıcaklığı (°C)
2 C	5.8 A	15°C
3 C	8.7 A	15°C



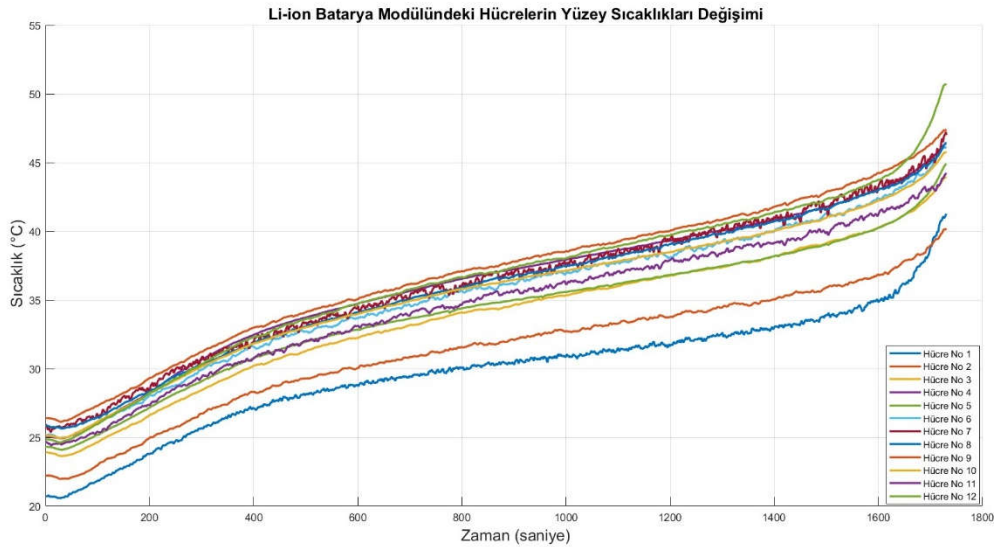
Şekil 1. Deney düzeneğini oluşturan elemanlara ait görüntüler: a) Batarya modülü, b) Batarya yönetim sistemi, c) İç direnç ölçüm cihazı, ç) Termal kabin, d) Termokupllar, e) Veri kaydedici, f) Doğru akım güç kaynağı(şarj), g) Programlanabilir elektronik yük(deşarj)



Şekil 2. Li-ion batarya modülünde seri bağlı 12 adet hücreye ait dizilim

Bulgular ve Tartışma

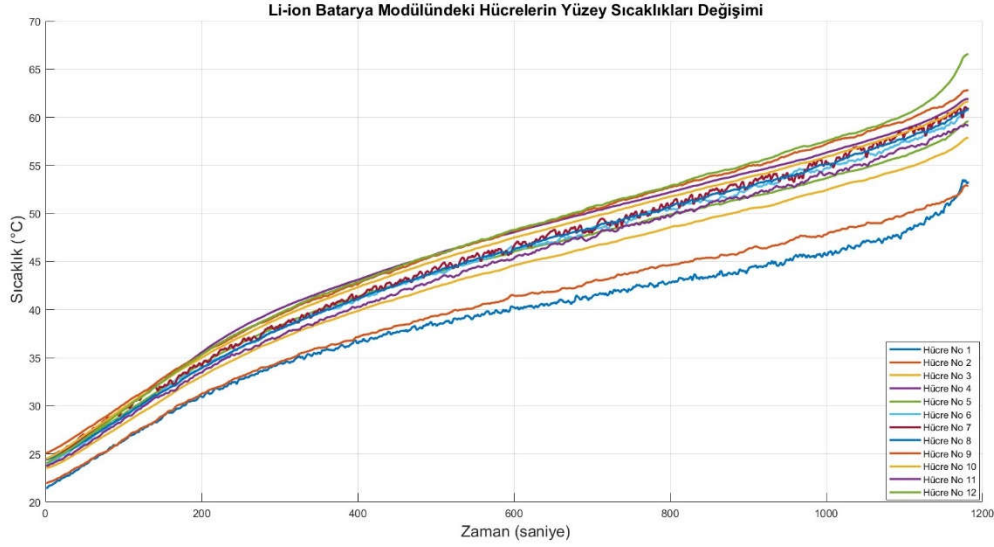
Çalışmanın bu kısmında Li-ion batarya modülü için 2C ve 3C deşarj oranlarında, 15°C ortam sıcaklığına ayarlanmış termal kabin içerisinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 3'te Li-ion batarya modülünde bulunan 12 adet hücre üzerinden 2C deşarj oranında termokupllar yardımıyla elde edilen sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deşarj oranı 2C değerinde meydana çıkan ısıyla birlikte batarya hücrelerinin yüzeyinde sıcaklık değerlerinin deney süresince yükseldiği görülmektedir. Ayrıca bu deneyde batarya modülü içerisinde en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 51°C olduğu görülmektedir. Aynı deney koşullarında batarya modülündeki hücrelere ait en düşük sıcaklık değeri ise 40°C civarında olduğu kaydedilmiştir.



Şekil 3. 2C deşarj oranıyla yapılan deneyde Li-ion batarya modülündeki hücre sıcaklıklarının değişimi

Aynı deney koşullarında Şekil 4'te Li-ion batarya modülünde bulunan 12 adet batarya hücresi üzerinden 3C deşarj oranıyla yapılan deneyde termokupllar yardımıyla elde edilen sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deşarj oranı 3C değerinde meydana çıkan ısıyla birlikte batarya hücrelerinin yüzeyinde sıcaklık değerlerinin deney süresince yükseldiği görülmektedir. Deşarj oranı 3C değerinde yapılan deney sonuçlarına göre sıcaklık artışları 2C deşarj oranına göre daha fazladır. Şekil 4'te verilen grafiğe göre 3C deşarj oranında en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 66°C olduğu görülmektedir ve bu değer 2C deşarj oranında

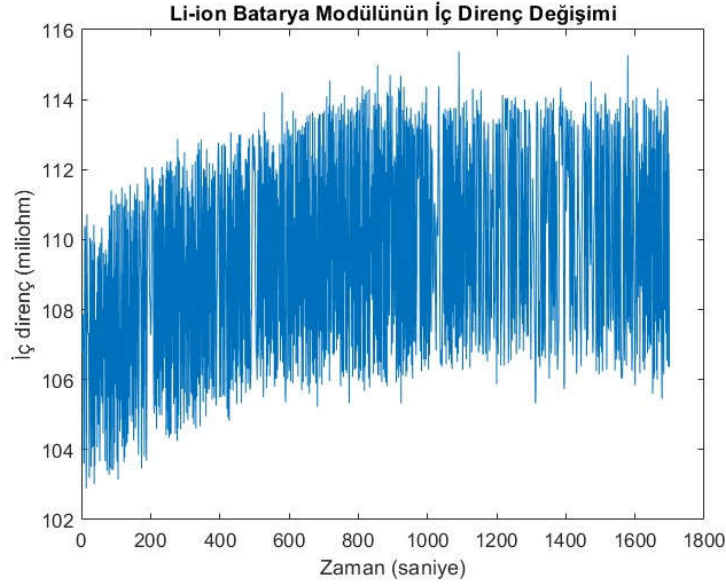
görülen değere göre 15°C daha fazladır. Diğer taraftan aynı grafikte en düşük batarya hücresi sıcaklığı ise yaklaşık olarak 53°C olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 3C deşarj oranıyla yapılan deneyde Li-ion batarya modülündeki hücre sıcaklıklarının değişimi

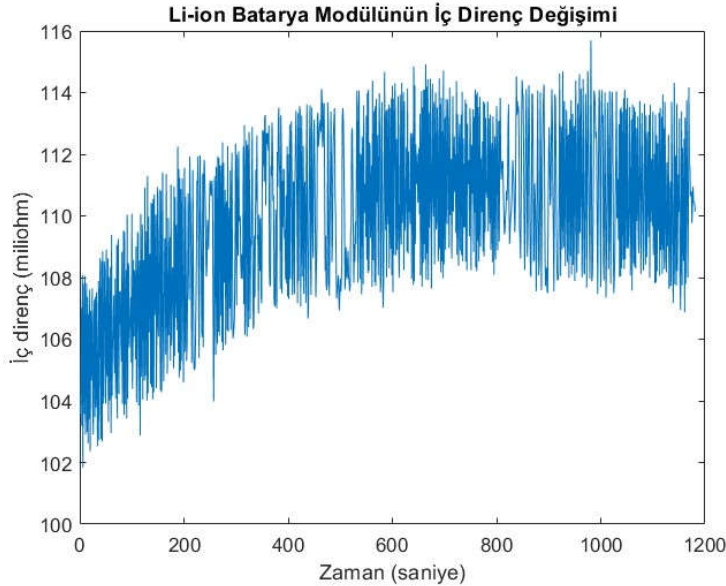
İki sistem incelendiğinde, düşük deşarj oranlarında Li-ion batarya hücreleri arasında termal dengenin belirli bir noktaya kadar yüksek deşarj oranlarına göre daha iyi olduğu görülmektedir. 3C deşarj oranıyla yapılan deneyde batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farklarının yüksek olması, aşırı ısınmalara ve termal dengesizliklere yol açmıştır. Buna karşın, 2C deşarj oranıyla yapılan deneylerde aşırı ısınmaların ve hücreler arası sıcaklık farklarının daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca 2C deşarj oranında hücrelere ait yüzey sıcaklıkları yaklaşık 50°C'nin altında olduğu görülmektedir, bu da bataryanın güvenliğini ve verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda meydana çıkan ısıyla beraber Li-ion batarya modülünde bulunan hücrelere ait sıcaklık değerleri zamanla yükselmiştir. Hücrelerde gerçekleşen sıcaklık artışı sonucunda Li-ion batarya modülünün iç direnç değerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. İç direnç değeri Li-ion bataryaların performansı üzerinde etkili bir göstergedir. İç direnç değerinin artması, bataryanın şarj ve deşarj süreçlerinde daha fazla enerji kaybına neden olur. Bu kayıplar, ısı şeklinde açığa çıkar ve bataryanın termal yönetimini zorlaştırır. Yüksek iç direnç, bataryanın enerji yoğunluğunu ve çevrim verimliliğini düşürür. Şekil 5 incelendiğinde 2C deşarj oranıyla yapılan deneyde batarya modülüne ait iç direnç değeri deney başlangıcında ortalama 107 miliohm olduğu görülmektedir. Ancak deney süresince iç direnç değeri sıcaklık artışıyla doğru orantılı olacak şekilde belirli bir noktaya kadar artmış ve en yüksek iç direnç değerinin 115 miliohm olduğu kaydedilmiştir. Sıcaklık artışı belirli bir noktaya ulaştıktan sonra iç direnç değeri deney sonuna kadar sabit bir aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir. İç direnç değerinin artış eğilimi gösterdiği süreçte batarya performansı bu durumdan olumsuz yönde etkilenmiştir.



Şekil 5. 2C deşarj oranıyla yapılan deneyde Li-ion batarya modülünün iç direncinde gerçekleşen değişim

Diğer taraftan Şekil 6 incelendiğinde 3C deşarj oranıyla gerçekleştirilen deneyde batarya modülüne ait iç direnç değeri deney başlangıcında ortalama 105 miliohm olduğu görülmektedir. Diğer taraftan deney süresince aynı şekilde iç direnç değeri sıcaklık artışıyla doğru orantılı olacak şekilde belirli bir noktaya kadar artmış ve en yüksek iç direnç değerinin yaklaşık 115 miliohm olduğu kaydedilmiştir. Bu durumda yapılan deneyde deşarj oranının artması sonucunda, deney başlangıcında iç direnç değeri 2C deşarj oranında yapılan deneye göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun nedeni 3C deşarj oranıyla yapılan deneyin başlangıcında batarya modülünün performansının iyi olduğu bir sıcaklık aralığı oluşmuştur ve bu süreçte batarya modülünün performansı olumlu yönde etkilenmiştir.



Şekil 6. 3C deşarj oranıyla yapılan deneyde Li-ion batarya modülünün iç direncinde gerçekleşen değişim

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Li-ion batarya modülünün 2C ve 3C oranında gerçekleştirilen deşarj deneylerinde termal davranışları incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen ana bulguların özeti şu şekildedir:

- 2C deşarj oranında yapılan deneyde batarya modülündeki hücrelerin sıcaklıkları deney süresince artmıştır ve hücrelere ait en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 51°C olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan aynı deney koşullarında batarya modülündeki hücrelere ait en düşük sıcaklık değeri ise 40°C civarında olduğu kaydedilmiştir.
- 3C deşarj oranında yapılan deneyde batarya modülündeki hücrelerin sıcaklık değerlerindeki artış 2C deşarj oranına göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 3C deşarj oranında en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 66°C olduğu görülmektedir ve bu değer 2C deşarj oranında görülen değere göre 15°C daha fazladır. Diğer taraftan aynı deneyde batarya hücrelerine ait en düşük sıcaklık ise yaklaşık olarak 53°C olduğu kaydedilmiştir.
- 2C deşarj oranında batarya modülünün iç direnç değeri sıcaklık artışıyla doğru orantılı olacak şekilde belirli bir noktaya kadar artmış ve en yüksek iç direnç değerinin 115 miliohm olduğu kaydedilmiştir. Sıcaklık artışı belirli bir noktaya ulaştıktan sonra iç direnç değeri deney sonuna kadar sabit bir aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir.
- 3C deşarj oranında batarya modülünün iç direnç değeri deney süresince sıcaklık artışıyla beraber belirli bir noktaya kadar artmış ve en yüksek iç direnç değerinin yaklaşık 115 miliohm olduğu kaydedilmiştir. Bu durumda yapılan deneyde deşarj oranının artması sonucunda belirli bir noktaya kadar batarya modülünün iç direnç değeri 2C deşarj oranıyla yapılan deneye göre daha düşüktür ve batarya modülünün performansı olumlu yönde etkilenmiştir. 3C deşarj oranında yapılan deney başlangıcında iç direnç değerinin 2C deşarj oranında yapılan deneydekine göre daha düşük olmasının sebebi deney başlangıcında batarya modülünün performansının iyi olduğu bir sıcaklık aralığı olmuştur ve bu süreçte de iç direnç değeri 2C deşarj oranıyla yapılan deneydekine göre daha düşüktür.

Yapılan çalışmada, farklı deşarj oranlarında gerçekleştirilen deneylerde Li-ion batarya modülünün termal davranışlarının anlaşılmasında önemli bir katkı sağlamıştır ve gelecekte batarya modülü tasarımı ve termal yönetim sistemleri gibi çalışmalar için rehberlik edebilecek nitelikte sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

Kaynaklar

2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). (2014). IEEE.

Chang, L., Chen, W., Mao, Z., Huang, X., Ren, T., Zhang, Y., & Cai, Z. (2023). Experimental study on the effect of ambient temperature and discharge rate on the temperature field of prismatic batteries. *Journal of Energy Storage*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106577>

Huang, Y., & Lai, H. (2019). Effects of discharge rate on electrochemical and thermal characteristics of LiFePO₄/graphite battery. *Applied Thermal Engineering*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113744>

Liu, S., Chen, J., Zhang, C., Jin, L., & Yang, Q. (2022). Experimental study on lithium-ion cell characteristics at different discharge rates. *Journal of Energy Storage*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103418>

Saw, L. H., Somasundaram, K., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2014). Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 249, 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.052>

Wang, H., He, F., & Ma, L. (2016). Experimental and modeling study of controller-based thermal management of battery modules under dynamic loads. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.041>

Ye, Y., Shi, Y., Cai, N., Lee, J., & He, X. (2012). Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 199, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.027>

Yu, Y., Vergori, E., Worwood, D., Tripathy, Y., Guo, Y., Somá, A., Greenwood, D., & Marco, J. (2021). Distributed thermal monitoring of lithium ion batteries with optical fibre sensors. *Journal of Energy Storage*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102560>

**PHOTOVOLTAIC MODULE PRODUCTION AND QUALITY STANDARDS AND THE EVALUATION OF TESTING IN MANUFACTURER'S QUALITY PROCESSES****Melisa EKŞİ**

M.Sc. Student, Kocaeli University, Faculty of Technology, Department of Energy System Engineering, Kocaeli-Türkiye (Responsible Author) ORCID: 0009-0006-1076-1980

Abdullah ZORLU

Renewable Energy Project Engineer, SGS Supervise Gözetme Etüd Kontrol Servisleri A.Ş., İstanbul-Türkiye, ORCID: 0000-0002-7453-6321

Mustafa ÖZCAN

Assoc.Prof., Kocaeli University, Department of Energy Systems Engineering, Kocaeli-Türkiye, ORCID: 0000-0001-6436-6368

Abstract

Developments in the solar energy industry require continuous improvement of Photovoltaic (PV) module production and quality control processes. Tests conducted to evaluate the durability, efficiency, and long-term performance of PV modules play a critical role in production and quality control processes. This study evaluates tests conducted under the IEC 61215 and IEC 61730 standards, along with the quality control processes carried out by manufacturers. The assessment and recommendations provided in this study will assist PV power plant investors in effectively managing their PV module procurement processes. While the IEC 61215 and IEC 61730 standards set the basic criteria for the certification and production processes of PV modules, manufacturers also continuously monitor the performance of their products through quality control tests. PV module manufacturers continuously monitor the performance of their products and improve module quality by conducting daily, weekly and monthly tests on raw materials according to reference values they determine themselves or receive from the supplier. The lack of a single standard for PV module quality criteria and the variation across manufacturers lead to excessive evaluations by project owners and consulting firms. Electroluminescence imaging is used to assess the quality of PV modules and is typically determined based on the manufacturer's quality standards. However, investors can redefine these criteria according to their specifications. Sharing the electroluminescence imaging results with investors enhances production transparency and product reliability. Standardizing quality tests strengthens the trust between manufacturers and investors. By requesting the repetition of manufacturers' standard quality tests, PV power plant investors can ensure the suitability of PV modules. Furthermore, sharing test results and information about raw materials during production helps prevent issues that could negatively affect PV power plant project performance. PV module manufacturers conduct routine quality tests without requiring accredited laboratories, and the frequency of tests varies across manufacturers. PV power plant investors should consider these differences when procuring modules.

Keywords: PV module, PV module performance, IEC 61215, IEC 61730, Electroluminescence testing

FOTOVOLTAİK MODÜL ÜRETİMİ VE KALİTE STANDARTLARI İLE ÜRETİCİ KALİTE SÜREÇLERİNDEKİ TESTLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ**Özet**

Güneş enerjisi endüstrisindeki gelişmeler, Fotovoltaik (FV) modül üretim ve kalite kontrol süreçlerinin sürekli iyileştirilmesini gerektirmektedir. FV modüllerin dayanıklılık, verimlilik ve uzun vadeli performansını değerlendirmek için yapılan testler, üretim ve kalite kontrol süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, IEC 61215 ve IEC 61730 standartları kapsamında gerçekleştirilen testlerin yanı sıra üretici firmaların gerçekleştirdiği kalite kontrol süreçlerini değerlendirmektedir. Çalışma kapsamında yapılan değerlendirme ve sunulan öneriler, FV güneş enerjisi santrali (GES) yatırımcılarının FV modül tedarik süreçlerini doğru

biçimde yönetmesine katkı sağlayacaktır. IEC 61215 ve IEC 61730 standartları, FV modüllerin sertifikasyonu ve üretim süreçleri için temel kriterleri belirlerken, üretici firmalar ayrıca kalite kontrol testleriyle ürünlerinin performansını sürekli takip etmektedir. FV modül üreticileri, hammaddeler üzerinde kendi belirledikleri veya tedarikçiden aldıkları referans değerlere göre günlük, haftalık ve aylık testler yaparak ürünlerinin performansını sürekli izlemekte ve modül kalitesini iyileştirmektedir. FV modül kalite kriterlerinin tek bir standarda dayandırılmaması ve üreticiden üreticiye farklılaşması proje sahipleri ve müşavir firmaların fazla değerlendirme yapmasına neden olmaktadır. Elektrolüminesans (EL) görüntüleme, FV modüllerin kalitesini değerlendirmek için kullanılır ve genellikle üreticinin kalite standartlarına göre belirlenir. Ancak yatırımcılar, bu kriterleri kendi şartnamelerine uygun şekilde yeniden tanımlayabilirler. Modül üreticilerinin EL görüntüleme sonuçlarını yatırımcılar ile paylaşması, üretim şeffaflığını ve ürün güvenilirliğini artırır. Kalite testlerinin standartlaştırılması, üretici ve yatırımcılar arasındaki güveni pekiştirir. FV GES yatırımcılarının, FV modül üreticilerinden standart testlerin tekrarlanmasını talep etmeleri, FV modüllerin uygunluğunu garanti altına alacaktır. Ayrıca, FV modül üreticilerinin üretim esnasında test sonuçları ve hammaddelerle ilgili bilgileri zamanında paylaşması, projelerin performansını olumsuz etkileyebilecek sorunları önler. FV modül üreticileri, rutin kalite testlerini akredite laboratuvarlar kullanmadan kendi bünyelerinde yapar ve test sıklığı üreticiden üreticiye değişir. FV GES yatırımcıları modül tedarik ederken bu farklılıkları dikkate almalıdır.

Anahtar Kelimeler: FV modül, FV modül performansı, IEC 61215, IEC 61730, Elektrolüminesans testi

GİRİŞ

Dünya genelinde sanayileşme, nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve yüksek yaşam standartları gibi etkenler enerji talebini artırmaktadır. Enerji talebindeki hızlı artış, doğal kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği ve yüksek enerji maliyetlerini beraberinde getirmektedir (Sağbaş & Başbuğ, 2018). Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması, sera gazı emisyonlarına neden olması ve buna bağlı olarak insan ve çevre sağlığı üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkiler yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) yönelimi gerekli kılmaktadır (Özyakışır & Ünver, 2020; Al Mubarak et al., 2024).

Dünya genelinde 1990 yılında 8.774 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep) birincil enerji tüketimi gerçekleşmiştir. 2021 yılında dünyada birincil enerji tüketim miktarı 14.214,91 Mtep' tir ve 1990 yılına göre %62,01 artış göstermiştir (Enerdata, 2023).

Dünya genelinde her yıl gerçekleşen tüketim artışlarını karşılamak için elektrik enerjisi santral yatırımları yapılmaktadır. Kurulması planlanan yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik enerjisi santralleri, fosil yakıt tüketimi ile oluşan sera gazı emisyonlarının azaltımına katkı sağlayacaktır (BP, 2023).

Küresel olarak enerji sektöründe dönüşüm gerçekleşmektedir. Fosil yakıt kaynaklarının kullanımını azaltmak için YEK'lerin sürdürülebilir şekilde kullanımı ve yaygınlaşması hedeflenmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre 2021-2023 yılları arasında yıllık enerji yatırımları yenilenebilir enerjide %24 artarken fosil yakıt yatırımları %15 artmıştır. Dünya genelinde 2023 yılında 447 GW GES kurulumu gerçekleştirilmiş ve toplam GES kapasitesi 1,6 TW seviyesine ulaşmıştır (SPE, 2024; IEA, 2023). Güneş ve rüzgar enerjilerinin, diğer yenilenebilir enerji teknolojilerine göre daha cazip olmasının nedenleri arasında, bu enerjilerin verimliliğinin artması, ilgili teknolojilerin gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesi sayılabilir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin diğerlerine kıyasla daha fazla politika desteği görmesi de artışı desteklemektedir (ETKB, 2024a).

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gereken temel teknoloji FV modüller olduğundan, bu modüllerin üretimi güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve elektrik üretimi sürecinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. FV modül üreticileri, üretim miktarı ve kurulu güç kapasitelerine göre bir listeye (Tier List) dahil edilir. Bu liste, bankalar ve yatırımcılar tarafından güvenilen ve yatırım yapılan üreticileri belirtmek için kullanılır, ancak FV modüllerinin kalite ölçütü değildir. Tier List, her üç ayda bir güncellenir ve özellikle Tier-1 üreticileri, daha yüksek tercih edilme oranı ve üretim kalitesi nedeniyle yatırımcılar tarafından seçilir. Türkiye'de GES kurulumları 2014 yılında başlamış olup, aynı yılın sonunda GES'lerin kurulu güç kapasitesi 40 MW'a ulaşmıştır. Bu kapasitenin, toplam kurulu güç içerisindeki payı %0,06 olmuştur. GES kurulu güç gelişimi yıllar içerisinde artmış, 2023 yılı sonu itibarıyla ise GES kurulu gücü 11.315,6 MW'a yükselmiş ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı %10,61 seviyesine ulaşmıştır (ETKB, 2024b).

FV modül teknolojisi, son yıllarda hızlı bir şekilde gelişmiş ve FV hücre tasarımlarında önemli yenilikler yapılmıştır. Bu gelişmeler, hücre boyutlarından bus ribbon sayısına kadar pek çok teknik özelliği etkilemiştir.

2017 yılında, monokristal veya polikristal tabanlı hücreler kullanılarak tasarlanan sistemlerde, bus ribbon sayısı genellikle 3 veya 4 iken, hücre boyutları 158,75x158,75 mm olmuştur. 2024 yılına gelindiğinde, bus ribbon sayısı yatırımcı tercihinine bağlı olarak 9-11 veya 16 arasında değişiklik göstermektedir. 16 bus ribbon kullanılan sistemlerde hücre boyutları 182x182 mm olmuştur. Ayrıca, kesim yapılarak kullanılan FV hücreler (half-cut) günümüzde en çok kullanılan hücre teknolojisidir. Bus ribbon sayısının artması hücre verimliliğini artırmış, bununla birlikte üretim hatlarında değişiklik yapılmasını ve harici istasyon kullanımını da gerektirmiştir. Hücre teknolojilerinde monokristal tabanlı üretim devam ederken perc (Passivated Emitter and Rear Cell) teknolojisine rekabet halinde olan TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. TOPCon teknolojisi ile yüksek iletkenlik enerji verimliliği performans sunmaktadır (Venkatadurgaprasad, 2024; Solardeland, 2024).

GES kapasitesi artış göstermeye devam etmektedir. Güneş enerji sektöründeki artış ile FV modül üretici sayısı artmaktadır. Türkiye’de 37’den fazla FV modül üretim fabrikası bulunmaktadır. Ülkemizde FV modül üretimi kapasitesi olarak Avrupa’da birinci, Dünya genelinde ise dördüncü sırada yer almaktadır (STB, 2024a). Türkiye’de teknoloji yatırımlarının artırılması için destek programları oluşturulmaktadır. HIT-30 kapsamının HIT-Güneş alanı için Türkiye’de yerli FV modül üreticilerinin hücre üretimindeki yetkinliklerini geliştirmek amaçlanmıştır. Güneş enerji sektörü için 2,5 milyar \$ destek bütçesi ayrılarak 15 GW’lık hücre üretim tesisi kapasitesi hedeflenmiştir. Türkiye’de 1 GW üzeri modül üretim kapasitesine sahip üretici firmaların kurulu gücü 16,5 GW seviyesindedir. Türkiye iç pazarında birçok firma olmasına karşın ihracat potansiyeli gözetilerek 1 GW üstü firmalar değerlendirilmiştir (PWC, 2024). Yüksek teknoloji yatırımların desteklenmesi ile katma değer oluşturularak ülke sanayisinin gelişimine katkı sağlanacaktır (STB, 2024b). Türkiye’de hücre üretimi yüksek teknoloji destek kapsamında öncelikli alanlar içerisinde yer alması kaliteli üretim ve ihracat hacminin artmasını sağlayacaktır.

Türkiye’de bulunan FV modül üretim fabrikalarının büyük çoğunluğunda FV hücre üretimi gerçekleştirilmemektedir. Ankara’da FV modül üretimi gerçekleştiren firma, entegre FV hücre üretimini hammaddeden itibaren gerçekleştiren tek tesistir (Kalyon PV, 2024a). FV hücre üretiminde polisilisyum kullanılarak önce ingot, ingotlar elde edildikten sonra kesilerek de 160 mikron kalınlığında wafer elde edilmektedir. Elde edilen waferlar kimyasal süreçlere maruz kalacak hücre üretimi sağlanmaktadır. Üretilen hücrelerden FV modül üretimi gerçekleştirilmektedir (Kalyon PV, 2024b).

GES tesis kurulumlarında çeşitli devlet teşvikleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ve yatırım aşamasında vergi muafiyeti için ihtiyaç duyulan yatırım teşvik belgesidir. Yatırımcılar yatırım teşvik belgesi alamadığı durumda katma değer vergisi ödemek durumunda kalacaktır. Ankara’da yer alan FV üretici firma dışında İzmir’de üretim tesisi bulunan bir firmada 2 GW kapasiteye sahip FV hücre üretim kapasitesine sahip olacak tesis kurulumu gerçekleştirdiği ve kurulum aşamasında olduğu belirtilmiştir (Smart Enerji, 2024). Ülkemizde gerçekleştirilen yenilenebilir enerji yatırımlarına yatırım teşviği verilmektedir. Yurtiçinde üretilen FV modüller yatırım teşviği kapsamında yer alırken Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından sınırlandırma getirilmiştir. Güneş enerjisine dayalı elektrik üretim tesis yatırımları, üretim süreci ingot dilimleme aşamasından veya öncesindeki bir aşamadan başlamadan yurt içinde üretilen güneş hücreleri kullanılarak üretilen güneş modüllerini kapsayacak şekilde sınırlandırılmıştır (T.C. Resmi Gazete, 2024a). Belirtilen sınırlandırma tekrardan değerlendirilmiş ve teşvik kapsamında değerlendirilebilmesi için 28 Şubat 2025 tarihine kadar vize müracaatında bulunarak teşvik kapsamına girebileceği ifadesi eklenmiştir (T.C. Resmi Gazete, 2024b).

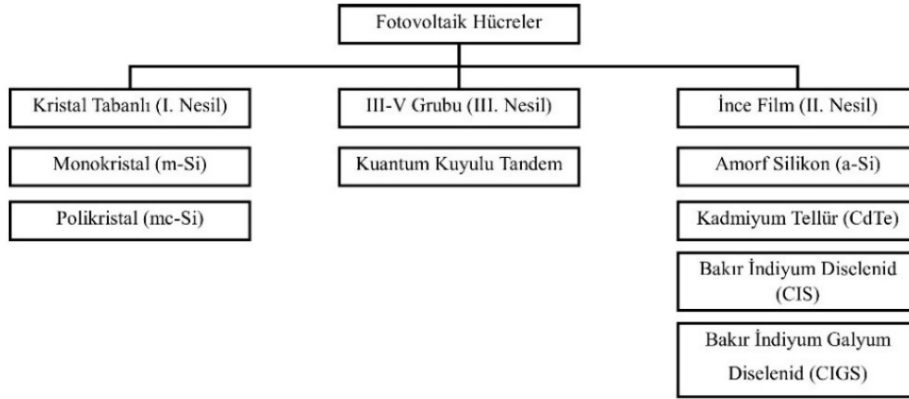
Güneş enerji santrallerinde güvenilirlik, verimlilik ve kaliteyi sağlamak için uluslararası standartlar büyük bir rol oynamaktadır. FV sistemlerde bu standartlar hem üretim sürecinde hem de performans değerlendirmelerinde rehberlik etmektedir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) standartlarında güneş enerjisi ile ilgili olarak 13 adet standart bulunmaktadır. Bu standartlar; IEC 61215, IEC 61730, IEC 60904, IEC 61701, IEC 62716, IEC 62804, IEC 62446, IEC 61724, IEC 61727, IEC 61683, IEC 62093, IEC 62548, IEC 62915 olarak belirlenmiştir. Belirlenen standartlar FV modülün üretim aşamasından sahada tasarım, performans ve değerlendirmelere göre rehberlik eden standartlardır. Ancak FV modül üretiminde kaliteyi belirlemek için IEC 61215 ve IEC 61730 standartları kullanılmaktadır (IEC, 2021; IEC 2024). IEC 61215 standardı güneş modüllerinin performansını etkileyen asgari tasarım kriterlerini içerirken, IEC 61730 standardı ise elektriksel kısa devre, yangın riski, sıcak bölge vb. santral güvenliğini etkileyen tasarım kriterlerine odaklanır (IEC, 2021; IEC 2024, 2023; Solarian Enerji, 2023).

FV modüllerin ilgili standartlara ve gerçekleştirilen kalite kontrol süreçlerine uygun olarak üretilmesi, modüllerin ekonomik ömrü boyunca üretiminde gerçekleşecek azalmanın lineer olabilmesi ve santralde olması muhtemel yangın, elektrik kaçağı güvenlik riskini engellemek için önemlidir. Bu önem dikkate alınarak bu çalışmada FV modül üretim sürecindeki standartlar ve kalite kontrol testleri incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümü giriş bölümüdür. Çalışmanın ikinci bölümünde FV hücre teknolojileri incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, FV modül yapısı ve üretim prosesi açıklanmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde, FV modül üretimi ile ilgili standartlar değerlendirilmiştir. EL görüntülemenin sahip olduğu kritik önem dikkate alınarak çalışmanın beşinci bölümünde FV modüllerin EL görüntülemeye gözlemlenebilecek sorunlar açıklanmıştır. Çalışmanın altıncı bölümü sonuç bölümüdür. Bu bölümde çalışmanın genel sonuçları verilmiştir. Çalışmanın son bölümü tartışma ve öneriler bölümüdür.

1. FV HÜCRE TEKNOLOJİLERİ

FV hücre üzerine düşen fotonlar elektrik enerjisine çevrilmektedir (Ekinci, 2019). FV hücreler, hücre üretim yöntemlerine göre farklı isimlerle adlandırılmaktadır. FV hücreler genel sınıflandırma olarak; Kristal Tabanlı (1. nesil) hücreler, İnce film hücreler (2. nesil) ve III-V grubu FV hücreler (3. nesil) şeklinde sınıflandırılırlar (Koç & Çelik, 2022) (Şekil 1.)



Şekil 1. FV hücre çeşitleri (Koç & Çelik, 2022)

2.1. Kristal Tabanlı (I. Nesil) FV Hücreler

Bu tür FV hücrelerde hammadde olarak yüksek saflıkta silisyum kristalleri kullanılır. Monokristal ve polikristal FV hücreler olarak iki ana çeşidi bulunur. İleri teknoloji gerektiren bir üretimdir. Verimleri diğer yöntemlerle üretilen hücrelere göre daha yüksek ve ömürleri daha uzundur. Kristal yapıları düzenli olan monokristal FV hücrelerin kristal yapıları düzenlidir ve bu yüzden üretim zor, maliyeti yüksektir. Polikristal FV hücrelerde ise kristal yapısındaki çok az miktarda olan bozukluklar bu tip hücrelerin verimlerinin bir miktar düşmesine sebep olmaktadır. Ancak monokristal FV hücrelere kıyasla üretimindeki kolaylık ve maliyetinin düşük olması tasarımlarda bu tip hücrelere yönelimin artmasını sağlamaktadır (Koç & Çelik, 2022).

2.2. İnce Film (II. Nesil) İkinci Nesil FV Hücreler

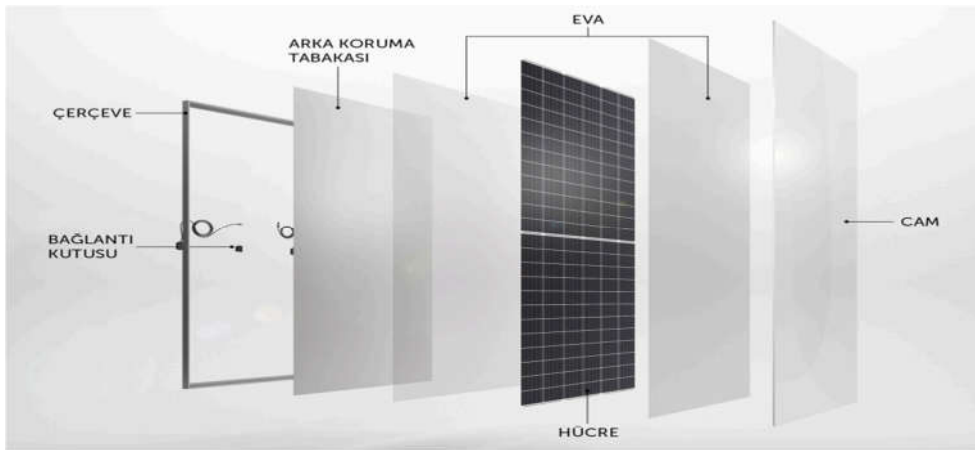
İnce film güneş hücreleri diye adlandırılan bu FV hücreler daha çok çatı uygulamaları için imal edilmiştir. Esnek yapıda üretildikleri için bazı tasarımlar bükülebilirler. Diğer hücrelere göre üstünlüğü, kolay taşınabilir ve kurulabilir olmasıdır. Ancak verimleri düşüktür. İnce film FV hücrelerde, ışığın daha geniş bant aralığında faydalandığı için kapalı havalarda birinci jenerasyonlara göre verimleri bir miktar daha yüksektir. Bu tip bazı hücreler kızıl ötesi ışık altında bile elektrik akımı verebilmektedir (Koç & Çelik, 2022).

2.3. III-V Grubu (III. Nesil) FV Hücreler

Periyodik tablodaki III (bor, alüminyum, galyum, indiyum, vb.) ve V (azot, fosfor, arsenik, antimon, vb.) gruplarına ait elementlerden oluşan yarı iletken malzemeleri kullanan hücrelerdir. Organik FV hücre olarak adlandırılan üçüncü nesil FV hücrelerde amaç hücrenin üst yüzeyini aktif polimer tabaka ile kaplayarak, güneşten gelen ışığın hücre üzerindeki katmanda mümkün olduğunca fazla absorbe edilmesini sağlamaktır. Birkaç katman kullanılarak üretilen bu hücrelerde optik geçirgenlik ve maksimum verimin sağlanabilmesi için bütün katmanların kristal yapıları birbiriyle uyumlu olmalıdır (Koç & Çelik, 2022).

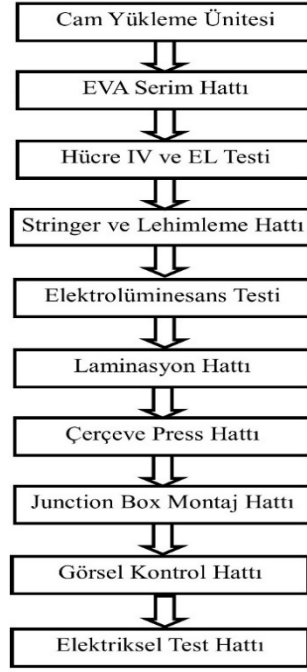
2. FV MODÜL ÜRETİMİ

FV hücrelerinin yaygın kullanılabildiği silisyum bazlı 1. Nesil hücrelerdir. Yarı iletken teknolojisinde en çok tercih edilen malzeme silisyumdur. Doğada kuartz ve kum (SiO_2) içeriğinde bol miktarda bulunan silisyum, FV modül üretiminde kullanılmak üzere saf halde elde edilmelidir. Bu amaçla, kuartz işlenerek %99 oranında silika elde edilir. Silisyum saflaştırılması için yüksek ısıya tabi tutulur ve SiO_2 indirgenerek yüksek oranda saf silisyum (metalürjik silisyum) elde edilir. Metalürjik silisyum, farklı yöntemler kullanılarak Monokristal Silisyum veya Polikristal Silisyum haline gelene kadar çeşitli kimyasal işlemlere maruz kalır. Monokristal Silisyum veya Polikristal Silisyum haline gelen metalürjik silisyum, bir ingot (silisyum bloğu) haline gelir. Daha sonra Monokristal Silisyum veya Polikristal Silisyum ingotları ince dilimler (wafer) halinde kesilir ve yüzey işlemlerine tabi tutulup, elektriksel bağlantılar eklendikten sonra ve FV hücreleri tamamlanır. Bu süreç, verimli ve etkili bir şekilde FV hücrelerin üretimi için hayati bir öneme sahiptir (Ekinci, 2019; Koç & Çelik, 2022). Şekil 2’de FV modül bileşenleri gösterilmektedir (Smart Enerji, 2023).



Şekil 2. FV modül yapısı (Smart Enerji, 2023)

Monokristal veya polikristal hücrelerin birbirine seri veya paralel bağlanmasıyla FV modül oluşur. FV hücrelerden istenilen akım, gerilim ve güç değerlerine ulaşmak hedeflenir. FV hücrelerin bir araya getirilmesi ve modül haline getirilmesi süreçleri Stringer hattındaki robot kollar vasıtasıyla kasetlerdeki hücrelerin string olması için sırayla yerleştirilmesiyle başlar. FV hücrelerin bir string olabilmesi için sıcaklık ve flux yardımıyla lehimleme gerçekleştirilir. Lehim işleminden sonra FV hücreler, etilen-vinil-asetat (EVA) üzerine yerleştirilir. EVA, soğurma özelliği yüksek temperlenmiş cam üzerine serilidir. EVA, FV hücreleri dış etkilerden koruyan polimer bir malzemedir. FV hücrelerin hem ön hem de arka yüzeyinde bulunur. Arka EVA'nın üzerine de TEDLAR adı verilen arka kılıf serilir. Bu malzeme güneş modüllerinde UV ışınları, yüksek sıcaklık ve nem gibi birçok etkene karşı korur ve FV modülün ömrünü uzatır. EVA ve TEDLAR tarafından koruma altına alınan FV hücreler özel laminatörler içinde belirli süreler yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta bekletilir. Böylece tüm FV hücreler, EVA, TEDLAR ve cam homojen olarak modülü oluşturmaktadır. Daha sonra bağlantı kutusu denilen materyal FV modüle yerleştirilir. Bağlantı kutusu, laminasyon işleminin ardından yerleştirilir ve gölgeleme etkilerinin en düşük değere indirmek için kullanılan By-Pass (atlama) diyotları içerir. Tüm bu işlemlerin ardından FV modül bir güç üretici halini alır (Ekinci, 2019) (Şekil 3).



Şekil 3. FV modül üretim hattı süreci

FV modül üretimi için gerekli hammaddeler fabrikaya girişi esnasında kalite kontrol testlerine tabi tutulmaktadır. Hammadde giriş testleri olarak, şok rezistans testi, temperleme testi, EVA/backsheet küçülme testi, EVA/backsheet çekme testleri, cam uzunluk, kalınlık ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Bağlantı kutusu için direnç kontrolleri, çekme testleri yapılmaktadır. Alüminyum çerçeve testleri de bu kapsamda yer alırken hat üzerinde montaj esnasındaki sorunları değerlendirmek amaçlı üretim hattından da numune ölçüm yapılmaktadır.

FV modül üretim sürecinde kullanılan malzemelerde kalite kontrol gerçekleştirilmektedir. Kalite kontrol süreçlerinde gerçekleştirilen kapsamlar aşağıda verilmiştir.

FV modül üretiminde tip ve kalite testleri dışında fabrika içerisinde modül sertifikasyonu sonrası üretim hattında kalite seviyesini artırmak ve kontrolün düzgün gerçekleştirilmesi için testler yapılmaktadır.

IEC 61215 standardı tasarım yeterliliği ve tip onayları için belirlenmiştir. Üretici firmalar, şok rezistans, temperleme, EVA/backsheet küçülme ve çekme testleri gibi standartlarda belirtilen testlerden ayrı olarak da hammadde ve yarı mamul durumdaki ürünler için kalite kontrol testleri gerçekleştirmektedir. Her üretici firma farklı parametre ve değerlerde bu testleri gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada Türkiye’de yer alan dört farklı FV modül üretici firmanın üretim hattındaki kalite kontrol süreçleri değerlendirilmiştir. IEC kapsamında gerçekleştirilen kabin testlerinde modül için kullanılan hammaddeler sabit kullanılmıştır. Modülün almış olduğu sertifika, kabin testlerinde kullanılan aynı marka ve model ürünlerin kullanıldığı kapsam için geçerlidir. Hammaddelerde bir değişiklik olması durumunda tekrardan kabin testleri gereklidir. Üretim hattında kullanılan ekipmanların etiket bilgilerindeki teknik parametreler gözetilerek fabrika kalite kontrol süreçleri oluşturulmaktadır. Fabrikada üretim öncesi, üretim esnasında ve üretimden sonra gerçekleştirilen kalite kontrol testleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Üretim hattında gerçekleştirilen kalite kontrol süreçleri

Aşama	Gerçekleşen İşlemler
Cam Yükleme Ünitesi	Camlar yüklendikten sonra yüzey kontrolü ve temizleme işlemlerinden geçer. Bu aşamada, yüzeydeki çatlaklar ve deformasyonlar tespit edilir.
EVA Serim Hattı	EVA serimi için öncelikle hat kontrolü sağlanır. Serimi gerçekleştirecek cam boyutlarına göre sensörler ebat belirleyip kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Boyutsal hata meydana geldiği durumda EVA tam olarak serilmediğinden laminasyon sürecinde hava boşluğu oluşumuna sebebiyet verebilir.
Hücre IV ve EL Testi	Test yapılırken hücrenin bir solar simülasyon altında elektrik performansı test edilir. Ayrıca kalite testi olarak da yüzey kalitesi, kırılmalar ve çatlaklar gibi istenmeyen olumsuz etkiler kontrol edilir.
Stringer ve Lehimleme Hattı	Güneş hücreleri üzerindeki mikro çatlaklar ve deformasyonlar tespit edildikten sonra, üretim hattında hücreler dikkatlice hizalanarak dizilir. Stringer makineleri, hücrelerin üzerine flux püskürttükten sonra kızılötesi veya lazer kullanarak lehimleme işlemi gerçekleştirir. Seri üretim esnasında günlük olarak ribbon (iletken tel) çekme testi gerçekleştirilir. Ribbon çekme testinde alt sınır değer 1.4 N olarak belirtilmesine karşın çekme testi alt sınır değeri 2 N olarak uygulanmaktadır.
EL Testi	EL testinde belirlenen bulgular fabrikanın kalite yönetim birimi tarafından değerlendirilerek kabul kriterleri oluşturulmaktadır. Fabrika kabul kriterleri kapsamında üretilmiş oldukları ürünlere A sınıfında garanti kapsamı taahhüt etmektedir. EL testi laminasyon öncesi ve sonrası yapılmaktadır. Burada laminasyon öncesi düzeltilebilecek bulguları belirleyip tamir edebilmektedir. Laminasyondan sonra oluşan bulgularda ise hat üzerinde kronik bir arıza veya sorun olup olmadığını tespit edebilmektedir.
Laminasyon Hattı	Laminasyon hattında istasyon FV modüllerin farklı sıcaklık ve basınç seviyesinde pres yaparak yapısının homojen olması sağlanmaktadır. Laminasyon hattının kontrolü için ise Jel içerik testi gerçekleştirilmektedir.
Çerçeve Press Hattı	Çerçeve pres hattında kullanılacak ürünler, tedarikçi firma tarafından sevki gerçekleştirildikten sonra boyutsal kontrolleri yapılmaktadır. Ölçümler şartnamede belirtilen tolerans sınırları içerisinde ve eloksallarda bir bozukluk olmadığı, eloksallarda kaplama kalınlıklarının da içeren ölçüm raporlarının paylaşılıp kontrolü sağlandıktan sonra hatta besleme gerçekleştirilmektedir.
Junction Box (JB) Montaj Hattı	Bu hat üzerinde kullanılacak bağlantı kutularının silikon kullanılmadan önce kontrolleri yapılmaktadır. Herhangi bir kısa devre ve yapısal bozukluk olmadığı durumda kullanıma devam edilmektedir. Bazı firmalar yalnızca görsel kontrol yaparken bazıları diyotları ölçmektedir. Kullanılan A ve B silikonların 1/5, 1/6 oransal kontrolü yapılmaktadır. Karışımın oransal değeri kürlenme süresini etkileyeceğinden kontrolü sağlanmalıdır.
Görsel Kontrol Hattı	FV modüllerin fabrika görsel kontrol kriterlerine göre hat üzerinde kontrol yapılmaktadır. Temperli cam yüzeyi temizlenmektedir.
Akım Gerilim Karakteristiği Ölçümü (I-V)	Flash test gerçekleştirilir ve sonuçları kontrol edilir.
Hi-Pot Test	Elektriksel hi-pot testleri gerçekleştirilir.
EL Test	EL testi gerçekleştirilir.

Tablo 1’ de belirtilen test ve kontroller dışında kalite ekibi tarafından paket kontrolü, etiket kontrolü gerçekleştirilmektedir. Bazı firmalarda sevk edilecek her tır başına bir paket açılarak görsel kontrol yapılmaktadır. Bazı firmalar ise çıkış sevkiyatı öncesi bir paket modül açılarak tekrardan EL ve görsel kontrol gerçekleştirmektedir. Üretici firma tarafından paylaşılan flash test, hi-pot ve EL test sonuçları

değerlendirilmelidir. Uygunsuz bulunan ürünlerde tedarikçiler ile görüşülmeli ve ürün tedarikçilerinin yıllık rutin kontrollerinin gerçekleştirilmesi üretim hattındaki toplam kaliteyi artırabilecek potansiyeldedir.

3. FV MODÜL STANDARTLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

FV modül üretimi ve tasarım kriterleri için IEC tarafından 13 adet standart oluşturulmuştur. FV modüller, GES yatırım maliyetlerinin yanında üreteç görevi gördüğünden enerji kaynağı olarak önem arz etmektedir. Ayrıca, bu modüllerde gözle görülmeyen birçok kusur bulunabileceğinden, çeşitli performans ve güvenlik testleri ilgili laboratuvarlar tarafından titizlikle uygulanır. IEC 61215 standardı, güneş modüllerinin performansını etkileyen asgari tasarım kriterlerini içerirken, IEC 61730 standardı ise GES güvenliğini etkileyen tasarım kriterlerine odaklanır. FV modüller, IEC 61215 ve IEC 61730 standartlarına göre uygulanan testleri başarıyla geçtiklerinde sertifika almaya hak kazanır (IEC, 2021; IEC 2024, 2023; Solarian Enerji, 2024).

Üretilen güneş modüllerinin uzun ömürlü olmasını sağlamak amacıyla, üretim öncesinde, üretim sırasında ve sevkiyat öncesinde FV modül üretim fabrikalarında sürekli denetimler gerçekleştirilir. Bu denetimler sayesinde, proje için üretilen FV modüllerin kaliteli bir şekilde üretildiği garanti altına alınır. FV modüllerin ürün kalitesini değerlendiren IEC 61730, IEC 61215 standartları asgari kalite koşullarını belirtir. Bu nedenle, FV modül üreten fabrikalar, kendi kalite kabul kriterlerine sahiptir. Bu kriterlerin mühendislik temellerine dayandırılarak, proje için özel olarak belirlenmesi büyük önem taşır (IEC, 2021; IEC 2024).

4.1. TS EN 61215 Standardı

IEC 61215 standardı, genel açık hava iklimlerinde uzun süreli çalışmaya uygun karasal FV modüllerin tasarım yeterliliği ve tip onayı için IEC gerekliliklerini ortaya koyar. Bu standart, kristal silikon modül türleri ve ince film modüller gibi tüm karasal FV modüllerde uygulanmak üzere tasarlanmıştır (IEC, 2021; IEC, 2024; Solarian Enerji, 2023).

Bu standart, kristal tabanlı silikon ve incel film teknolojisine sahip modülleri kapsamaktadır. Farklı hücre teknolojisi ve FV modül yapısında oluşan durumları ele almaz, ancak bu tür FV modüllerin test edilmesi için bir temel olarak kullanılabilir. Bu kapsamda yapılan testler, modülün elektriksel ve termal özelliklerini belirlemek ve makul maliyet ve zaman kısıtlamaları dahilinde, modülün kapsamda tanımlanan iklimlerde uzun süreli maruz kalmaya dayanabileceğini göstermek için referans sağlar (IEC, 2021; IEC, 2024; Solarian Enerji, 2023).

FV modül örnekleri, belirtilen malzemeler ve bileşenler kullanılarak, ilgili çizimler ve işlem föylerine uygun şekilde üretilmiş olmalı ve üreticinin normal denetim, kalite kontrol ve üretim kabul prosedürlerine tabi tutulmuş olmalıdır. FV modülleri her detayıyla eksiksiz olmalı ve üreticinin taşıma, montaj ve bağlantı talimatlarıyla birlikte gelmelidir. Test edilecek FV modüller, yeni bir tasarımın prototipleri ise ve üretimden değilse, bu durum test raporunda belirtilmelidir. IEC 61215-1:2021 ve IEC 61215-2:2021 standartlarına göre gerçekleştirilen testler Tablo 2’de verilmiştir (IEC, 2021).

Tablo 2. IEC 61215 standardına göre kalite testleri

Test	Başlık	Referans Standartlar
MQT 1	Görsel kontrol	IEC 61215-2:2021
MQT 2	Maksimum güç belirleme	
MQT 3	Yalıtım testi	
MQT 4	Sıcaklık katsayılarının ölçümü	
MQT 06.1	STC performans testleri	
MQT 07	Düşük ışınımda performans testleri	
MQT 08	Açık havaya maruz kalma testleri	
MQT 09	Hot-spot dayanıklılık testi	
MQT 10	UV ön koşullandırma testi	
MQT 11	Termal döngü testi	
MQT 12	Nem donma testi	
MQT 13	Nem ısı testi	

MQT 14	Sonlandırmaların sağlamlığı	
MQT 15	Islak kaçak akım testi	
MQT 16	Statik mekanik yük testi	
MQT 17	Dolu testi	
MQT 18	By-pass diyot testi	
MQT 19	Stabilizasyon	
MQT 19.1	İlk stabilizasyon	
MQT 19.2	Son stabilizasyon	IEC 61215-1:2021
MQT 20	Döngüsel (dinamik) mekanik yük testi	
MQT 21	Potansiyel kaynaklı bozunma testi	IEC 61215-2:2021
MQT 22	Bükme testi	

4.2. TS EN 61730 Standardı

IEC 61730 standardı bir FV modülünün güvenlik yeterliliği için yerine getirmesi gereken testleri listeler. IEC 61730-2 ve IEC 61730-1 birlikte güvenlik yeterliliği için uygulanır (IEC, 2024).

Bu standartta belirtilen test sıralaması, FV modüllerinin tüm olası uygulamalarında karşılaşılabilecek tüm güvenlik unsurlarını test etmeyebilir. Yüksek voltajlı bir sistemde kırık bir FV modülünün oluşturabileceği elektrik çarpması tehlikesi gibi bazı konular, sistem tasarımı, konumu, erişim kısıtlamaları ve bakım prosedürleri ile ele alınmalıdır (IEC, 2024).

Bu standardın amacı, yapısal olarak değerlendirilen FV modüllerinin güvenliğini doğrulamak için test sırasını sağlamaktır. Test sırası ve geçiş kriterleri, FV modüllerinin iç ve dış bileşenlerinin yangın, elektrik çarpması ve/veya kişisel yaralanmaya neden olabilecek potansiyel arızalarını tespit etmek üzere tasarlanmıştır. Standart, temel güvenlik test gereksinimlerini ve FV modülünün son kullanım uygulamalarına bağlı olarak ek testleri tanımlar. Test kategorileri arasında genel inceleme, elektrik çarpması tehlikesi, yangın tehlikesi, mekanik stres ve çevresel stres bulunur. TS EN 61730 standardı kapsamında tanımlanan ana testler Tablo 3'te verilmiştir (IEC, 2024).

Tablo 3. TS EN 61730 standardı kapsamında tanımlanan ana testler

Ana Test Başlığı	Gerçekleştirilme Amacı
Çevresel Stres Testleri	Modülün hava koşullarındaki dayanım ve uygunluğunu değerlendirmek
Genel İnceleme Testleri	Modülün görsel kontrollerini yapmak
Elektrik Çarpma Tehlikesi Testleri	Modülün elektriksel kaçığının kontrolü
Yangın Tehlikesi Testleri	Modülün yangın riskini değerlendirmek
Mekanik Stres Testleri	Modülün mekanik dayanımını kontrol etmek

Tablo 4'te IEC 61730 kapsamındaki çevresel stres testleri verilmiştir (IEC, 2024).

Tablo 4. Çevresel stres testleri

Test	Başlık	Referans Standartlar	Dayandığı Standart (IEC 61215-2)
MST 51	Termal döngü (TC50 ve TC200) testi	-	MQT 11
MST 52	Nem dondurma (HF 10) testi	-	MQT 12
MST 53	Nemli ısı (DH200 ve DH1000) testi	-	MQT 13
MST 54	Ultraviyole ön şartlandırma testleri	-	MQT 10
MST 55	Soğuk şartlandırma testleri	IEC 60068-2-1	-
MST 56	Kuru ısı koşullandırma testleri	IEC 60068-2-2	-

Çevresel stres testleri modüllerin hava koşullarındaki dayanım ve uygunluğunu değerlendirmek için gerçekleştirilmektedir. Genel inceleme testleri ise modülün görsel kontrol ve sistem performansını

değerlendirmek için gerçekleştirilmektedir. IEC 61730 kapsamındaki genel inceleme testleri Tablo 5'te verilmiştir (IEC, 2024).

Tablo 5. Genel inceleme testleri (IEC, 2024).

Test	Başlık	Referans Standartlar	Dayandığı Standart (IEC 61215-2)
MST 1	Görsel inceleme	-	MQT 01
MST 2	STC performans testleri	-	MQT 6.1
MST 3	Maksimum güç belirleme	-	MQT 02
MST 4	İzolasyon kalınlığı testi	-	-
MST 5	İşaretlemenin dayanıklılığı	IEC 60950-1	-
MST 6	Keskin köşe-kenar testleri	-	-
MST 7	By-pass diyot fonksiyon testleri	-	-
MST 57	Yalıtım koordinasyonunun testleri	IEC 60664-1	-

FV modüllerin ekonomik ömrü boyunca elektriksel bir kaçağa sebebiyet vermemesi açısından elektrik çarpma tehlikesi testleri yapılmaktadır. Elektriksel testlerde darbe gerilim, izolasyon ve ıslak kaçak akım gibi elektrik tehlikelerini incelemek için gerçekleştirilmektedir. IEC 61730 kapsamındaki Elektrik Çarpma Tehlikesi Testleri Tablo 6'da verilmiştir (IEC, 2024).

Tablo 6. Elektrik çarpma tehlikesi testleri

Test	Başlık	Referans Standartlar	Dayandığı Standart (IEC 61215-2)
MST 11	Erişebilirlik testi	IEC 61032	-
MST 12	Kesilme duyarlılığı testi	ANSI/UL 1703:2015	-
MST 13	Eş potansiyel bağlantıların süreklilik testi	ANSI/UL 1703:2015	-
MST 14	Darbe gerilim testi	IEC 60060-1	-
MST 16	İzolasyon testi	-	MQT 03
MST 17	Islak kaçak akım testi	-	MQT 15
MST 42	Sonlandırma testlerinin sağlamlığı	IEC 62790	MQT 14
MST 57	Yalıtım koordinasyonunun değerlendirilmesi	IEC 60664-1	-

FV modüller elektrik üretimini güneşten sağladığından sıcaklık anomalileri potansiyel yangın riski oluşturabilmektedir. Yangın riskini gözlemleyebilmek için standart kabin testlerinde yangın, tutuşabilirlik, aşırı yük ve termal testler gerçekleştirilmektedir. IEC 61730 kapsamındaki yangın tehlikesi testleri Tablo 7'de verilmiştir (IEC, 2024).

Tablo 7. Yangın tehlikesi testleri

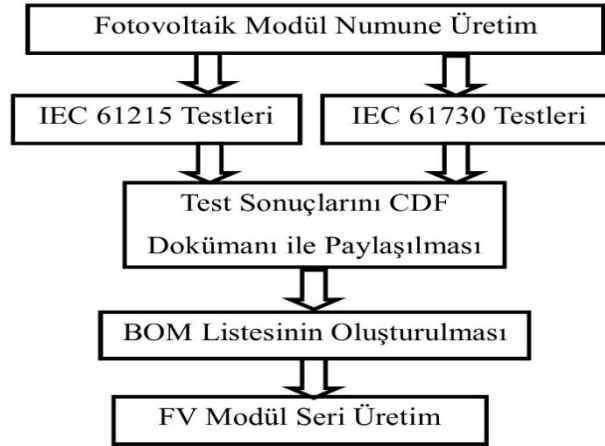
Test	Başlık	Referans Standartlar	Dayandığı Standart (IEC 61215-2)
MST 22	Hot-spot dayanıklılık testi	-	MQT 09
MST 23a	Yangın testi	-	National/Local code
MST 24	Tutuşabilirlik testi	ISO 11925-2:2020	-
MST 25	By-pass diyot termal test	-	MQT 18
MST 26	Ters akım aşırı yük testi	-	-

FV modüllerin üretim dokümanında yer alacak mekanik dayanımını kontrol etmek için kabin testlerinde mekanik stres testleri gerçekleştirilmektedir. IEC 61730 standardı kapsamındaki mekanik stres testleri Tablo 8’de verilmiştir (IEC, 2024).

Tablo 8. Mekanik stres testleri

Test	Başlık	Referans Standartlar	Dayandığı Standart (IEC 61215-2)
MST 32	Modül kırılma testi	ANSI Z97.1	-
MST 33	Vida bağlantıları testi	IEC 60598-1	-
MST 34	Statik mekanik yük testi	-	MQT 16
MST 35	Soyulma testi	ISO 5893	-
MST 36	Bindirme kesme mukavemeti testi	ISO 4587:2003	-
MST 37	Malzeme sürünme testi	-	-
MST 42	Sonlandırma testlerinin sağlamlığı	-	MQT 14

FV modül fabrikaları, modül üretiminde kullanacağı tüm hammaddeleri, alternatif markalarıyla birlikte farklı kombinasyonlar ile üretebilmektedir. FV modül fabrikaları, seri üretime başlamadan önce yukarıda belirtilen IEC 61215 ve IEC 61730 standartları kapsamında sertifikası oluşturulacak modüllerden numune üretim gerçekleştirir. Üretmiş oldukları modüllerin tip ve kabin testleri için akredite test kuruluşlarına gönderir. Test kuruluşları, IEC 61215/IEC61730 standartlarının gereği termal çevrim testi, nem donması testi, nemli ısı testi, mekanik yükleme testi gibi birçok test uygular. Gerçekleştirilen testler uygun bulunduktan sonra modüllerin hem üreticiler hem de tüketiciler tarafından modül kalitesinin ve güvenilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir araç olan Constructional Data Form (CDF) hazırlanır. CDF içerisinde modül üretiminde kullanılan ürünler ve test sonuçları yer alır. Güneş modülleri; IEC 61215 ve IEC 61730 standartlarına göre girdiği testleri başarı ile geçerse sertifika almaya hak kazanır. Bu aşamadan sonra modüllerin onaylı bir CDF’i ve CDF’e ek IEC 61215/IEC 61730 sertifikaları olur. Fabrika, CDF içerisinde yer alan sertifika esnasında kullanılan hammaddeler için Bill of Material (BOM) hazırlanır ve hazırlanan listeye göre modüller üretilir. BOM, modülün üretimi için gerekli olan tüm malzemelerin, bileşenlerin ve parçaların listesi ve bunların miktarlarını içeren bir belgedir. Şekil 4’te FV modül sertifikasyonu ve seri üretim süreci verilmiştir.



Şekil 4. Fotovoltaik modül sertifikasyon ve seri üretim süreci

IEC 61215 ve IEC 61730 standartları FV modüllerin tasarım, işletme ve tip kabulü için gerekli kriterleri içeren standartlardır. Bu standartlar gereği FV modüller birçok teste tabii tutulur. Bu testlerden geçen modül üreticilerinin IEC 61215 ve IEC 61730 sertifikası olur. Türkiye’nin ilk akredite FV modül test laboratuvarı TSE tarafından kurulmuş ve test hizmetlerine devam etmektedir (AA, 2024). TSE, TÜRKAK tarafından akredite test hizmeti vermektedir (TÜRKAK, 2024). TSE’den ayrı olarak, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) tarafından IEC 61215 ve 61730 kapsamında akredite FV modül testleri gerçekleştirilmektedir (TÜBİTAK, 2024).

4. FV MODÜL EL GÖRÜNTÜLEME

FV modüllerinin kusurlarının erken tespiti, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini, güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için ciddi öneme sahiptir. Bu kusurlar, modüllerin verimini düşürebilir, enerji üretimini sınırlayabilir ve güvenlik riskleri oluşturabilir. Kusurların tespit edilmesi ve giderilmesi, sistemin optimum performansını sağlar ve uzun vadeli işletme maliyetlerini azaltır. Ayrıca, çevresel faydaları da doğrudan etkiler. Kusur tespiti genellikle görsel inceleme, elektriksel testler ve performans izleme gibi çeşitli yöntemlerle yapılır ve genellikle uzman ekipler tarafından gerçekleştirilir. Bu tespitler, sistemlerin güvenliğini ve uyumluluğunu sağlamak için gereklidir ve yerel mevzuatlara ve teşviklere de uygun olmalıdır (Kaya Şimşek, 2024).

FV modüllerinin EL görüntüleri, genellikle gri tonlarda ve karanlık ortamlarda elde edilen görüntülerdir. Bu görüntülerde özellikle kırıklar ve diğer kusurlar, siyah çizgiler veya koyu alanlar şeklinde belirginleşir. EL görüntüleme, birçok üretici firmada yaygın olarak kullanılan bir kusur tespit yöntemidir. Üretim aşamasında, her bir hücrenin ayrı ayrı incelenmesine imkan tanır. Ancak, görüntülerin yorumlanması ve kusurların tespiti uzmanlık gerektirir ve bu süreç nispeten zaman alıcı olabilir (Kaya Şimşek, 2024).

IEC 61215 ve IEC 61730 standartları, FV modüllerde üretim verimliliğini asgari olarak sağlayan ve seri üretim için rehberlik eden standartlardır. GES projelerinde kullanılacak FV modülleri üretici firmaları, satın alım öncesi değerlendirilmektedir. Yatırımcı ile FV modül üreticisi arasında imzalanan sözleşme ekine EL görüntüleme sonuçları eklenebilir. Bu kapsamda, yatırımcı, üreticiyle mutabakata vararak kendi kabul kriterlerini oluşturabilir ya da FV modül üreticisinin standartlarına uygun üretimi kabul edebilir.

FV modüllerdeki kusurları ve hataları tespit etmek için EL cihazları kullanılır. Bu cihazlar, modüllere uygulanan DC güçle oluşan EL ışınlarını özel kameralarla yakalayarak, yüzeydeki gözle görülmeyen kusurları belirgin hale getirir. Kusurlar tespit edildiğinde düzeltici işlemler yapılması, modüllerin kalitesini artırarak güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğine katkı sağlar (Kaya Şimşek, 2024).

BloombergNEF, FV modül üreticilerini finansman sağlanabilirliğine göre sınıflandıran bir sistem geliştirmiştir. Bu sistem, projelerin geri ödemesiz borç finansmanı alma olasılığına dayanır. Ocak 2024 itibarıyla dünya genelinde 40.000 FV finansman anlaşması izlenmiş ve yalnızca 5MW üzerindeki projeler sınıflandırmaya dahil edilmiştir. Üreticiler, kendi markalarıyla satış yapan ve üretim tesislerine sahip olanlar arasından seçilmektedir (BloombergNEF, 2024).

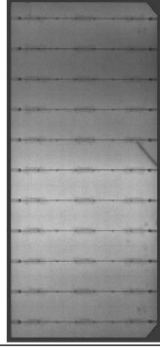
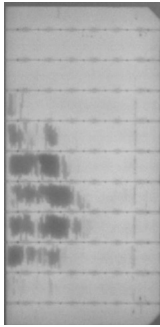
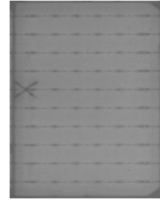
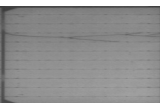
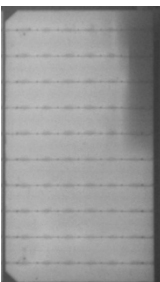
Tier listesinde, son iki yılda altı ticari bankadan geri ödemesiz finansman sağlanan en az altı projeye kendi ürünlerini sunan modül üreticileri yer alır. İflas başvurusunda bulunan veya önemli mali yükümlülüklerini yerine getirmeyen üreticiler, yeni bir bildiriye kadar Tier 1 listesinden çıkarılır (BloombergNEF, 2024).

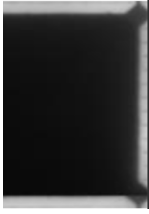
Çin, Hindistan, Polonya, Avusturya, Macaristan, İsviçre ve Türkiye'deki geri ödemesiz anlaşmalar için ek kanıt gereklidir. Bu durum, geri ödemesiz finansmanın bu bölgelerde yaygın olmamasından kaynaklanmaktadır. Geri ödemesiz finansman, bankanın modüllerin arızalanma riskini kabul ettiği ve proje borcunun geri ödenmeyeceği durumları kapsar. Kiralama finansmanı da geri ödemesiz sayılabilir. Tier 1 üreticileri, modül sağladıkları projelerle ilgili veriler göndererek sınıflandırmada yer alabilirler; bu veriler projeyi benzersiz şekilde tanımlamalıdır (BloombergNEF, 2024).

Tier List ile firmaların üretmiş olduğu FV modüllerin hangi projelerde kullanıldığı ve sınıflandırmak için portföydeki yerini belirlemek için kullanılmaktadır. FV modül üretici firmalardan alınacak ürünlerde EL görüntüleme büyük önem taşımaktadır. FV modül üretici firmalar EL görüntülemeleri için kendi kabul kriterlerini oluşturmaktadır. Firmaların kabul kriterleri değişkenlik göstermesine karşın en önemli kısmı ürün garantisinin ve performansının ekonomik ömrü boyunca belirtilen şekilde azalmasını taahhüt etmektedir. EL görüntülerinde problem olup A sınıfı olarak satılan ürünler uygulamada sorun görülme bile ilerleyen süreçlerde degradasyon miktarı artış gösterebilir. Bu sebeple ürünlerin garanti kapsamı net şekilde ifade edilmelidir.

Üretici firma sayısının fazla olması alternatif seçenekleri artırmaktadır. Sektörden edinilen bilgiler doğrultusunda Tier listesinde yer alan üç farklı FV modül üretici firmanın EL görsel kabul kriterleri oluşturulmuş ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Tier-1 üreticilerin EL kabul kriterleri

Kusur Açıklaması	Örnek EL Görüntüsü	Üretici 1	Üretici 2	Üretici 3
Tek çatlak		Çatlağın oluşturduğu alan $\leq 3\%$ Bir hücrede $q \leq 4$ Bir modülde $Q \leq 1/20 C$	Mikro çatlak uzunluğu \leq tam hücre uzunluğunun 1/2'si; Mikro çatlak tüm hücre alanını aşar ise kabul edilmez ve bir hücrede $q \leq 4$	1) Uzunluğu 10 mm'den az çatlaklar \leq hücre başına 3 adet, modül başına ≤ 10 hücre; 2) Kırılma alanı $\leq 3\%$ ve maksimum 2 mikro çatlak olmalıdır. 66 yarım hücreli modül ve 72 yarım hücreli modül için 6 adet ve 78 yarım hücreli modül için 8 adet izin verilir. 3) Mikro çatlaktan kaynaklanan arıza alanı $> 3\%$, izin verilmez. 4) Bir kenardan karşı kenara doğru olan mikro çatlaklara izin verilmez.
Finger kopukluğu		$4\% \leq$ Bir hücrede toplam alan $\leq 10\%$, Bir modüldeki sayısı $Q \leq 1/6$	Finger kopukluklar açık koyuluğa ve hücre alanının $A \leq 4\%$ sayıya bakılmaksızın kabul edilir. Konsantre finger kopukluğu $4\% <$ alan $\leq 8\%$, miktar $\leq 10\%$ hücre miktarı kabul edilir. Alan $> 8\%$ ise kabul edilmez.	1) Bir hücredeki finger kopukluğu alanı yarım hücre alanının $\leq 4\%$ 'ü, izin verilir. 2) Finger kopukluğu alanı yarım hücre alanının $> 10\%$ 'u, izin verilmez. 3) Yarım hücre alanının 4% 'ü $<$ finger kopukluğu \leq Yarım hücre alanının 10% 'u, 66 yarım hücre için 13 adet modül, 72 yarım hücre için 14 adet modülü ve 78 yarım hücreli modül için 16 adete izin verilir.
Çarpı çatlak		Çarpı çatlağın uzunluğünün hücrenin 1/15'inden küçük olmalı; Bir hücrede $q \leq 4$, Bir modülde $Q \leq 4$	Çarpı mikro kırık uzunluğu $\leq 1/10$ tüm hücre uzunluğundan ise mikro kırık sayısı/hücre ≤ 2 ; 60 tip modül: $N \leq 4$ adet 66 tip modül: $N \leq 5$ adet 72 tip modül: $N \leq 6$ adet 78 tip modül: $N \leq 7$ adet	1) Tek gizli çatlağın uzunluğu $\leq 1/30$ hücrenin uzun kenar uzunluğu, \leq hücre başına 3 adet, ≤ 10 hücre modül başına; 2) $1/30$ hücrenin uzun kenar uzunluğu \leq tek gizli çatlağın uzunluğu $\leq 1/15$ uzun kenar hücre uzunluğu,
Mekanik darbe vb. nedeniyle oluşan çeşitli hücre kırıkları		Kabul edilmez.	Kabul edilmez.	Kabul edilmez.
Zayıf lehim		Bir hücrede toplam alan $\leq 5\%$ Bir modülde adet $\leq 1/12C$	Hücre boyunca uzanan zayıf lehim kabul edilmez. Zayıf lehimleme alanı $\leq 5\%$ yarım hücre alanı, zayıf lehim miktarı hücre miktarının $\leq 10\%$ 'u ; toplam zayıf lehimleme alanı $\leq 10\%$ yarım hücre alanı, zayıf lehimleme miktarı hücre miktarının $\leq 5\%$ 'i toplam zayıf lehimleme alanı $> 10\%$ yarım hücre alanı ise izin verilmez.	1) Gölge alanı $\leq 2\%$ tek modülün gölge sayısı ≤ 25 parça ; 2) $2\% <$ alan $\leq 5\%$, 54 versiyon ≤ 5 adet, 60/66 versiyon ≤ 6 adet, 72/78 versiyon ≤ 7 adet; 3) $5\% <$ alan $\leq 10\%$, 54 versiyon ≤ 1 adet, 60 / 66 versiyon ≤ 2 adet, 72 / 78 versiyon ≤ 3 adet; 4) Tek bir bara üzerindeki gölge uzunluğu, kısa kenar uzunluğunun 2/3'ünü geçemez.

Kısa Devre Olan Hücreler		Kabul edilmez.	Kabul edilmez.	Kabul edilmez.
--------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------	----------------	----------------

5. SONUÇ

Bu çalışmada, IEC 61215 ve IEC 61730 standartları kapsamında gerçekleştirilen testlerin yanı sıra üretici firmalar tarafından gerçekleştirilen kalite kontrol süreçleri de değerlendirilmiştir.

IEC 61215 standardı, FV modüllerin uzun vadeli güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek için geliştirilmiş olup, FV modüllerin çeşitli çevre koşullarında güvenli çalışma kapasitesini test eder. Bu standart ile modüllerin; çevresel dayanıklılık, mekanik, termal, nem ve ışınım streslerine karşı direnç değerlendirilirken, dolaylı olarak modül üretim süreçlerindeki kalite kontrolüne katkı sağlanır. FV modül üreticileri IEC 61215 kapsamındaki testlerden geçmek için, daha güvenilir ve uzun ömürlü modüller geliştirmek için süreçlerini optimize ederler. IEC 61215 kapsamındaki testler arasında görsel kontrol, elektriksel performans, mekanik yük, nem-sıcaklık, termal döngü, UV ve hot-spot testleri yer alır.

IEC 61730 standardı, FV modüllerin tasarım, üretim ve kurulum aşamalarında güvenlik risklerini en aza indirerek kullanıcı ve mülk güvenliğini sağlamayı hedefler. Elektriksel, mekanik ve çevresel güvenlik ile sıcak nokta dayanıklılığı testleri kapsamında modüllerin farklı uygulamalardaki güvenliğini değerlendirir. IEC 61215 standardı performans ve dayanıklılığı baz alırken IEC 61730 standardı güvenlik odaklıdır. Üretici firmanın, IEC 61215 ve IEC 61730 standartlarına ait sertifikasyona sahip olması ihracat miktarını artırmada katkı sağlayabilir.

IEC 61215 ve IEC 61730 standartları, FV modüllerin sertifikasyonu ve üretim süreçleri için temel kriterleri belirlerken, üretici firmalar ayrıca kalite kontrol testleriyle ürünlerinin performansını sürekli takip etmektedir. FV modül üreticileri, hammaddeler üzerinde kendi belirledikleri veya tedarikçiden aldıkları referans değerlere göre günlük, haftalık ve aylık testler yaparak ürünlerinin performansını sürekli izlemekte ve modül kalitesini iyileştirmektedir. Üretici firmalar hammadde girişleri esnasında ürünlerin ebat ölçümleri, kullanılan malzemeye göre kaplama yapısı, kullanılan kabloların montaj usulleri vb. birçok kabul testi gerçekleştirmektedir. Üretimden önce hammaddelerin kontrolü ile üretim esnasında oluşabilecek sorunlar engellenmektedir. FV modül kalite kriterlerinin tek bir standarda dayandırılmaması ve üreticiden üreticiye farklılaşması proje sahipleri ve müşavir firmaların fazla değerlendirme yapmasına neden olmaktadır.

IEC 61215 ve IEC 61730 standartları kapsamında uygun bulunan ürünler için seri üretim sürecine başlanmaktadır. Bu kısımda üretim esnasında flash test, hi-pot ve EL testlerinin yanında hat üzerinde gerçekleştirilen testler FV modüllerin ekonomik ömrünü, dayanıklılığı ve güvenliğini değerlendirme açısından önemlidir. FV modüllerin elektriksel test sonuçlarının kontrol edilmesi ve görsel olarak incelenmesi 25 yıllık ekonomik ömrü boyunca hot-spot oluşumu, kısa devre hatalarına karşı dayanım, yanma vb. öngörülemez sorunların değerlendirilebilmesi için gereklidir. EL testleri, FV modüllerin elektrik üretimi esnasında sorun teşkil edecek kusurları gözlemlene imkanı sunmaktadır. FV modüllerde hammadde kaynaklı veya üretim esnasında oluşan hücre kırığı, hücredeki lekeler, hücrede siyah alan gibi sorunları görsel olarak değerlendirilebilir. İnaktif alan oluşumu FV modülde o kısımdan üretim sağlamayacağı için 25 yıllık ekonomik ömründe daha düşük üretim sağlamış olacaktır. Zayıf lehim veya finger kopukluğu o bölgede direnç oluşturacağından ısınma, hot-spot veya yangın riski oluşturacaktır. FV modüllerin laminasyon sürecinde modüllere yüksek sıcaklık, basınç ve vakum uygulanır. Böylece modül bileşenleri aralarında hava boşluğu kalmayacak şekilde yüksek sıcaklıkta bir bütün haline gelir. Laminasyonda uygulanan yüksek basınç panellerde mikro çatlaklara sebep olabilir. Bu sebeple EL görüntüleri, laminasyon öncesi ve laminasyon sonrası takip edilir.

6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Standartlar tarafından belirlenen asgari koşulların yanında fabrikaların kendi oluşturduğu kalite kontrol kriterleri ile üretimdeki toplam kalitenin artması gerekmektedir. Standartlar, FV modülün güvenlik ve tasarım yeterliliği ve tip onayı haricindeki süreçleri kapsamamaktadır. Standartlar tarafından belirtilen asgari koşullar ürünlerin kalite kontrolünü kapsamadığından kullanılacak hammaddelerin girdi kontrolü ve ölçümlerinin yapılması FV modül üretiminde karşılaşılabilecek sorunların önüne geçmektedir. Fabrikaların kalite ve kabul kriterlerini oluşturması, satın alımı gerçekleştirecek kişilerin önceden bilgi sahibi olmasını sağlamaktadır. Üreticiler, satın alımı gerçekleştirecek firmaların büyüklüğüne ve/veya projede kullanılacak ürün sayısına bağlı bir yaklaşımdan bağımsız olarak FV modül üretmesi gerekmektedir. Proje ve kullanıcıya göre aynı sınıf için farklı kalitede FV modül üretimi veya satışı gerçekleşmesi durumu itibar kaybı ve güvensizlik oluşturacaktır.

FV modül üretiminde kullanılan hammaddelerin son kullanma tarihlerine dikkat edilmesi gerekir. Malzemelerin stoklu satın alımından dolayı depo alanlarında hammadde sıralama tarihleri belirtilmeden ürünler yerleştirilebilir. Ürünlerde en arka kısımda yer alan hammaddeler üretim hattında geç kullanıma ihtimali bulunduğundan dikkat edilmesi gereklidir.

FV modül üretici firmaların kendi bünyesinde AR-GE laboratuvarının olması, araştırma aşamasındaki teknolojilerin incelenmesi için olanak sağlamaktadır. AR-GE laboratuvarları, küresel olarak araştırma yapılan farklı modül teknolojilerinin test edilebilmesi, farklı varyasyonların değerlendirilmesi için gereklidir. AR-GE laboratuvarı ile hammaddeler için analiz ve test yapılarak ürünlerin uygunluğunun değerlendirilmesi kolaylaşabilir.

FV modül üretiminde personelin yetkinliği önemlidir. Yüksek teknoloji gerektiren bu üretim sürecinde, çalışanların belirli beceri ve yeterliliklere sahip olması gerekir. EL görüntülemesi esnasında gözlemlenen kusurlar, üretimi etkileyebilir ve sahaya sevk edildikten sonra fark edilebilir. Bu nedenle, EL görüntülemesi istasyonunda çalışan personelin dikkatli ve yetkin olması önemlidir. Ayrıca EL görüntülerinin kontrolünde, makine öğrenmesi ve görüntü işleme gibi uygulamalar kullanılarak, FV modül kontrolünde gözden kaçabilecek kusurların erken tespiti sağlanabilir ve böylece üretim kalitesi artırılabilir. Personel gözlemi, makine öğrenme ve görüntü işleme gibi kontrol mekanizmaları, hataların tespiti için kritik öneme sahiptir.

EL kusurları laminasyon sonrası oluşmuş ise fabrika durumu değerlendirir ve ilgili bölgede iyileştirici aksiyonlar alır. Bu sebeple FV modüllerin EL görüntüleri laminasyon öncesi ve laminasyon sonrası için ayrı ayrı saklanmalıdır. Laminasyon sonrası EL görüntüleri proje sahiplerine ve müşavir firmalara iletilmelidir. Üretici firmalar sahaya sevki gerçekleştirilen ürünlerin EL, flash test ve hi-pot test sonuçlarının paylaşımını yapmaktadır. Üretim aşamasından gelen test sonuçlarının doğruluğunu değerlendirebilmek için sahada FV modüller için EL görüntülemesi talebinde bulunulabilir. FV modüllerde EL görüntülemenin sahada yapıldığı durumda, üretici firma tarafından paylaşılan veri ile sahadaki verinin karşılaştırma imkanı bulunmuş olur. Üretici firma tarafından paylaşılan EL görseli ile sahadaki ürünün görsel sonucu değerlendirilir. Üretici firmanın paylaştığı ile sahadaki EL görüntülemenin sonuçları arasında farklılık mevcut ise farklılığı oluşturan bulgu değerlendirilir. Üretim kaynaklı veya sahaya sevk esnasında bir sorun olup olmadığı değerlendirildikten sonra üretici firma ile durum değerlendirilebilir. Üretici tarafından paylaşılan EL görüntüsü laminasyon öncesi olabilir. Yanlış EL görüntüsü paylaşımı, sahada uygulanan EL görüntüleme ile tespit edilebilir. FV modüllerde, üretici firmanın paylaştığı verilerin sahada değerlendirilebilmesi için EL görüntüleme yapılması faydalı olacaktır.

IEC 61215 ve IEC 61730 standartlarına göre gerçekleştirilen testlerde by-pass diyot fonksiyon testleri yapılmaktadır. Testleri yapılan ürünlerde bir sorun görülmeyebilir. Seri üretim esnasında üretici firma kontrol edip gönderdiğini taahhüt etmektedir. Diyot kontrolü yapılmasına karşın uygulama projelerinde kısa devre hatası olan diyotla karşılaşılabilmektedir. Bazı üretici firmalar hat üzerinde kısa devre hatası kontrolü yaparken bazı firmalar görsel kontrol yapıp imalata devam etmektedir. FV modüllerde kısa devre hatası alınmaması için üretim aşamasında testlerinin gerçekleştirilmesi gereklidir.

Ülkemizde HIT-30 ile yatırımcının geliştirilmesi, yüksek teknoloji ve yan sanayinin oluşturulması için teşvik mekanizması oluşturulmuştur. Teşvik mekanizması ve sanayinin gelişimi için yatırıma izin verilen ve üretim sağlayan firmaların standart ve sertifikalarının kontrolünün yanında planlı olarak Bakanlık kapsamında denetim gerçekleştirilmelidir. Bakanlıklar tarafından değerlendirilen; üretim süreci, çevresel risk, emniyet, güvenlik koşulları ve sosyal uygunluk durumları firmalar harici olarak belgelendirilebilir. Üretimi uygun bulunan firmaların yurtdışından getirdiği hammaddelere sübvansiyon verilebilir. Bu durum üretici

firmalardaki toplam kaliteyi artırıp rekabet ortamı oluştururken teşvik mekanizmasından daha fazla pay alma imkanı sağlanabilir.

FV modül üreticilerinin kalite kriterleri farklılık göstermektedir. Yatırımcı firma kalite kriterlerine dikkat edecek altyapı, bilgisi olmaması durumunda müşavir firmalar ile çalışmaktadır. Müşavir firmalar FV modül seçimi esnasında şartname ve/veya kendi kabul kriterlerini yatırımcı firmaya tanıtır ve üretici firma kabul ederek kabul kriterlerinde değişikliğe gidilebilir. Tüm firmaların belirlenip akabinde müşavir firma ile anlaşıldığı durumda ise üretici firmanın kabul kriterleri baz alınarak testler gerçekleştirilmektedir. Üretici firmalar, kendi kabul kriterlerini genişlettiği durumda satın alımı gerçekleştirilecek ürünün kalitesi nispeten düşebilir. Üründe kullanılan ekipmanların yanında gerçekleştirilen testlerin farklı olması kalite kapsamını dolaylı olarak etkilemektedir. Belirtilen üretim kalitesini geliştirmek adına yatırımcı, örnekleme usulü seçeceği FV modülleri farklı bir laboratuvara teste gönderebilir.

Firmaların üretim hattında kullanılan hammaddelerin etiket ve barkodunu kendi veri havuzunda bulundurması gerekmektedir. Bazı firmalar bu hususta barkod numaralarını kaydederken bazı firmalar ise bu hususta bir çalışma gerçekleştirilmemektedir. Üretimde kullanılan ürünlerin belirlenmesi hat üzerinde gerçekleştirilecek kalite kontrol süreçleri için gereklidir.

FV üretimi yapan firmaların bir kısmı, hat üzerinde üretim denetimi gerçekleştiren firmalar için kalite mühendisi gibi uzman personel ile destek vermektedir. Bu durum, daha kapsamlı ve etkin bir kontrol imkanı sunmaktadır. FV modül üretimi esnasında üretici firmanın denetim sürecine açık olması ve destek vermesi güvenilirliğini artırarak tercih sebebi olabilmektedir. Denetim süreci, yatırımcı için üretilecek FV modüllerin kontrol hizmeti olduğundan desteklenmelidir. Üretici firma bünyesinde yer alan personeller imalat süreci ve üretim aşamalarında teknik yeterliliği yüksek olabilir. Aynı proses üzerinde rutin yapılan işler esnasında işletme körlüğü oluşabilmektedir. Denetim firmaları üretim sürecini izleyerek eksikleri tespit edebilme ve raporlama hususunda bağımsız bir görüş sunduğu için üretim sürecini iyileştirmeye katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

Al Mubarak F., Rezaee R., Wood DA. (2024). Economic, Societal, and Environmental Impacts of Available Energy Sources: A Review. Eng, 5(3), p.1232-1265. <https://doi.org/10.3390/eng5030067>

Anadolu Ajansı (AA). (2024). Türkiye'nin yenilenebilir enerji atılımı test laboratuvarında deney talebini artırdı. Erişim tarihi 30 Ağustos 2024, erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/turkiyenin-yenilenebilir-enerji-atilimi-test-laboratuvarinda-deney-talebini-artirdi/3240566>

BloombergNEF (2024). Tier 1 Solar Module Maker Methodology. Erişim tarihi 2 Eylül 2024, erişim adresi: <https://assets.bnef.com/public/tiering/solarmodules.pdf>

British Petroleum (BP). (2023) Statistical Review of World Energy 2022. Accessed on 10 June 2023, available online at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review2022-full-report.pdf>

Ekinci G. (2019). FV Sistemlerinin Yaşam Döngüsü, Enerji ve Ekserji Analizi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

Enerdata. (2023). World energy & climate statistics – yearbook 2022. Accessed on 10 June 2023, available online at: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html>

International Electrotechnical Commission (2021). EN IEC 61215-1:2021, Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements. Accessed on 29 Aug 2024, available online at: <https://webstore.iec.ch/en/publication/61345>

International Electrotechnical Commission (2024). IEC 61730-1:2023, Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements. Accessed on 29 Aug 2024, available online at: <https://webstore.iec.ch/en/publication/61345>

Kalyon PV (2024a). Hakkımızda. Erişim tarihi 29 Haziran 2024, erişim adresi: <https://kalyonpv.com/hakkimizda/>

Kalyon PV (2024b). Teknolojimiz. Erişim tarihi 29 Haziran 2024, erişim adresi: <https://kalyonpv.com/teknolojimiz/hucre-cell-uretimi/>

- Kaya Şimşek S. (2024). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fotovoltaik Elektrolüminesans Görüntülerindeki Bara Kusurlarının Derin Öğrenme Yöntemleri İle Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Koç F. & Çelik A., (2022). Polikristal Tür Bir Fotovoltaik Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, (5)
- Özyakışır, Ö. & Ünver, S. (2020). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Lisanssız Elektrik Üretimi. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 24(4), s.195-226. DOI:[10.34246/ahbvuhfd.813037](https://doi.org/10.34246/ahbvuhfd.813037)
- PWC (2024). Dünyada ve Türkiye’de Güneş Enerjisi Sektörü. Erişim tarihi 29 Haziran 2024, erişim adresi: <https://www.pwc.com.tr/tr/sectorler/enerji/yayinlar/2024/pdf/dunyada-ve-turkiyede-gunes-enerjisi-sektoru.pdf>
- Sağbaş, A. & Başbuğ, B. (2018). Sürdürülebilir kalkınma ekseninde enerji verimliliği uygulamaları: Türkiye değerlendirmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), s. 43-50.
- Smart Enerji (2023). Yatırımcı Sunumu. Erişim tarihi 30 Ağustos 2024, erişim adresi: <https://www.smartsolar.com.tr/pdf/Smart-Yatirimci-Sunumu-30-06-2023.pdf>
- Smart Enerji (2024). Hakkımızda. Erişim tarihi 29 Haziran 2024, erişim adresi: <https://www.smartsolar.com.tr/hakkimizda.html>
- Solar Power Europe (SPE). (2024). New report: Global solar installations almost double in 2023 but leaves emerging economies in the dark. Accessed on 20 June 2024, available online at: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-global-solar-installations-almost-double-in-2023-but-leaves-emerging-economies-in-the-dark>
- International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Investments, 2023. Accessed on 20 June 2024, available online at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- Solardeland. (2024). Mono 690W – 730W Monofacial. Accessed on 28 June 2024, available online at: [https://www.solardeland.com/Mono-690W-730W-Monofacial-132G12\(132halfcells\)-Solardeland.html](https://www.solardeland.com/Mono-690W-730W-Monofacial-132G12(132halfcells)-Solardeland.html)
- Solarian Enerji (2023). Güneş Panellerine Hangi Testler Yapılır. Erişim tarihi 29 Ağustos 2024, erişim adresi: <https://www.solarian.com.tr/gunes-panellerine-hangi-testler-yapilir/#:~:text=IEC%2061215%20standard%20C4%B1%20g%C3%BCne%C5%9F%20panellerinde,%C3%BCr%C3%BCn%20C3%A7e%C5%9Fitlili%C4%9Fini%20de%20beraberinde%20getirmektedir.>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024a). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü – Güneş. Erişim tarihi 20 Haziran 2024, erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024b). Haberler. Erişim tarihi 20 Haziran 2024, erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=21234>
- T.C. Resmi Gazete (2024a). Yatırımlarda Devlet Yardımları Hakkında Kararın Uygulanmasına İlişkin Tebliğ (Tebliğ No:2012/1)’de Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ. Erişim tarihi 26 Ağustos 2024, erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/08/20240824-4.htm>
- T.C. Resmi Gazete (2024b). Yatırımlarda Devlet Yardımları Hakkında Kararın Uygulanmasına İlişkin Tebliğ (Tebliğ No:2012/1)’de Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ. Erişim tarihi 25 Eylül Ağustos 2024, erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/09/20240925-11.htm>
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB). (2024a). HIT-30. Erişim tarihi 29 Haziran 2024, erişim adresi: <https://hit30.sanayi.gov.tr/cagrilar/#gunes>
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB) (2024b). HIT-30 Teşvikler. Erişim tarihi 29 Haziran 2024, erişim adresi: <https://www.pwc.com.tr/tr/sectorler/enerji/yayinlar/2024/pdf/dunyada-ve-turkiyede-gunes-enerjisi-sektoru.pdf>
- Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) (2024). Akreditasyon Sertifikası. Erişim tarihi 2 Eylül 2024, erişim adresi: <https://asist.turkak.org.tr/tr/accreditation/accreditation-certificate/search/d45aa88f-7369-4233-9aca-409d0366f6f2>

TÜBİTAK (2024). TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı. Erişim tarihi 2 Eylül 2024, erişim adresi: <https://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/optik-laboratuvarlari>

Venkatadurgaprasad, K., Reddy, B. V., Varma, G. H. K., & Das, S. (2024). Investing Solar Bifacial Half Cut Single PV Panel for Enriched Power Delivery and System Stability Using Hybrid Approaches. In E3S Web of Conferences 547, p. 01023. DOI: 10.1051/e3sconf/202454701023

**RECYCLING OF END-OF-LIFE PHOTOVOLTAIC PANELS IN TÜRKİYE: A STEP TOWARDS CIRCULAR ECONOMY****Pınar Yeşim AKGÖZ**

Smart Solar Technologies Gebze Production Factory, N3207, Kocaeli-Türkiye (Responsible Author), ORCID:
<https://orcid.org/0009-0004-5339-5867>

Mustafa ÖZCAN

Assoc.Prof., Kocaeli University, Department of Energy Systems Engineering, Kocaeli-Türkiye, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-6436-6368>

Abstract

Solar power plant installations are rapidly expanding both globally and within Türkiye. End-of-life Photovoltaic (PV) panels generate a large amount of panel waste. Recycling solar panel waste will reduce hazardous landfill waste and recover valuable materials. This study analyzes the types and quantities of waste generated by PV panel components in solar power plants commissioned in Turkey between 2014 and 2022. Additionally, it calculates the amount of recyclable materials from end-of-life PV panels. The total amount of solar panel components that can be recycled is calculated as approximately 441.748 million tons (Mt). This includes 12.605 Mt cell, 326.078 Mt glass, 3,279.465 Mt ribbon, 0.715 Mt busbar, 38.461 Mt Ethylene Vinyl Acetate, 19.019 Mt backsheet and 41.588 Mt aluminium. Recycling and reuse of solar panels will make a significant contribution to the circular economy. Awareness of the recycling and reuse potential of end-of-life solar panels should be raised among all parties involved. In order to ensure effective and efficient recycling of PV panel waste in Türkiye, PV panels should be included in the Regulation on the Management of Waste Electrical and Electronic Equipment. The management and disposal costs of end-of-life PV panels offered to the market should be borne by the PV panel producers as regulated in the European Union.

Keywords: Photovoltaic, solar panel, recycling, circular economy, sustainable development goals, waste management.

TÜRKİYE'DE KULLANIM ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ FOTOVOLTAİK PANELLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ: DÖNGÜSEL EKONOMİYE DOĞRU BİR ADIM**Özet**

Dünya'da ve Türkiye'de güneş enerjisi santralleri (GES)'in kurulumu hızla artmaktadır. Fotovoltaik (FV) panellerinin kullanım süreleri sonlandığında; ortaya yüksek miktarda FV panel atığı çıkmaktadır. Güneş paneli atıklarının geri dönüştürülmesi tehlikeli depolama atıklarının azaltılması ve değerli malzemelerin geri kazanılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada, Türkiye'de 2014 - 2022 yılları arasında devreye alınan GES'lerdeki FV panellerin kullanım ömrünü tamamlaması durumunda güneş panelini oluşturan bileşenlerin atık tür ve miktarları ile bu atıklardan geri dönüştürülebilecek bileşen miktarları hesaplanmıştır. Geri dönüştürülebilecek toplan güneş paneli bileşen miktarı yaklaşık 441,748 milyon ton (Mt) olarak hesaplanmıştır. 12,605 Mt Hücre, 326,078 Mt Cam, 3,279.465 Mt Ribbon, 0,715 Mt Busbar, 38,461 Mt EVA, 19,019 Mt Arka Koruma Tabakası ve 41,588 Mt Alüminyum elde edilmiştir. Güneş panellerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı döngüsel ekonomiye önemli bir katkı sağlayacaktır. Kullanım ömrünü tamamlayan güneş panellerinin sahip olduğu geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyeli ile ilgili tüm tarafları kapsayacak biçimde farkındalık oluşturulmalıdır. Türkiye'de FV panel atıklarının geri dönüşümünün etkin ve verimli bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, FV panellerin Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik'e eklenmesi gerekmektedir. Piyasa sunulan atık güneş panellerinin yönetim ve bertaraf masrafları, Avrupa Birliği'nde yapılan düzenlemedeki biçimiyle FV panel üreticilerine ait olmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Güneş paneli, Geri dönüşüm, Döngüsel ekonomi, Sürdürülebilir kalkınma hedefleri, Atık yönetimi.

1. GİRİŞ

Ülkeler fosil kaynakların çevreye verdiği zararlardan kaçınmak için yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmıştır. Bu süreçte güneş enerjisinden ısı ve elektrik üretimi ile ilgili birçok araştırma yapılmakta ve güneş enerjisi kullanımı yıllar geçtikçe artmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri teknolojik bakımdan ilerleme ve maliyet bakımından azalma göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Temiz bir enerji kaynağı olması, düşük işletme ve bakım maliyeti gibi özellikleri güneş enerjisinin önemini arttırmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022a). Küresel FV pazarının büyümesiyle birlikte, kullanım ömrünü tamamlayan FV panellerin miktarı da artmaktadır. Ortalama ömrü 30 yıl olan FV panellerin giderek artan atıkları, yeni çevresel sorunlar yaratmaktadır. Hammaddenin geri kazanımı ve FV panellerin bertarafına yönelik yeni endüstriler ortaya çıkmaktadır. FV geri dönüşümü, dünyanın sürdürülebilir, ekonomik ve yenilenebilir bir enerji geleceğine geçişinde önemli bir yere sahip olacaktır.

FV GES sistemlerinin kurulumlardaki artışa bağlı olarak ortaya çıkan FV atık giderek artmaktadır. Farklı referanslarda yapılmış çeşitli atık tahminleri vardır. Küresel ölçekte FV kapasitesinin 2030 yılına kadar 1.600 GW'a çıkması öngörülmektedir. Kapasite artışına bağlı olarak atık FV panellerin miktarı da artacaktır. Güneş panelleri ömrü 30 yıl olduğu varsayıldığında, Dünyadaki FV atık miktarının 2030'da yaklaşık 1,7-8,0 milyon tona, 2050'de ise 60 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Türkiye'deki FV atık miktarının 2030 yılında en az 1.500 ton, 2040 yılında 20.000 ton, 2050'de 200.000 ton olacağı tahmin edilmektedir (Aşkın ve diğerleri, 2023) Dünyada FV panel atıklarının 2030'da 4 milyon ton'a, 2040'ta yaklaşık 50 milyon ton'a ve 2050'de ise 200 milyon ton'un üzerine çıkacağı öngörülmektedir (IRENA, 2022). FV panel bileşenleri, %65-%70 oranında geri dönüştürülebilir (Aşkın ve diğerleri, 2023). Ortaya çıkacak FV panel atıkların geri dönüştürülmesi, küresel ortalama sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlama hedefine katkı sağlayabilir (IRENA, 2022).

FV panel atıkları çevre kirliliği, iklim değişikliği ve kaynakların tükenmesi gibi ciddi sorunlara yol açabilir. Bu nedenle etkili atık yönetimi politikalarının geliştirilmesi gereklidir. Veri toplama sistemleri atıkların izlenmesi ve yönetiminde kritik öneme sahiptir. Ekonomik teşvikler ve cezalarla FV panel atıklarının geri dönüşüm oranları artırılabilir. Ayrıca, hükümet ve özel sektör işbirliği ile geri dönüşüm teknolojilerinin araştırılması ve geliştirilmesi, sürdürülebilir bir FV atığı yönetimi için önemlidir. Ayrıca, bu teknolojilerin halka tanıtımı, FV atıklarının yönetimi konusunda farkındalığın artmasına yardımcı olur (IRENA, 2022).

Güneş panellerinin üretimi sırasında enerji yoğun işlemler nedeniyle oluşan CO₂ emisyonları, geri dönüşüm sürecinde meydana gelen CO₂ emisyonlarına kıyasla daha yüksektir. Geri dönüşüm, çevresel zararları önemli ölçüde azaltırken, nadir bulunan bazı malzemelerin ekonomik olarak geri kazanılmasını sağlar. Kullanım ömrünü tamamlamış güneş panellerinin geri dönüştürülmesi, gerekli malzemelerin geri kazanılmasının yanı sıra büyük miktarda elektronik atığın (e-atık) çöpe gitmesini de önleyebilir. Ayrıca, panel geri dönüşümü, üreticiler için maliyetleri düşürerek üretim kayıplarını azaltabilir ve ekonomik kazanç sağlayabilir. FV Güneş ve batarya teknolojilerindeki büyüme sonucu kritik mineraller sektörü büyümektedir. FV panellerin önemli mineralleri içermesi ve 2017-2022 döneminde enerji sektöründeki talep sonucu lityum, kobalt ve nikel talepleri yüksek oranda artmıştır. Kritik minerallerin önemli bir kısmı, temiz enerji teknolojilerinin üretimi ve geliştirilmesinde kullanılmaktadır. 2022 yılında bazı kritik minerallere olan talebin büyük ölçüde temiz enerji sektöründen kaynaklanmıştır. Lityum talebinin %56'sı, kobalt talebinin %40'ı ve nikel talebinin %16'sı temiz enerji teknolojilerinin üretimi ve geliştirilmesinde kullanılmıştır. Enerji dönüşümünün hızı kritik minerallerin bulunabilirliği ve fiyatlarına bağlı olarak değişecektir. Kritik minerallere olan talebin artması, fiyatların dalgalı seyri gibi konular, bu minerallerin uygun fiyatlarla satın alınması ve tedarik konularında sorunlara neden olmaktadır. Bu bağlamda FV panel bileşenlerinin geri dönüşümü önem kazanmaktadır (IEA, 2023). Kullanım ömrünü tamamlamış FV panel atığı, yerel işletmeler için istihdam yaratmakta dolayısıyla yeni ekonomik faaliyetler yaratmak için fırsatlar sunmaktadır. Gelecekteki zorlukların üstesinden gelmek ve hammadde tedarikinin güvenliğini ve geri dönüştürülmüş malzemelerin güvenliğini artırmak için farklı taraflar (üreticiler, ithalatçılar, bayiler, operatörler, atık arıtma şirketleri) arasındaki işbirliği önemli hale gelmektedir (Sica ve diğerleri, 2018). Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kullanımının artmasında önemli bir role sahiptir ve sektördeki döngüsellik seçenekleri artmaktadır (Aşkın ve diğerleri, 2023). FV geri dönüşüm, döngüsel ekonomi aracılığıyla daha eşitlikçi ve barışçıl bir dünya ile daha yaşanabilir bir çevre yaratmayı amaçlayan Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) kapsamındaki hedefleri desteklemektedir (Aşkın ve diğerleri, 2023). Döngüsel ekonomi, doğal kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını ve atıkların minimuma indirilmesini hedefleyen bir ekonomik modeldir. Döngüsel ekonomi yaklaşımının benimsenmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan birçok fırsat sunar. Bu model, sorumlu tüketim ve üretim hedefleriyle uyumlu olup, kaynakları verimli kullanmayı, atıkları azaltmayı ve çevresel etkileri en az indirmeyi amaçlar. Böylece,

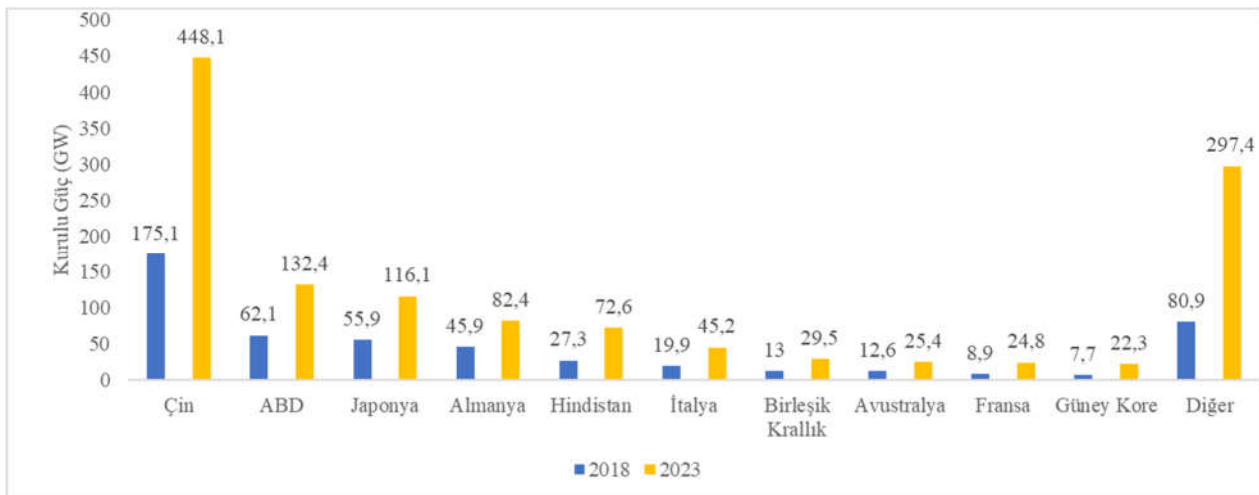
geleceğe temiz bir çevre bırakılırken kaynaklar etkin kullanılır ve ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik dengelenir. Ayrıca, döngüsel ekonomi iş fırsatları yaratır ve yeni iş modelleri geliştirir. Döngüsel ekonomi, SKH 8 (iş ve ekonomik büyüme), SKH 12 (sorumlu tüketim ve üretim) ve SKH 13 (iklim eylemini) etkili bir şekilde desteklemektedir (Samani ve diğerleri, 2023). FV panellerin etkin ve verimli bir biçimde geri dönüştürülmesi çeşitli çevresel ve ekonomik faydalar sağlar. FV panellerinin verimli bir şekilde geri dönüşümü, su kirliliğini azaltarak temiz su kaynaklarını korur ve insan sağlığına zararlı maddelerin çevreye yayılmasını önleyerek çevresel sağlığı iyileştirir. Ayrıca, geri dönüşüm, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eder ve aynı zamanda yeşil teknolojilerin gelişmesini destekleyerek ekonomik fırsatlar yaratır (Sica ve diğerleri, 2018).

Türkiye'nin 2024-2026 dönemine ilişkin hedef ve politikalarının belirlendiği Orta Vadeli Program (OVP), enerji dönüşümüne yönelik uygulanacak politikaları da içermektedir. OVP'de, sürdürülebilirlik odaklı politika ve uygulamaların gerekliliğine vurgu yapılmıştır. "Yeşil Dönüşüm" başlığı altında, 2053 yılı için belirlenen net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, yeşil dönüşüm sürecinin hızlandırılması gerektiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda, döngüsel ekonomiyle ilgili hedefler belirlenmiş ve özellikle maddesel geri kazanım ile atık yönetimine öncelik verilerek, döngüsel ekonomi modelinin yaygınlaştırılması benimsenmiştir (T.C. Cumhurbaşkanlığı, 2023).

Bu çalışmada, 2014 - 2022 yılları arasında üretilen en yüksek güçteki güneş panellerinin tüketim miktarları temel alınarak, geri kazanılabilecek toplam FV panel bileşen miktarı, bileşenleri oluşturan malzemelerin geri dönüşüm oranları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm giriş bölümüdür. Çalışmanın ikinci bölümünde, Güneş enerjisi ile elektrik üretiminin Dünya ve Türkiye'deki gelişimi incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, Güneş paneli bileşenlerinin teknik özellikleri ve bileşenlerin Türkiye'de üretilme durumları incelenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, güneş panelinin mekanik, kimyasal geri dönüşümü, CdTe, C-Si panellerin geri dönüşümü ve güneş paneli geri dönüşümü ile ilgili AB ve Türkiye'deki yasal düzenlemeler incelenmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde Türkiye'de 2014 - 2022 yılı Haziran ayı arasındaki FV GES kurulu güç değerleri dikkate alınarak, güneş panellerinden çıkacak atık bileşen miktarları hesaplanmıştır. Çalışmanın altıncı bölümü sonuç ve yedinci bölümü tartışma ve öneriler bölümüdür.

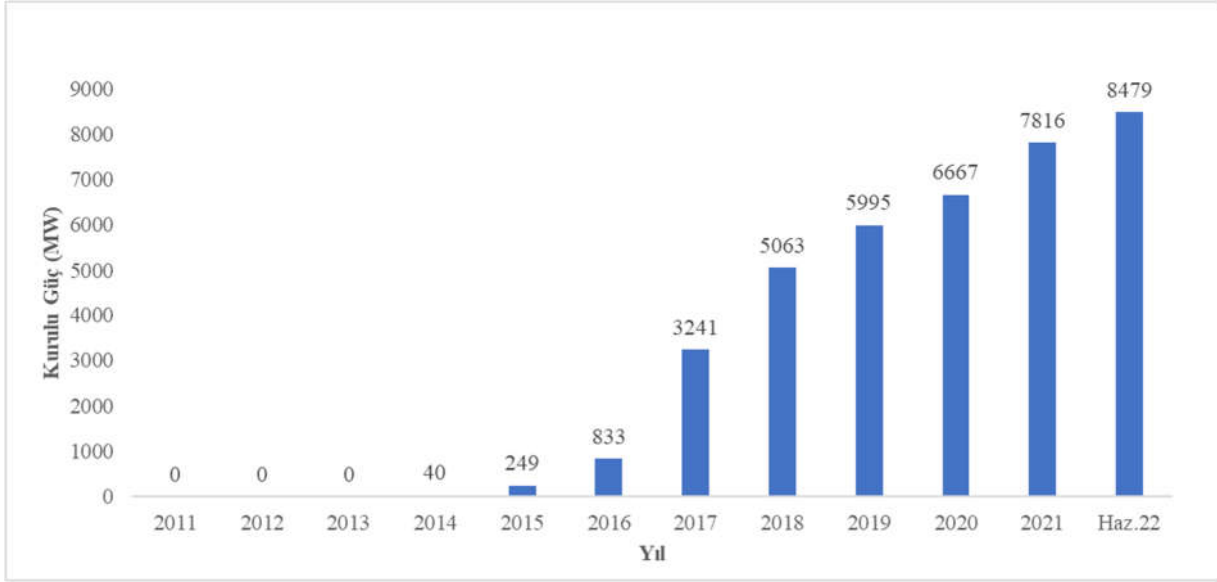
2. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde güneş enerjisi kapasitesi bir önceki yıla göre %47 yükselmiş ve 2022 yılında 41,4 GW yeni güneş enerjisi kapasitesi devreye alınmıştır. 2021 yılında 167,5 GW olan AB toplam güneş enerjisi kapasitesi, 2022 yılındaki artışla beraber 208,9 GW'a ulaşmıştır. AB toplam güneş enerjisi kurulu gücünün 2026 yılında 85 GW'a ulaşması öngörülmektedir. 2022 yılı güneş enerjisi kapasite artışların ülke kırılımı incelendiğinde 7,9 GW'lık kapasite ile Almanya birinci sırayı alırken Almanya'yı 7,5 GW ile İspanya ve 4,9 GW ile Polonya izlemektedir. Dünya Güneş Enerji kurulu gücünün yıllar içindeki değişimi Şekil 1'de verilmiştir (IRENA, 2023).



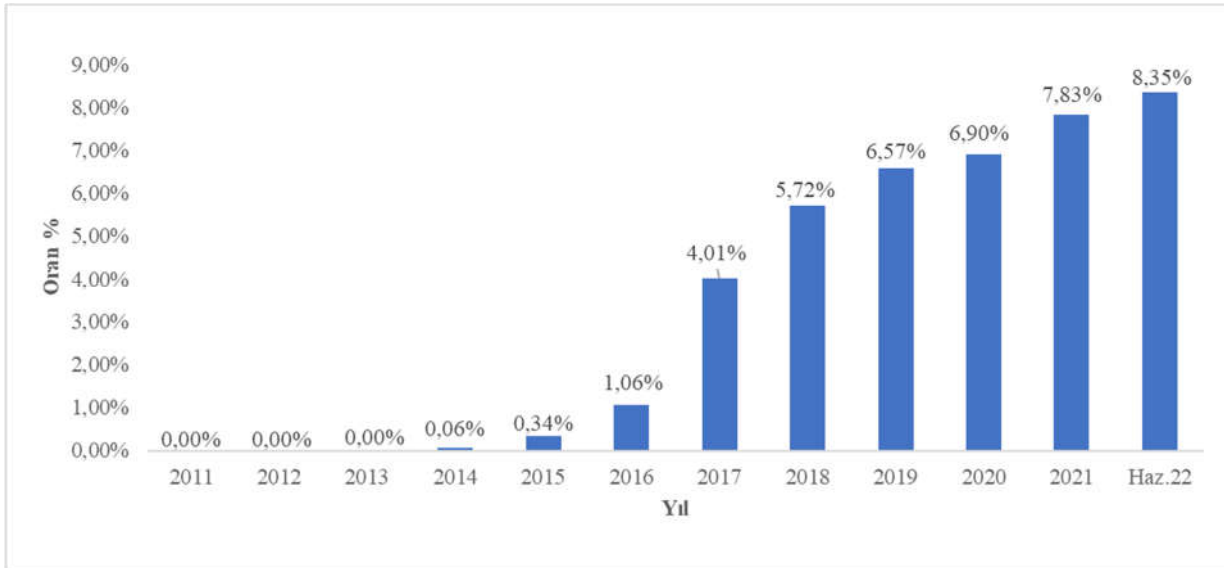
Şekil 1. Dünya güneş enerji kurulu gücün değişimi (IRENA, 2023)

Türkiye'nin Haziran 2022 sonu itibariyle güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 8,479 MW, bu gücün toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %8,35'tir. Güneş Enerji kurulu gücün yıllara göre değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Güneş enerji kurulu gücünün toplam kurulu güç içerisindeki oranı Şekil 3'de gösterilmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022a). Türkiye'nin elektrik sisteminde mevcut durumda sahip olduğu ve önümüzdeki dönemde sahip olabileceği esneklik imkanları ve yenilenebilir enerji potansiyeli dikkate alınarak, rüzgar ve güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimi içindeki paylarının yükseltilmesi planlanmıştır. Bu doğrultuda 2035 yılında GES kurulu gücü 52,9 GW düzeyine yükselmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022b).



Şekil 2. Türkiye güneş enerji kurulu gücün yıllara göre değişimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022a)

Şekil 2'de görüldüğü üzere; Türkiye'nin 2014 yılına kadar kurulu GES'i bulunmamaktadır. GES kurulu gücü yıllar içerisinde artarak Haziran 2022 itibariyle 8,479 MW değerine ulaşmıştır.

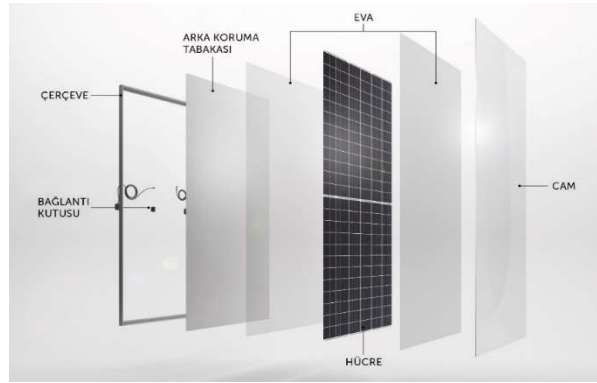


Şekil 3. Türkiye'nin güneş enerji kurulu gücünün toplam kurulu güç içerisindeki oranı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022a)

Şekil 3’de görüldüğü üzere; Türkiye’nin GES kurulu gücünün toplam kurulu güç içerisindeki oranı 2016 yılında %1,06 iken 2017 yılında %4,01 seviyesine yükselmiştir. Haziran 2022 verilerine göre, güneş enerji kurulu gücünün toplam kurulu güç içerisindeki oranı %8,35’tir.

3. GÜNEŞ PANELİ BİLEŞENLERİ

Güneş panelinin temel bileşenleri; Cam, Etilen vinil asetat (EVA), Hücre, Arka Koruma Tabakası, Çerçeve, Bağlantı kutusu ve Ribbon-Busbar’dır. Panel bileşenleri Şekil 4’de gösterilmiştir (Smart Solar, 2023). FV güneş panelleri çeşitli geri dönüştürülebilir malzemelerden oluşmaktadır ve bu malzemelerin ekonomik değeri kadar çevresel etkileride önemlidir. Çevreye zararlı olabilecek bu malzemelerin geri dönüştürülmesi için özel prosedürler gereklidir. Geri kazanım süreçleri dikkatli bir şekilde yönetilmelidir. Aksi takdirde, bu malzemeler yağmur suyu ve diğer çevresel faktörler aracılığıyla çevreye yayılabilecek toprak ve su kaynaklarını kirletebilecek ve ekosistemlere zarar verebilecektir (Al- Aqqad & Menyhart, 2023).



Şekil 4. Güneş panelini bileşenleri (Smart Solar, 2023)

3.1. Cam

Panelin en dış katmanı olan cam, güneş panellerinin iç kısmını çevre şartlarından koruyan ve yüksek ışık geçirgenlik performansı ile güneş panellerinin verimliliğini doğrudan etkileyen, panel üretimindeki en önemli bileşenlerden biridir. Güneş paneli camlarının demir oksit oranı daha düşük ancak ışık geçirgenliği normal demirli cama göre daha yüksektir. Camın kalınlığı panel tipine göre 2- 3,2 mm arasında değişmektedir. Sandy ve prizma desenlerinde üretilen camlar, yüzeyinde oluşan yansımaları azaltarak, yüksek ışık geçirgenliği ve düşük yansıtma değerleri ile güneş panellerinin performansında maksimum verimlilik sağlar. Cam yüzeylerine uygulanan Anti Reflektif (AR) kaplama ile ışık yansımaları minimuma düşürülmesi amaçlanmaktadır. AR kaplama, camların ışık geçirgenliğini yaklaşık %2 artırarak, güneş panellerinde performans artışı ve yüksek verimlilik sağlar (Düzcam Şişecam, 2023).

3.2. EVA

EVA, endüstride yaygın olarak kullanılan vinil asetat içeren bir elastomerdır. Güneş panelinde kullanılan EVA, cam-hücre-arka koruma tabakası arasını dolduran, parçaları birbirine yapıştıran bir tabakadır. Üretim aşamasında hücrelerin her iki tarafına da uygulanır ve laminasyon yöntemiyle 140°C-160 °C arasında eritilerek hücreleri tamamen çevrelemektedir. Cam tarafında ve arka koruma tabakası tarafında ölçü olarak aynı ancak özellik olarak farklı EVA kullanılır. Hücre tarafında kullanılan EVA’nın ışık geçirgenliği yüksek, arka koruma tabakası tarafında kullanılan EVA’nın izolasyon özelliği yüksektir. EVA, güneş panellerinin dayanıklılığını artırarak uzun süreli koruma sağlamakta ve bu durum, panel dayanıklılığını ve üretim verimliliğini yükseltmektedir. EVA’nın kalınlığı 0,45-0,60 mm arasında değişmektedir.

3.3. Hücre

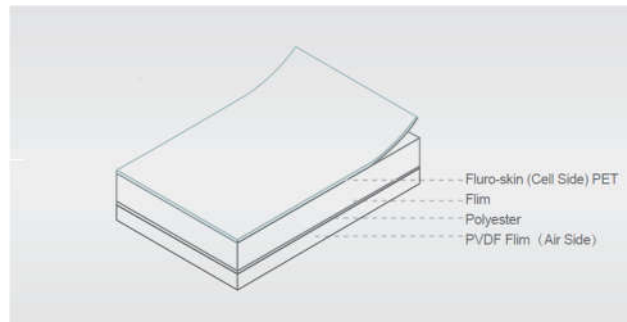
Güneş hücreleri yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Güneş hücrelerinin %98’i silisyumdur ve silisyum dünyada bol miktarda bulunmaktadır (Aşkın

ve diğerleri, 2023). Saf halde olmayan silisyum, genel olarak silisyum dioksit (SiO_2 , kuvars) halde bulunur ve saflaştırma işlemi oldukça maliyetlidir. Bu yüzden güneş hücrelerinin maliyeti yükselmektedir. Güneş hücreleri genel olarak Kristal Silisyum güneş hücreleri (c-Si ve mc-Si) ve İnce film güneş hücreleri (a-Si, CdTe, CIS veya CIGS) ikiye ayrılmaktadır. Kristal silisyum güneş hücrelerinin, güneş ışınlarını yutma oranı düşük olmasına rağmen verimlilikleri %12-%16 arasındadır. Pazar payının %93'nü oluştururlar, genel olarak 25 yıllık garanti ömrü sunulmaktadır. Kristal Silisyum güneş hücreleri monokristal ve polikristal olarak ikiye ayrılmaktadır. Monokristal güneş hücrelerinin verimleri %15-%21 arasındadır, verimlerinin yüksek oluşundan dolayı uzun vadeli yatırımlar için idealdirler. Polikristal güneş hücrelerinin verimleri %12-%15 arasındadır, kristal yapıları tam homojen olmadığından ucuzdurlar. Polikristal güneş hücresinde 20 yıllık bir sürede %14 verim kaybı meydana gelir. Polikristal güneş hücresinin üretim süreci monokristal güneş hücresine göre daha ucuzdur. İnce film güneş hücrelerinin ışık yutma oranı yüksektir. Bu hücreler, düşük verimlilikleri nedeni ile pazar payının sadece %7'ni oluştururlar. İnce film güneş hücrelerinin panel verimlilikleri %7-%14 arasındadır. Amorphous hücre verimleri %8-10 arasındadır, teorik olarak a-Si'nin %27'lik bir verimi vardır. Amorphous hücre zaman içerisinde %21'lere yakın verim kaybı oluşmaktadır. Cadmium telluride (CdTe) 1 cm^2 'de %17'lik, 8.390 cm^2 'de %11'lik bir verime ulaşmıştır. CdTe hücrelerin üretim maliyeti düşüktür (Güneş Sistemleri, 2008).

Güncel olarak üretilen panel teknolojileri Pasifleştirilmiş Verici ve Arka Hücre (PERC) ve Tünel Oksit Pasifleştirilmiş Temas (TOPCon) hücreli panellerdir. PERC hücrelerin seri üretim yapılan teknolojiler arasında en yüksek verimliliğe sahip, hem seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti (LCOE) uygun hem de kurulum maliyeti uygundur. TOPCon hücreler, seri üretim için ilk yatırım maliyetleri yüksektir. TOPCon hücre, PERC hücreye göre daha yüksek verimliliğe ve daha düşük LCOE'ye sahiptir. Bifacial güneş panelleri hem arka hem de ön yüzeyinden elektrik üretebilmektedir. Bu tip panellerde, arka yüzeyinde cam ya da transparan Arka Koruma Tabakası kullanılarak yansıyan güneş ışığı tekrar değerlendirilmektedir. Half-Cut paneller tam hücrenin ikiye kesilmesi sonucu oluşur. Panel ebatlarının neredeyse korunduğu Half-Cut teknolojisi, zayıf ışık koşullarında dahi güneş paneli hücrelerinden maksimum enerji elde edilmesini sağlar. Half-Cut teknoloji, birim metrekareden daha fazla güç alınma yöntemidir. Half-Cut panellerde elektrik direnci azaltılarak panelin verimliliği artırılmaktadır. Tracker sistemler, güneşi konumuna göre takip eden ve ışınları dik olarak enerji üretimini arttıran mekanik sistemlerdir. Tracker sistemler ve bifacial teknolojisi birlikte kullanıldığında güneş ışınlarından daha iyi faydalanılabilmektedir. Bu teknolojilerin kullanımı sayesinde enerji kazancının %4-%11 arasında arttığı gözlemlenmiştir. Katkısız ince film katmanlı heteroeklem (HJT) ve Ayrıştırılmış Arka temas (IBC) hücre teknolojileri laboratuvar ortamında daha yüksek verimlilik potansiyeli göstermiş olmasına rağmen seri üretim için araştırmalar devam etmektedir (PWC, 2021).

3.4. Arka Koruma Tabakası

Arka Koruma Tabakası üç katmandan oluşmaktadır. Hava ile temas halinde olan Polivinil Florür (PVDF), güneş panelini dış ortam şartlarından (nem, sıcaklık, su vb.) korumaktadır. Orta katman olan polietilen tereftaraf (PET) elektriksel izolasyon sağlamaktadır. PET katmanının kalınlığı panellerin sahadaki seri bağlantısı sonucu oluşturulan gerilime göre seçilmektedir (1000V/1500V). PET katmanı, iç katman olan fluro-skin tabakası ise EVA ile entegrasyonu sağlamakta ve UV'ye karşı koruma oluşturmaktadır. Arka koruma tabakası katmanları Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Arka koruma tabakası katmanları (Cybrid, 2022)

3.5. Çerçeve

Alüminyum çerçeve, yüksek korozyon ve yorulma dayanımına sahip 6063 alaşımından yapılmaktadır. Bu çerçeve, güneş panelinin montajında gerekli yapıyı sağlamakta ve fiziksel etkenlere karşı paneli korumaktadır. Çerçeve montaj, drenaj ve topraklama için deliklere sahip olup, çerçeve ile cam arasında yalıtım malzemesi olarak silikon veya çift taraflı bant kullanılmaktadır.

3.6. Bağlantı Kutusu

Bağlantı Kutusu, IP68 seviyelerinde su geçirmez yapıda olup panel kablo bağlantılarını ve bypass diyotunu içermektedir. Bağlantı Kutusu iç kısmını doldurmak için potting malzemesi kullanılmaktadır. Potting işlemi, silikon ve sertleştirici malzemenin belirli oranlarda (örneğin 6:1 veya 5:1) karıştırılmasıyla gerçekleştirilir ve bu işlem sonucunda bağlantı kutusunun sızdırmazlığı sağlanmış olur.

3.7. Ribbon-Busbar

Ribbon ve busbar, taban malzemesi minimum %99.95 bakır, lehim bileşimi olarak %60 kalay ve %40 kurşun karışımından oluşmaktadır. Güneş hücrelerini birbirine bağlamak için kullanılır. Hücreler, belirli sıcaklık ve flux ile ribbonların üzerine lehimlenerek "string" adı verilen yapılar oluşturulur. Ardından, bu stringlerin artı ve eksi bağlantıları busbarlar kullanılarak lehimlenir. Ribbonların ölçüleri ise dikdörtgen şeklinde 0,9 x 0,20 mm ve yuvarlak şeklinde 0,30-0,35 mm arasında değişmektedir. Busbar ölçüleri genişlik 4 mm-7 mm, kalınlık 0.20 mm- 0.50 mm arasında değişmektedir.

3.8. Güneş Paneli Bileşenlerinin Türkiye’de Üretimi

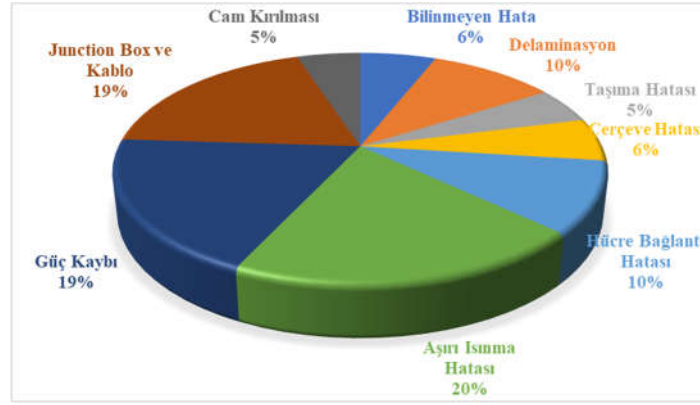
Türkiye’de FV paneli üreticisi olan 73 adet şirket bulunmaktadır. Türkiye’nin panel üretim kapasitesi 2020’de 5,2 GW iken bu değer 2023’te 15,2 GW’a yükselmiştir. Hücre üretim kapasitesi 1,5 GW ve wafer üretim kapasitesi 1,2 GW ‘tır (IRENA, 2024). Güneş paneli bileşenlerinin Türkiye’deki üretim durumu bilgileri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Güneş paneli bileşenlerinin Türkiye’de üretilme durumu

Bileşen	Üretici Firma
Hücre	Smart Enerji, Kalyon Enerji, GTC Enerji
Cam	Şişecam
Ribbon	Sarkuysan Elektrolitik
Busbar	Sarkuysan Elektrolitik
EVA	Dr. Hans Werner
Arka Koruma Tabakası	Üretim Yok
Çerçeve	Ado,PMS,Zahit Alüminyum
Junction box	Ekinler Endüstri, Hatko Elektronik
Silikon-Potting Glue	Üretim Yok

4. GÜNEŞ PANELİNİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ

FV panellerin teknik kullanımı 30 yıldır (Sica ve diğerleri, 2018). 30 yıldan önce de her yıl %0,5-%3 oranında panel çeşitli bozulmalar sonucu atık olarak çıkmaktadır. Bu bozulmalar; aşırı hava sıcaklığı değişimleri, mikro kırıkların oluşumu ve kırıkların ilerlemesi, EVA’da delaminasyon ve hava kabarcığının ilerlemesi, arka koruma tabakasındaki çizikler, panel çerçevelerinin eğilip bükülmesiyle panel yüzeyinin bozulup kırılması, taşıma-kurulum kazaları, bağlantı kablolarının ve diyotların bozulması şeklinde sıralanabilirler. Panel performansı yukarıdaki faktörler dışında yön, açı, gölgelenme, panel tipi, bakım ve temizlikten doğrudan etkilenmektedir. Ayrıca panel üreticilerinin, günlük olarak üretimdeki hatalardan kaynaklı atık paneller çıkmaktadır (TASAM, 2021). Müşteri şikayetlerine göre panel arıza oranları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Müşteri şikayetlerine göre panel arıza oranları (IEA PVPS, 2018).

Şekil 6'da görüldüğü üzere; sahaya kurulan ve panel üreticilerine gelen müşteri şikayetleri sıralamasında aşırı ısınma hatası en yüksek yüzdeye sahip hatadır. Aşırı ısınma, panel üretimi sırasında lehim hatası ve sahada paneller üzerinde gölgelenme oluşmasından kaynaklanabilmektedir. Güç kaybı, camdaki kaplama hatasından ve panellerin ışıklal kaynaklı bozunma sonucunda beklenen %3 kayıptan daha fazla oluşmasından, bağlantı kutusu ve kablo hatası, diyotların yanması, bağlantı kutusu lehimlerinin doğru yapılmamasından kaynaklanabilmektedir. FV paneller kullanım ömürlerini tamamladıklarında, bu panellerin atık hale gelmesi ve bunların geri dönüşümü veya bertaraf edilmesi, ekonomik maliyetler ve çevresel etkiler açısından yeni sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini sağlamak için, bu zorlukların ele alınması ve uygun geri dönüşüm veya atık yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gereklidir. Kullanım ömrünü tamamlayan FV panellerin geri kazanımı ve geri dönüşümü, güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini sağlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Günümüzde birçok FV paneli, kullanım ömrü sonunda düzenli depolama sahalarına gönderilmekte olup, bu yöntem çevre dostu olmadığı gibi uzun vadede sürdürülebilir değildir. FV panellerinde kullanılan kurşun ve kalay gibi maddeler toprağa karışarak yeraltı sularını kirletebilir ve bu durum ciddi çevre kirliliği sorunlarına yol açabilir (Farrell ve diğerleri, 2020). FV panel atıkları geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir. Bu süreçle hem ek hammaddeler elde edilebilir hem de ekonomik değer yaratılabilir (IRENA, 2022).

Geri dönüştürülebilecek özellikteki FV panel bileşenleri, %100 geri dönüştürülemeyecektir. 1 kW FV panel için Cam, Si, Al, EVA ve Ag'nin geri dönüşüm oranları sırasıyla %89, %80, %81, %80 ve %89'a şeklindedir. Geri dönüşüm miktarı ise Cam'da 42,3 kg/kW, Al'da 10,3 kg/kW, EVA'da 12,47 kg/kW, Ag'te 0,024 kg/kW, Si'da 2 kg/kW olarak kabul edilebilir. Yapılan hesaplamalara göre 100 adet kullanılmış panelden bileşenlerin geri kazanılmasıyla yaklaşık 42 adet yeni FV panel üretilebilmektedir (Sica ve diğerleri, 2018). FV güneş paneli geri dönüşümü, kimyasal ve mekanik geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. AB'de FV panel geri dönüşümü alanında yapılan çalışmalar deneysel mekanik, termal ve kimyasal teknikleri araştıran diğer süreçler yürütülmekte ve finanse edilmektedir. Güneş Enerjisi ile değerli malzemelerin geri kazanımı, güneş enerjisi sistemlerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesi yapılmaktadır (Sica ve diğerleri, 2018)

4.1. Kimyasal Geri Dönüşüm

Kimyasal geri dönüşüm, güneş panellerinin içerisindeki kimyasal bileşenlerin ayrıştırılması ve özellikle silikonun yeniden kullanıma kazandırılması amacıyla ısı ve kimyasal işlemler gerektiren bir süreçtir (Solar AVM, 2022).

4.2. Mekanik Geri Dönüşüm

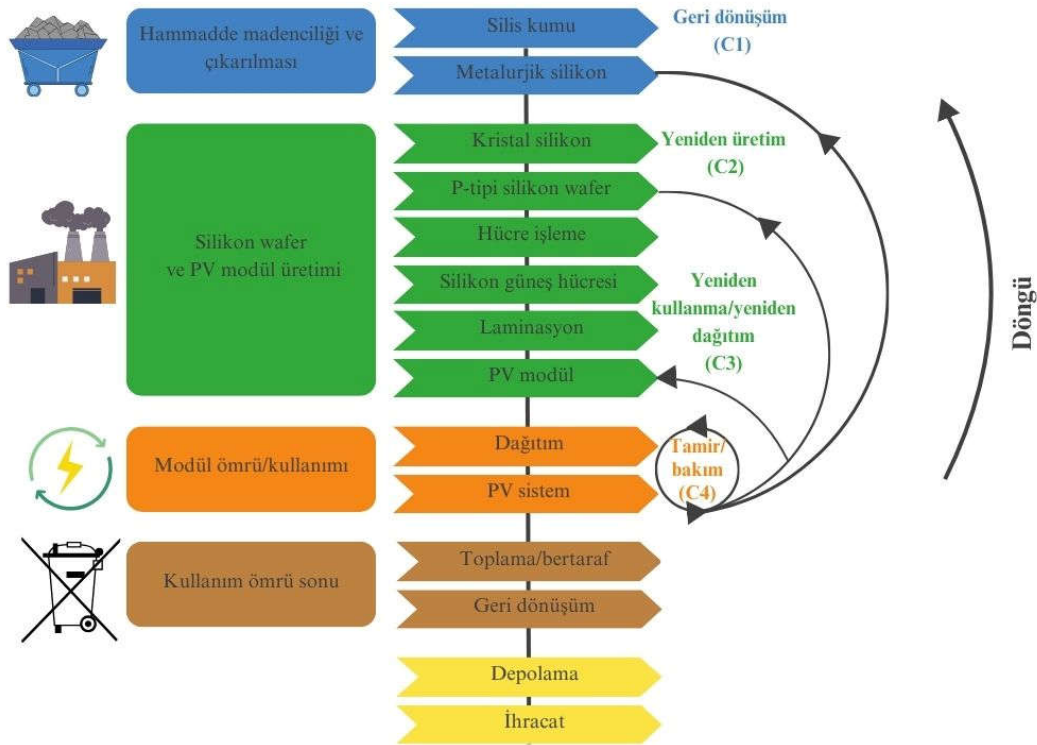
Mekanik geri dönüşüm süreci, güneş panellerinin parçalarına ayrılarak her bir bileşenin ayrı ayrı geri dönüştürülmesini içermektedir. Bu süreçte, makineler malzemeleri kum benzeri küçük parçacıklara ayırır ve ardından mıknatıslar kullanılarak değerli metaller diğer malzemelerden ayrılır. Mekanik geri dönüşüm

aşamaları ise sırasıyla şu şekilde ilerlemektedir: İlk olarak, güneş panelinin hücreleri, alüminyum ve cam kısımlarından ayrılır. Kalan malzemeler, hücreler arasındaki bağları gevşetmek için 500 °C’de bir termal işlemde geçirilir. Yüksek sıcaklık sayesinde, EVA hücrelerden ayrılır ve silisyum bir sonraki geri dönüşüm aşaması için hazır hale getirilir. Silikon parçacıkları (waferlar) asit kullanılarak ayrıştırılır. Kırılmış waferlar, yeni panellerin üretimi için eritilir ve silisyum malzemenin yaklaşık %85’i geri dönüştürülmüş olur (Solar AVM, 2022).

FV panellerinin işlenmesi ve geri dönüştürülmesi için çok sayıda teknolojik süreç geliştirilse de endüstriyel ölçekte yalnızca Kristal silisyum (C-Si) ve Kadmiyum Tellür (CdTe) panellerinin geri dönüşümleri uygulanmaktadır (Sica ve diğerleri, 2018).

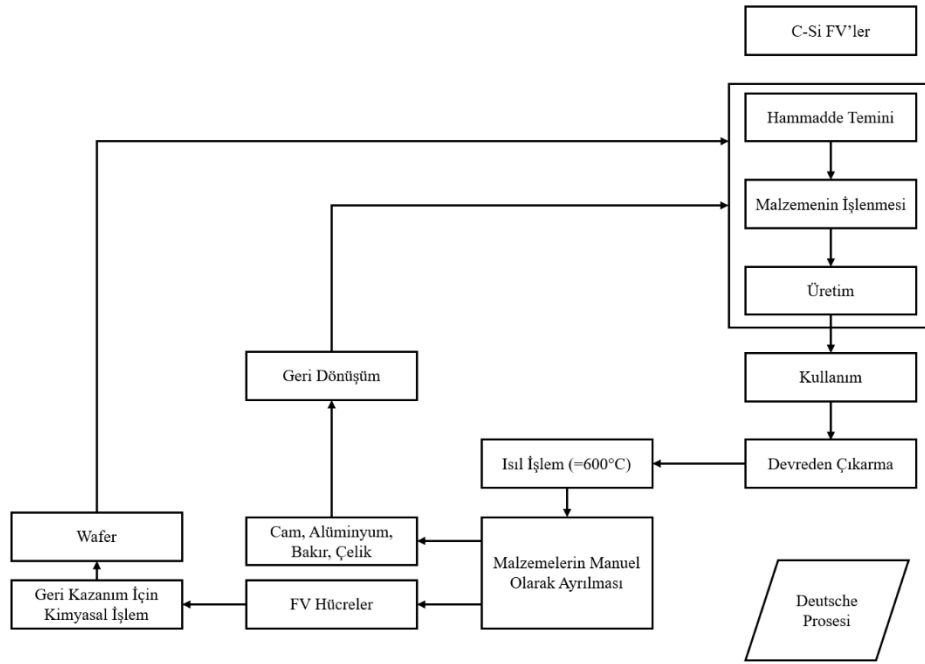
4.3. C-Si Panellerin Geri Dönüşümü

C-Si panellerinin geri dönüşümü, Deutsche Solar tarafından 2003 yılında geliştirilen geri dönüşüm yöntemini kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu geri dönüşüm yöntemi, C-Si panellerinin içindeki plastik ve metal bileşenleri ayrıştırarak, geri kazanılabilir malzemelerin yeniden kullanılmasını amaçlar. Bu yöntemde ilk olarak, güneş panellerinin plastik bileşenlerini ayırmak için ısıtma yöntemi kullanılır. Isıtma, plastiklerin yumuşamasını ve ayrılmasını kolaylaştırır, böylece diğer bileşenlerden ayrılmaları sağlar. Isıtma işlemi sonrası, güneş hücrelerinin cam, alüminyum (Al), bakır (Cu) ve çelik gibi metal bileşenleri manuel olarak geri kazanılır. Bu adım, değerli malzemelerin toplanmasını ve tekrar kullanılmasını sağlar. Güneş hücreleri, daha sonraki işlemlerden sonra yeni hücrelerin oluşturulması için kimyasal işlem görmektedir. Diğer malzemeler geri kazanım ve geri dönüşüm işlemlerine iletilir. C-Si panellerin geri dönüşüm oranı %80’den fazladır. C-Si panelin geri dönüşüm sürecinin iki temel sınırlaması vardır. Birincisi, üretim verimliliğini ve ekonomik faydaları sınırlayan çeşitli manuel faaliyetlere duyulan gereksinimdir. İkincisi, özel işlemler gerektiren ancak test edilmemiş birçok farklı Si bazlı güneş hücrelerinin pazarda yaygın olmasıdır (Sica ve diğerleri, 2018). C-Si FV panel yaşam çevrimi gösteren kelebek diyagramı Şekil 7’de verilmiştir (Farrell ve diğerleri, 2020).



Şekil 7. C-Si FV panel kelebek diyagramı (Farrell ve diğerleri, 2020)

Hammaddelerin çıkarılmasından kullanım sonu ömrü işlemine kadar FV endüstrisinde ve yaşam döngüsünde ortaya çıkan işlemler kelebek diyagramı ile açıklanmaktadır. Halkalar ikincil hammaddelerin geri dönüşümü, ürünlerin yeniden kullanımı ve onarımını göstermektedir. C-Si paneller için yaşam çevrimi akış diyagramı ve kullanım ömrü sonu yönetimi Şekil 8’de verilmektedir.



Şekil 8. C-Si paneller için yaşam çevrimi akış diyagramı ve kullanım ömrü sonu yönetimi (Sica ve diğerleri, 2018)

Şekil 8’e göre; C-Si panelin geri dönüşümü aşamasında panel, fırında ısıtılmaktadır. Her bir bileşeni farklı bir sıcaklıkla ayrılması gerekmektedir. Ribbonlar güneş paneli yüzeyinden kurşun/kalay kaplaması çıkarılarak geri kazandırılmaktadır. Isıl işlemde iki kademeli ısıtma profili kullanılmaktadır. Arka Koruma Tabakaları ilk önce güneş panelinden ayrılır ve arka yüzey birinci adımda 330°C’de 30 dakika ısıtılmaktadır. Daha sonra ikinci ısıtma adımı gerçekleştirilmektedir. EVA ve Arka Koruma Tabakası 400 °C’de 120 dakika boyunca iki aşamalı ısıtılmaktadır. Arka Koruma Tabakası iyi termal dayanıklılığa sahip olduğu için önce EVA’dan ayrılması gerekmektedir. Isıl işlemden sonra ribbonların temizlenmesi gerekmektedir. Ribbonların dış yüzeyi, kalay ve kurşun alaşımından oluşmaktadır. İçindeki bakırın geri kazanılması, kalay ve kurşunun uzaklaştırılması için, ribbonların nitrik asit ve sülfürik asit içine daldırılması gerekmektedir.

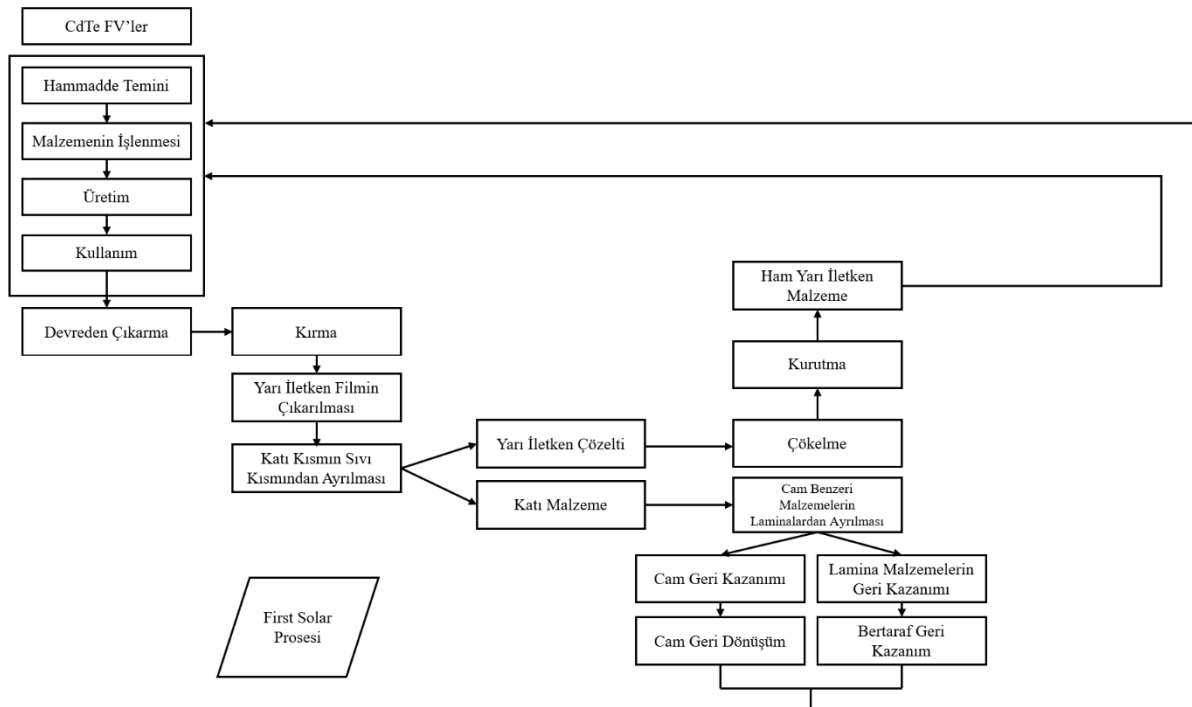
C-Si FV panelin bileşenlerin ağırlık yüzdeleri farklı referanslar dikkate alınarak Tablo 2’de gösterilmiştir (Farrell ve diğerleri, 2020). C-Si FV panelin bileşenleri içerisinde en fazla ağırlığa sahip olan bileşen Cam’dır.

Tablo 2. C-Si FV panelin bileşenlerin ağırlık yüzdeleri (Farrell ve diğerleri, 2020)

	(Gönen & Kaplanoglu, 2019)	(Corcelli ve diğerleri, 2018)	(Notarnicola, 2013)	(Wang ve diğerleri, 2012)
Bileşenler	%	%	%	%
Cam	70,00	74,16	80,10	67,40
Çerçeve	18,00	10,30	9,80	15,80
Eva	5,10	6,55	-	7,40
Hücre	3,65	3,48	4,70	3,10
Arka Koruma Tabakası	1,50	3,60	4,30	3,70
Kablo	1,00	-	-	-
Alüminyum	0,53	-	-	-
Bakır	0,11	-	-	-
Gümüş	0,05	-	-	-
Kalay ve Kurşun	0,05	-	-	-
Yapıştırıcı	-	1,16	-	-
Ribbon	-	-	-	1,00
Bağlantı Kutusu	-	-	-	1,60

4.4. CdTe Panellerin Geri Dönüşümü

FV atıklarının uygun kullanım ömrü sonu yönetimi, yalnızca genellikle sınırlı olan kaynakların geri kazanılmasına ve geri dönüştürülmesine izin vermek için değil, aynı zamanda Cd gibi tehlikeli maddelerin uygun şekilde bertaraf edilmesini teşvik etmektedir. CdTe FV paneller çevre ve insan sağlığı açısından tehlikeli olduğu düşünülen Cd bileşiklerini içerir. CdTe FV paneller yaşam çevrimi akış diyagramı ve kullanım ömrü sonu yönetimi Şekil 9’da verilmektedir (Sica ve diğerleri, 2018).



Şekil 9. CdTe FV paneller için yaşam çevrimi akış diyagramı ve kullanım ömrü sonu yönetimi (Sica ve diğerleri, 2018)

Şekil 9’da görülen CdTe FV paneller geri dönüşümü iki aşamalı bir kırma işlemi ile başlamaktadır. İlk

aşamada, paneller taşımayı kolaylaştırmak amacıyla yüzeysel olarak kırılır. İkinci aşamada ise cam plakalar, kırıcılar kullanılarak 5 mm çapına kadar küçük parçalara indirilir. Ardından, yarı iletken filmler sülfürik asit ve hidrojen peroksit ile çözündürülerek bir yarı iletken çözeltisi elde edilir. Bu çözeltinin çöktürülmesiyle elde edilen malzeme, saflaştırma işlemi için dışarıya verilmekte ve yeni CdTe panellerinin üretiminde kullanılmaktadır. Cam, önce yarı iletken çözeltisinden, ardından laminattan ayrılır. Bu laminattan ayrılma işlemi, cam için %90 ve yarı iletken malzeme için %95 gibi yüksek geri dönüşüm oranlarına ulaşarak, çevreye kadmiyum salınımından kaynaklanan çevresel hasar riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Sica ve diğerleri, 2018). Silisyumun geri dönüşüm verimi %62'dir. Bakır geri dönüşüm verimi yaklaşık %85'tir (Wang ve diğerleri, 2012).

4.5. Güneş Paneli Geri Dönüşümü ile İlgili Yasal Düzenlemeler

AB, elektronik ve elektrikli ekipmanlardan kaynaklanan atıkların bertarafı amacıyla Elektrikli ve Elektronik Atık (E-atık) Yönetimi (WEEE) yönetmeliğini hazırlamıştır. Hazırlanan yönetmelikle AB'deki 28 üye ülkenin, elektrikli ve elektronik atıklarının etkin bir şekilde ele alınması ve yönetilmesi amaçlanmıştır. WEEE yönetmeliğine göre tüm üreticiler yasal olarak elektronik ve elektrikli ekipmanlardan kaynaklanan atıklardan sorumludur. Üretim tesisinin nerede olduğuna bakılmaksızın ürettikleri atık elektrikli veya elektronik ürünlerin uygun şekilde geri dönüşümünün yönetilmesi gerekmektedir. WEEE yönetmeliği, çevre ve halk sağlığı dikkate alınarak ürünlerin toplanması, geri kazanılması ve geri dönüştürülmesine yönelik tüm etkili ve ayrıntılı yönergeleri içermektedir. İlk WEEE yönetmeliği, geniş ve çeşitli hacimlerdeki atık güneş panellerinin yönetimi ve işlenmesi için yeterli ve kapsamlı bir bilgi içermediği halde 2003 yılında yürürlüğe girmiştir (Aşkın ve diğerleri, 2023) 2012 yılında yönetmelikte yapılan değişiklik ile FV paneller WEEE'ye eklenmiştir. 2014 yılı itibarıyla, FV atıkların yönetiminin üretici ile tedarikçilerin sorumluluğunda olması yasalaşmıştır (Sica ve diğerleri, 2018). Yönetmeliğin kapsadığı Ek-1 listesindeki kategoriler arasında FV paneller listelenmiştir. Yönetmelik'te yer alan kategorilerdeki E-atıklar için asgari geri kazanım hedefleride belirlenmiştir. Buna göre; FV panellerinin %80'i geri kazanılacak ve %70'i yeniden kullanım ve geri dönüşüm için hazırlanacaktır (Official Journal of the European Union, 2012). Şu anda yalnızca AB güneş paneli atık düzenlemelerini kabul etmiştir. Dünyadaki çoğu ülke FV panellerini genel veya endüstriyel atık olarak sınıflandırmaktadır. AB, güneş paneli toplama, geri kazanım ve geri dönüşüm hedeflerini kapsayan FV atık düzenlemelerine öncülük etmektedir (Sica ve diğerleri, 2018).

Türkiye'de FV güneş panellerinin geri dönüşümüyle ilgili özel bir ulusal mevzuat bulunmamaktadır. Türkiye, AB'nin geri dönüşüm politikalarına uyum sağlamayı amaçlayan bir çevre politikası izlemektedir. Bu bağlamda atık yönetimi ve geri dönüşümle ilgili olarak; Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik (Resmi Gazete, 2022) ve Atık Yönetimi Yönetmeliği (Resmi Gazete, 2015) düzenlemeleri bulunmaktadır. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE/E-atık) Yönetimi Hakkında Yönetmelik, AB mevzuatına uyum sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. Yönetmeliğin amacı, döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği ilkeleri doğrultusunda atık elektrikli ve elektronik eşyaların oluşumunu önlemek, ayrı toplanmalarını sağlamak ve bertaraf edilecek atık miktarını azaltmak için yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım hedeflerini belirlemektir. Bu yönetmelik, piyasadaki tüm elektrikli ve elektronik eşyaları kapsar (Resmi Gazete, 2022). Atık Yönetimi Yönetmeliği, Türkiye'de genel atık yönetimini düzenlemektedir. Yönetmeliğin amacı, atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetimini sağlamak ve atık oluşumunu azaltarak, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım yoluyla doğal kaynak kullanımını azaltmaktır. Bu yönetmeliğin Ek-4'ünde Atık listesi ve atık kodları yer almaktadır (Resmi Gazete, 2015). Türkiye'de bu kodlar, AB'nin Atık Listesi sistemine uyumlu olarak düzenlenmiştir. Bu kodlar, atıkların sınıflandırılması, toplanması, taşınması ve bertaraf edilmesi sürecinde kullanılmaktadır. 2012 yılında AB WEEE de yapılan değişiklik ile FV paneller WEEE ye girmiş ve asgari geri kazanım hedefleri de belirlenmiştir. Türkiye'nin AEEE yönetmeliği bu tarihten sonra 2015 yılında AB uyum çalışmaları kapsamında kabul edilmiştir. Ancak, AEEE Yönetimi Hakkında Yönetmelik'te (Resmi Gazete, 2022) AB WEEE'sinde olduğu biçimiyle FV panelleri adı ile belirten, bir kategoride ifade eden bir düzenleme bulunmamaktadır. Atık Elektrikli Ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik (Resmi Gazete, 2022) kapsamındaki elektronik eşyalar kategorilere ayrılarak, kategorilere ilişkin örneklerle birlikte belirtilmiştir. FV paneller yönetmelikte yer alan kategoriler veya örnekler arasında yer almamaktadır. Ancak yönetmeliğin kapsamadığı E-atıkların sıralandığı listede FV paneller yoktur. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik (Resmi Gazete, 2022) Ek-1'A dördüncü kategoride "Tüketici Ekipmanları" yer almaktadır. Ek-2/B'de ise kategori örnekleri yer almaktadır. Dördüncü kategori örnekleri başlığı altında "Elektrikli ve Elektronik Eşya tanımı kapsamındaki

diğer tüketici ekipmanları” ifadesi bulunmaktadır. Uygulamada, FV panel üreticilerinin bu ifadeye dayalı olarak iade edilmiş veya hasar görmüş panelleri; oluşturdukları atık yönetim planlarına göre E-atık olarak genelde “Ayrı Toplanan Fraksiyonlar” başlığı altında yer alan 20 01 35 “tehlikeli parçalar içeren ve ıskartaya çıkmış elektrikli ve elektronik ekipmanlar” kodu veya nadiren de olsa “Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları” başlığı altında yer alan 16 02 14 ıskarta ekipmanlar kodu ile (Resmi Gazete, 2015) Lisanslı E-Atık İşleme Tesislerine belirli bir bedel ödemek koşuluyla vermektedir. Lisanslı E-Atık İşleme Tesisleri tarafından kabul edilen FV Paneller, Atık Yönetimi Yönetmeliği’nin (Resmi Gazete, 2015) Ek-2/B’de yer alan R12 kodlu geri kazanım işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bu işlem sonucunda aldıkları atık kodlarına göre işlem görmektedir.

5. TÜRKİYE’DEKİ PANELLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Bu bölümde Türkiye’de 2014 yılı-2022 yılı Haziran ayı arasındaki FV GES kurulu güç değerleri dikkate alınarak, güneş panellerinden çıkacak atık bileşen miktarları belirlenmiştir. Güneş panelini oluşturan her bileşenlerin net tüketim miktarları panellerin geri dönüşümü sonucu geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarları; hücre, cam, ribbon, busbar, EVA, arka koruma tabakası, alüminyum çerçeve, bağlantı kutusu ve silikon-potting miktarları hesaplanmıştır.

Yıllara göre kurulu güç değerleri, ilgili yıllarda yaygın kullanılan FV panellere ait güç değeri ile bu veriler kullanılarak elde edilen panel adetleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kurulu güç, panel gücü, hücre tipi ve panel adetleri

Yıl	Kurulu Güç (MW)	Panel Gücü (W)	Hücre tipi	Panel miktarı (adet)
2022	8.479	545	Mono-PERC	1.216.514
2021	7.816	440	Monokristal	2.611.364
2020	6.667	400	Monokristal	1.680.000
2019	5.995	400	Monokristal	2.330.000
2018	5.063	380	Monokristal/ Polykristal	4.321.053
2017	3.421	360	Monokristal/ Polykristal	6.688.889
2016	833	300	Monokristal/ Polykristal	1.946.667
2015	249	270	Polykristal	775.000
2014	40	270	Polykristal	148.000

Kullanım ömrünü tamamlamış panellerden geri kazanılabilecek bileşen miktarları Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 4’te yer alan bileşenlere ait net tüketim miktarları (ton/adet) sektör deneyimi ve bilgisi ile elde edilmiştir.

Tablo 4. Kullanım ömrünü tamamlamış panellerden geri kazanılabilecek bileşen miktarları

Bileşen	Hücre	Cam	Ribbon	Busbar	EVA	Arka Koruma Tabakası	Alüminyum Çerçeve	Bağlantı Kutusu	Silikon-Potting Glue
2022									
Net tüketim (ton/adet)	0,0008	0,02	0,0002	0,00007	0,00236	0,00117	0,0025	0,00027	0,00067
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	1,0	24,3	0,2	0,1	2,9	1,4	3.041,3	322,4	810,2
2021									
Net tüketim (ton/adet)	0,0008	0,018	0,00019	0,00006	0,00236	0,00117	0,0024	0,00027	0,00067
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	2.091,7	47.004,6	488,3	143,6	6.168,0	3.050,1	6.267,3	692,0	1.739,2
2020									
Net tüketim (ton/adet)	0,0008	0,018	0,0002	0,00004	0,00236	0,00117	0,0024	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	1.345,7	30.240,0	342,6	62,5	3.968,2	1.962,2	4.032,0	445,2	372,6
2019									
Net tüketim (ton/adet)	0,0008	0,018	0,0002	0,00004	0,00236	0,00117	0,0024	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	1.866,3	41.940,0	475,1	86,7	5.503,5	2.721,4	5.592,0	617,5	516,8
2018									
Net tüketim (ton/adet)	0,0008	0,018	0,00018	0,00004	0,00236	0,00117	0,0024	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	3.461,2	77.779,0	757,0	160,7	10.206,3	5.047,0	10.370,5	1.145,1	958,4
2017									
Net tüketim (ton/adet)	0,0008	0,018	0,00018	0,00004	0,00236	0,00117	0,0024	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	5.357,8	120.400,0	1.171,9	248,8	15.799,2	7.812,6	16.053,3	1.772,6	1.483,6
2016									
Net tüketim (ton/adet)	0,0006	0,018	0,00017	0,00004	0,00236	0,00117	0,0022	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	1.168,0	35.040,0	321,6	72,4	4.598,0	2.273,7	4.282,7	515,9	431,8
2015									
Net tüketim (ton/adet)	0,0006	0,018	0,00017	0,00004	0,00236	0,00117	0,0022	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	465,0	13.950,0	128,0	28,8	1.830,6	905,2	1.705,0	205,4	171,9
2014									
Net tüketim (ton/adet)	0,0006	0,018	0,00017	0,00004	0,00236	0,00117	0,0022	0,00027	0,00022
Geri kazanılabilecek miktar (kT)	0,09	2,66	0,02	0,01	0,35	0,17	0,33	0,04	0,033

Tablo 4'teki verilere göre; 2014 yılı - 2022 yılı Haziran ayı arasındaki dönemde kurulan FV GES tesislerindeki FV panellerin kullanım ömürlerini tamamlaması durumunda, 15.756.740 ton hücre, 366.380.508 ton cam, 4.488.492 ton ribbon-busbar, 48.076.945 ton EVA, 23.773.866 ton arka koruma tabakası, 51.344.413 ton alüminyum çerçeve, 5.715.953 ton bağlantı kutusu ve 6.484.488 ton silikon-potting geri kazanımı mümkündür. Tablo 4'te yer alan her bir bileşene ait geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarlarının toplamı ile elde edilen yıllara göre geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Yıllara göre geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarları

Yıl	Geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarı (kT)
2022	4.203,8
2021	67.644,8
2020	42.771,0
2019	59.319,2
2018	109.885,2
2017	170.099,8
2016	48.704,1
2015	19.389,9
2014	3,7
Toplam	522.021,4

Geri kazanılan tüm malzemeler %100 geri dönüştürülemeyecektir. Cam, Si, Al, EVA ve Ag'nin geri dönüşüm oranları sırasıyla %89, %80, %81, %80 ve %89'dur (Sica ve diğerleri, 2018). Geri dönüşüm oranları ve Tablo 4'te yer alan kullanım ömrünü tamamlamış panellerden geri kazanılabilecek bileşen miktarları kullanılarak, geri dönüştürülebilecek malzeme miktarları hesaplanmıştır. Kullanım ömrünü tamamlamış panellerden geri kazanım miktarları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Yıllara göre geri dönüştürülebilecek bileşen miktarları

Yıl	Bileşen						
	Hücre	Cam	Ribbon	Busbar	EVA	Arka Koruma Tabakası	Alüminyum Çerçeve
2022	0,8	21,7	0,2	0,1	2,3	1,1	2.463,4
2021	1.673,4	41.834,1	434,6	127,8	4.934,4	2.440,1	5.076,5
2020	1.076,5	26.913,6	304,9	55,6	3.174,5	1.569,8	3.265,9
2019	1.493,1	37.326,6	422,8	77,1	4.402,8	2.177,2	4.529,5
2018	2.768,9	69.223,3	673,8	143,1	8.165,1	4.037,6	8.400,1
2017	4.286,2	107.156,0	1.043,0	221,5	12.639,3	6.250,1	13.003,2
2016	934,4	31.185,6	286,2	64,5	3.678,4	1.819,0	3.469,0
2015	372,0	12.415,5	113,9	25,7	1.464,4	724,2	1.381,1
2014	0,07	2,37	0,02	0,01	0,28	0,14	0,26
Toplam	12.605,4	326.078,7	3.279,5	715,3	38.461,6	19.019,1	41.589,0

Geri kazanılan panel bileşenleri, malzeme geri dönüşüm oranları dikkate alınarak kullanım ömrünü tamamlamış panellerden geri dönüştürülebilecek bileşen miktarları hesaplanmıştır. Tablo 6'daki verilere göre; 2014-2022 Haziran döneminde geri dönüşüm oranı uygulanması sonrası toplam 12.605.392 ton Hücre, 326.078.652 ton Cam, 3.279.465 ton Ribbon, 715.293 ton Busbar, 38.461.556 ton EVA, 19.019.093 ton Arka Koruma Tabakası, 41.588.974 ton Alüminyum Çerçeve ve toplamda yıllara göre geri dönüştürülebilecek bileşen miktarı 441.748.425 ton elde edilebileceği hesaplanmıştır.

6. SONUÇ

Türkiye'de 2014 yılı-2022 yılı Haziran ayı arasındaki GES kurulu güç değerleri dikkate alınarak, güneş panellerinden çıkacak bileşen atık miktarları güneş paneli bileşenleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. FV Panellerin geri dönüşümü, gerekli malzemeleri geri kazanırken binlerce ton E-atığın çöpe gitmesini önleyebilir ve üreticiler maliyet, üretim kaybının önüne geçebilir ve kazanç sağlayabilir. Kullanım ömrünü tamamlayan FV panellerin geri dönüşümü 100% yapan firma dünya üzerinde yoktur. Türkiye'de güneş paneli atıkları Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi yönetmeliğine göre değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, 2014-

2022 Haziran yılları arasında o yıl içerisinde üretilen en yüksek güçteki panel gücü baz alınarak geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarı hesaplanmıştır. 1KW'lık bir sistem için Cam, Si, Al, EVA ve Ag'nin geri dönüşüm oranları ile hesaplanan geri kazanılabilecek toplam bileşen miktarı kullanılarak toplam çıkacak bileşen atık miktarları bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda; 12.605.392 ton Hücre, 326.078.652 ton Cam, 3.279.465 ton Ribbon, 715.293 ton Busbar, 38.461.556 ton EVA, 19.019.093 ton Arka Koruma Tabakası, 41.588.974 ton Alüminyum elde edilebileceği hesaplanmıştır. Toplam geri kazanılabilecek FV panel bileşeni miktarı yaklaşık 441.748.425 ton atık hesaplanmıştır.

7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Güneş panellerinin geri dönüşümü, belirli bileşenlerin sökülmesinin karmaşıklığı ve geri dönüştürülen malzemelerin değeriyle karşılaştırıldığında geri dönüşüm işleminin nispeten yüksek maliyeti nedeniyle zorluklar bulunmaktadır. Bununla birlikte, geri dönüşüm teknolojilerinin iyileştirilmesi ve daha sürdürülebilir bir yaklaşım sağlamak amacıyla standartlaştırılmış geri dönüşüm uygulamalarının oluşturulması yönünde çabalar olması gerekmektedir. Mevcut geri dönüşüm süreçleri, geri dönüştürülmüş malzemelerden geri dönüşüm maliyetini karşılamaya yetecek kadar gelir elde etmekte zorlanmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için kapsamlı düzenleyici çerçeveler geliştirmek, geri dönüştürülebilirlik için panel tasarımını geliştirmek ve geri dönüşüm yeteneklerini geliştirebilecek teknolojiye yatırım yapmak gereklidir. Bu, güneş enerjisine sürdürülebilir bir yaklaşım oluşturulmasına yardımcı olacak ve C-Si panellere yönelik artan talebin çevresel atıklara yol açmamasını sağlayacaktır. Kullanım ömrünü tamamlayan güneş panellerinin sahip olduğu geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyeli ile ilgili ilgili tüm tarafları kapsayacak biçimde farkındalık oluşturulmalıdır. Toplumun farkındalığının ve ihtiyaçlarının temsil edilmesi, uygulanacak politikalar ve alınacak aksiyonlar için kritik öneme sahiptir. Bu anlayış, sektörde döngüsellığı ilerletmeye yardımcı olabilir. Elde edilen sonuçlar çeşitli platform toplantılarında paylaşılmalı ve politika önerilerinin hayata geçirilmesi için ortak çabalar gösterilmelidir.

Türkiye'de mevcut uygulamada, FV paneller E-atık yönetmeliği kapsamında işlem görmektedir. Lisanslı E-Atık İşleme Tesisleri tarafından kabul edilen FV Paneller, R12 kodlu geri kazanım işlemleri sonucunda aldıkları atık kodlarına göre işlenmektedir. Toplanan FV panellerin işlem görmesi sonrası büyük oranda cam elde edilmektedir. Piyasa koşullarında bu camın geri dönüşüm imkanı olmadığı bilgisi sektör temsilcileri ile yapılan görüşmelerden öğrenilmiştir. Elde edilen camlar atık kodu alınarak düzenli depolama alanlarında depolanmaktadır. Bu durum toplanan panellerin bertaraf işlemleri için atık sahibinden belirli bir bedel tahsilini gerektirmektedir. FV panellerin çerçevelerindeki alüminyumların geri dönüşümü mümkün olmakta, bağlantı kutusu nedeniyle bakır eldesi sağlanmaktadır. AEEE Yönetimi Hakkında yönetmelik kapsamında yapılan geri kazanım işlemleri panel bileşenlerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımını sağlayacak detaylı süreçleri tanımlamamaktadır. Bu nedenle FV güneş paneli atıklarının yönetimi ile ilgili kapsamlı düzenleyici çerçeveler geliştirmek ve geri dönüşüm yeteneklerini geliştirebilecek teknolojiye yatırım yapmak gereklidir. 2012 yılında AB'nin WEEE Yönetmeliği'nde yapılan değişiklik ile FV paneller de WEEE kapsamına alınmış ve bu paneller için asgari geri kazanım hedefleri belirlenmiştir. Türkiye, 2015 yılında bu değişikliklere uyum sağlamak amacıyla AEEE Yönetimi Hakkında Yönetmelik'i kabul etmiştir. Ancak, bu yönetmelikte AB WEEE Yönetmeliği'ndeki gibi FV panellere özel bir kategori bulunmamaktadır. Türkiye'de FV GES kuruluşu 2014 yıllarında başlamış ve 2015 yılından itibaren belirgin bir artış göstermiştir. Bu durum, yönetmelikte FV panellerle ilgili bir düzenlemenin olmamasına neden olmuş olabilir. Ancak günümüzde FV GES tesislerinin kuruluşu hızla artmaktadır ve bu tesislerde kullanılan FV paneller kullanım ömrünü tamamladığında veya herhangi bir olumsuz durum nedeniyle kullanım dışı kalacaktır. Ayrıca, Türkiye'de üretilen FV panellerin kusurları veya sahalarda yaşanan kazalar nedeniyle de panel atığı oluşmaktadır. Güneş paneli geri dönüşümü sürecinde üreticilerin sorumluluklarını yerine getirebilmeleri için düzenlemelere tabi olmaları gerekir, böylece üreticiler geri dönüşüm yükümlülüklerini üstlenebilirler. Bu nedenlerle, Türkiye'de FV atıklarının yönetimi amacıyla AEEE Yönetimi Hakkında Yönetmelik'te bir değişikliğe gidilmesi gerekmektedir. Geri kazanım işlemleri detaylı biçimde düzenlenmelidir. FV paneller, yönetmeliğe eklenmeli ve AB WEEE'de olduğu gibi, piyasaya sürülen atık güneş panellerinin yönetim ve bertaraf masraflarının FV panel üreticilerine ait olması sağlanmalıdır. Bu konuda kademeli bir düzenlemeye gidilmelidir. Yıllara yayılmış bir geçiş düzenlemesi ile değişen geri kazanım hedefleri belirlenebilir.

KAYNAKÇA

- Al-Aqqad, A. O. G. & Menyhart, J. (2023). Solar panels problem after end-of-life and waste management (SWOT analysis for the global directives of PV's waste management). *International Review of Applied Sciences and Engineering*. DOI:10.1556/1848.2022.00511.
- Aşkın, A., Kılıkış, Ş. & Akınoğlu, B. G. (2023). Recycling photovoltaic modules within a circular economy approach and a snapshot for Türkiye. *Renewable Energy*, 208, 583–596. DOI:10.1016/j.renene.2023.03.035.
- Corcelli, F., Ripa, M., Leccisi, E., Cigolotti, V., Fiandra, V. & Graditi, G. (2018). Sustainable urban electricity supply chain – indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life *Ecol Indic*, 94 (2018), pp. 37-51, DOI:10.1016/j.ecolind.2016.03.028.
- Cybrid (2022). Cynagard 465A(R). Erişim Adresi(23.05.2023): <https://en.cybrid.com.cn/>
- Düzcem Şişecam (2023). Güneş enerjisi, Güneş paneli camları. Erişim Adresi(23.05.2023): <https://duzcam.sisecam.com/tr/>
- Farrell, C. C. & Osman, A. I. & Doherty, R. & Saad, M. & Zhang, X. & Murphy, A. & Harrison, J. & Vennard, A. S. M. & Kumaravel, V. & Al-Muhtaseb, A. H. & Rooney, D. W. (2020). Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109911. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109911.
- Gönen Ç.& Kaplanoglu E. (2019). Environmental and economic evaluation of solar panel wastes recycling. *Waste Manag Res*, 37 p.412-418. DOI:10.1177/ 0734242X19826331.
- Güneş Sistemleri (2008). Güneş hücreleri. Erişim Adresi(28.05.2023): <http://www.gunessistemleri.com/>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Critical minerals market review 2023*. Alındı: 7 Mayıs, 2023, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>
- International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme (IEA PVPS) (2018). *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies IEA PVPS Task12, Subtask 1, Recycling Report IEA-PVPST12-10:2018*. Alındı 20 Haziran, 2023, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Modul_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *World energy transitions outlook 2022: 1.5°C pathway*. International Renewable Energy Agency. Alındı: 28 Nisan, 2023, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Digital Report World Energy-Transitions. Erişim Adresi(17.09.2023): <https://www.irena.org/>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). Renewable Energy and Jobs Annual Review 2024 Erişim Adresi (14.09.2024): <https://www.irena.org/>
- Notarnicola, S. (2013). *Recovery and recycling of photovoltaic modules at the end of their life(Recuperoe riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita)*, p. 21 Alındı: 21 Mayıs, 2023, https://www.qualenergia.it/sites/default/files/articolo-doc/Smaltimento-Riciclo-moduli-fotovoltaici_qualenergia_lug2013__0.pdf
- Official Journal of the European Union(2012). directive 2012/19/eu of the european parliament and of the council of 4 july 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) Erişim Adresi(15.09.2024): <https://eur-lex.europa.eu/>
- PWC (2021). *Türkiye ve Dünyada Güneş Enerjisi Sektörü Raporu* (21.12.2021). Alındı:14 Temmuz, 2023, <https://www.pwc.com.tr/tr/sectorler/enerji/turkiye-ve-dunyada-gunes-enerjisi-sektoru-raporu.pdf>
- Resmi Gazete (2015). Atık Yönetimi Yönetmeliği. Erişim Adresi(14.09.2024): <https://www.resmigazete.gov.tr>
- Resmi Gazete (2022). Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Hakkında Yönetmelik. Erişim Adresi (14.09.2024): <https://www.resmigazete.gov.tr>
- Samani, P., Garcia-Saravia Ortiz-de-Montellano, C. & van der Meer, Y. (2023). How can the circular economy

support the advancement of the Sustainable Development Goals (SDGs)? A comprehensive analysis. Sustainable Production and Consumption, 40, p.352–362. DOI:10.1016/j.spc.2023.07.003.

Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M. & Lucchetti, M. C. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, p.2934–2945. DOI:10.1016/j.rser.2017.10.039.

Smart Solar. (2023). Smart yatırımcı sunumu (30.06.2023). Alındı: 29 Temmuz, 2023, <https://www.smartsolar.com.tr/pdf/Smart-Yatirimci-Sunumu-30-06-2023.pdf>

Solar AVM (2022). Güneş panellerini geri dönüştürme. Erişim Adresi (20.05.2023): <https://solaravm.com/>

T.C. Cumhurbaşkanlığı. (2023). *Orta vadeli plan (2024-2026)*. Resmî Gazete, Sayı: 32301 Mükerrer. Alındı: 25 Nisan, 2023, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/09/20230906M1-1.pdf>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022a). Bilgi merkezi, Enerji, Güneş. Erişim Adresi (21.04.2023): <http://enerji.gov.tr/>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022b). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. (02.05.2024) Alındı: 17 Mayıs, 2023, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

Türk Asya Stratejik Araştırmalar Merkezi (TASAM). (2021) Güneş Işımlarından Elektrik Üretiminde Hiç Düşünülmeyen Son Milyonlarca Güneş Paneli Sonunda Ne Olacak? Erişim Adresi (17.05.2023):

<https://tasam.org/tr>

Wang, T.-Y., Hsiao, J.-C. & Du, C.-H. (2012). Recycling of materials from silicon base solar cell module. Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. DOI: 10.1109/PVSC.2012.6318071.

ACTIVATOR OF LOW-FREQUENCY MECHANICAL VIBRATIONS TO INCREASE THE DEBIT OF HARD-TO-RECOVER DEPOSITS

İkram BABAZADE

Ass.professor, senior researcher "Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry" Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

Abstract

Impact on the oil reservoir in various ways is a promising technology for increasing oil recovery, especially in conditions of depleted or hard-to-recover reserves, and this method consists mainly of physical impact to improve the permeability of the oil reservoir and increase the efficiency of oil production. Such a method may include various technologies, for example, the use of wave generators of mechanical vibrations, electromagnetic vibration exciters of mechanical vibrations, hydraulic vibration devices, etc.

Keywords: hard-to-recover reserves, vibrational exciters, fluid, resonance.

INTRODUCTION

For watered fields at a late stage of production, oil in the formations is retained mainly in the form of film oil in the walls of cracks and capillaries, and as residual reserves in terms of oil clusters and geoblocks. It is known that a fluid-saturated reservoir consists of geoblocks and, which are separated by cracks filled with fluid due to Earth pressure and are in a stressed state. Gas blocks have dominant (quasi-resonant) frequencies, and operating at the dominant frequency of the formation ensures that the level of rock displacement maximizes the amplitude of vibrations of the geoblocks.

One promising method for increasing oil recovery in these fields is the creation of low-frequency (1-20Hz) mechanical vibrations at the depth of the formation. These vibrations induce resonant vibrations in the geoblocks, causing the blocks to be lapped and microcracks to expand into macro-cracks, dividing the blocks into sub-blocks [1].

PROBLEM STATEMENT

To create low-frequency (1-20) Hz mechanical vibrations at the depth of the formation, an electric energy converter is proposed, consisting of a three-phase electromagnetic exciter located at the depth of the formation [2]. Electromagnetic vibration exciters are the most advanced type of drive due to their basic design. While other types of drives convert electrical energy through rotational motion into reciprocating motion, electromagnetic exciters achieve the necessary reciprocating motion directly without intermediate mechanisms.

Electromagnetic vibration exciters lack nodes where friction, sliding, or rolling would occur, and they do not have bearings subject to high dynamic loads. To increase the specific power of the converter, a three-rod traction electromagnet was used, as shown in Fig. 1a. The converter features a movable armature supported on springs and identical windings on all three rods of a III-shaped magnetic circuit, which are connected in a star configuration and linked to a three-phase standard power supply network through three identical series-connected capacitors (Fig. 1b) [2,3].

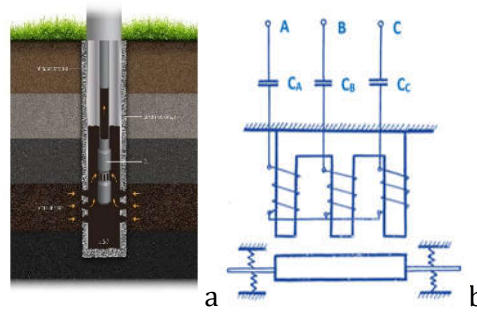


Figure.1 Vibration exciter

The armature retracts due to the pulling force of the magnet, and falls away with the help of a spring, which the armature compresses during retracting. The retraction and fall-off of the armature alternates periodically. In this case, the shape of the gap change curve over time is close to sinusoidal or may have a pronounced first harmonic component. The oscillations of the armature exhibit a stable and undamped character. The converter is a self-oscillating system, and its processes, adhering to the general laws of self-oscillating systems, exhibit specific features.

The valve regulating the energy supply to the system experiences periodic voltage resonance. All movements in the system are accompanied by redistributions between energy storage devices, including mass, spring, electromagnet winding, and capacitance. The ability to waste energy portions accumulated in these devices determines the system's capability to perform work against friction. Energy transfers from the electrical to the mechanical part, where energy exchange occurs both in terms of the supply network frequency and the frequency of mechanical vibrations, ultimately determining the system's operability. The armature, making oscillatory movements, reciprocates and changes the value of the air gap δ in phase with all three rods. The three-phase exciter provides symmetrical loading of the phases in the three-phase circuit. The differential equations of the electrical and mechanical systems of this converter are defined as:

$$\begin{aligned} U_A &= i_A r_A + \frac{1}{C_A} \int i_A dt + W_A \frac{d}{dt}(\Phi_A) \\ U_B &= i_B r_B + \frac{1}{C_B} \int i_B dt + W_B \frac{d}{dt}(\Phi_B) \quad (1) \\ U_C &= i_C r_C + \frac{1}{C_C} \int i_C dt + W_C \frac{d}{dt}(\Phi_C) \end{aligned}$$

where $U_{A(B,C)}$ - are the phase voltages of phases A, B and C, respectively;

$r_A = r_B = r_C = r$ - active resistances of the windings of phases A, B and C;

$C_A = C_B = C_C = C$ - capacitance of capacitors in phases A, B and C;

$W_A = W_B = W_C = W$ - the number of turns of the phase windings of the exciter of low-frequency mechanical vibrations;

$\Phi_{A(B,C)}$ - magnetic fluxes in the rods of phases A, B and C

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r_{mex} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{\lambda} x = F_{\Sigma} \quad (2)$$

where m - is the reduced mass,

r_{mex} - friction resistance,

$\frac{1}{\lambda}$ - spring stiffness.

Given the symmetry of the load phases of a three-phase circuit, each of the equations (1) can be considered in isolation, noting that the magnetic fluxes Φ_A , Φ_B and Φ_C must have the same harmonic composition, each component of which has the same amplitudes with "sin" or "cos" functions of the same frequency, but with different phase angles. The composition of magnetic fluxes must necessarily contain harmonic components

(generally dominant compared to other harmonic components) with frequencies determined by the supply network frequency.

Since the power supply of the electromagnetic exciter is from a three-phase network, where phase voltage shifts between each other at angles of 120°, these phase shifts should also be present in the harmonic components of magnetic fluxes at the power frequency, denoted as $\omega(k)$. The retraction and falling off of the armature is periodically alternating (Fig.2).

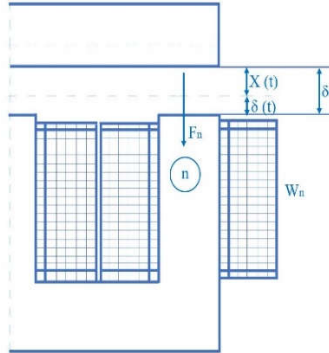


Figure 2. Cross-section of the device

In this case, the shape of the gap change curve over time is assumed to be close to sinusoidal or may have a pronounced first harmonic component, where the armature performs its oscillatory movements with some average air gap value δ_0 , shifting in time by $x(t)$.

$$\begin{aligned} \delta(t) + x(t) &= \delta_0 \\ \delta(t) &= \delta_0 - x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

There are strict inequalities:

$$\begin{aligned} x(t) &< \delta_0 \\ \delta(t) &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Note that the orientation of $x(t)$ is chosen as positive when the movable armature is attracted to the yoke, that is, according to the conditionally positive direction of the traction force F_n of the n th rod with a winding. The pulling force of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations, as in any traction electromagnet, is related to the magnitude of the components of the magnetic flux in the magnetic system of these exciters. Establishing a connection between the harmonic compositions of the current $i(t)$ and the magnetic flux $\Phi(t)$ with a given change in the air gap $\delta(t)$ between the movable armature and any of the cores of the three-rod structure, we have:

$$i(t) = K \Phi(t) \delta(t) \quad (5)$$

where $K = \frac{1}{W\mu_0 S_\mu}$ is the constructive coefficient.

Considering that the magnetic flux in each rod is generally described as

$$\Phi(t) = \sum_{g=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \Phi_{jm}^{(g)} \sin(\omega_j t + \alpha_j) \quad (6)$$

where the internal sum $\sum_{j=1}^{\infty} \Phi_{jm}^{(g)} \sin(\omega_j t + \alpha_j)$ represents a Fourier series (summation by index j), and the outer sum (by index g) represents the summation of Fourier series where the fundamental frequencies (frequencies of their first harmonics) are related [2] as follows:

$$nT_{(k)} = mT_{(k-1)} = \dots T_{\text{общ.}} \quad \text{or} \\ n \frac{2\pi}{\omega_{(k)}} = m \frac{2\pi}{\omega_{(k-1)}} = \dots = \frac{2\pi}{\omega_{\text{общ}}} \quad (7)$$

in relation to $\Phi(t)$ in (6), for subsequent considerations, we will consider only the sum of the first lateral harmonics of $\Phi_{\Sigma}(t)$:

$$\Phi_{\Sigma}(t) = \dots + \Phi_{(k-1)m} \sin(\omega_{(k-1)}t + \alpha_{(k-1)}) + \Phi_{(k)m} \sin(\omega_{(k)}t + \alpha_{(k)}) + \\ + \Phi_{(k+1)m} \sin(\omega_{(k+1)}t + \alpha_{(k+1)}) + \dots \quad (8)$$

However, special studies have made it possible to establish the presence of phase angles at $\frac{2\pi}{3}$ and in the harmonic components of magnetic fluxes at frequencies different from the frequency $\omega_{(k)}$. The main result of these studies is the following experimentally confirmed consideration. Since the modulation is carried out in windings located on all three rods of the magnetic circuit using a common armature (and, therefore, in phase, which is confirmed by voltage waveforms $U_L(t)$ on these windings (Fig.3), then if the shape of the envelopes for these three voltages coincides, a shift of one of their $\frac{2\pi}{3}$ harmonic components in phase by entails the appearance of corresponding shifts in other harmonic components to preserve the invariance of the resulting shape of this package of harmonics.

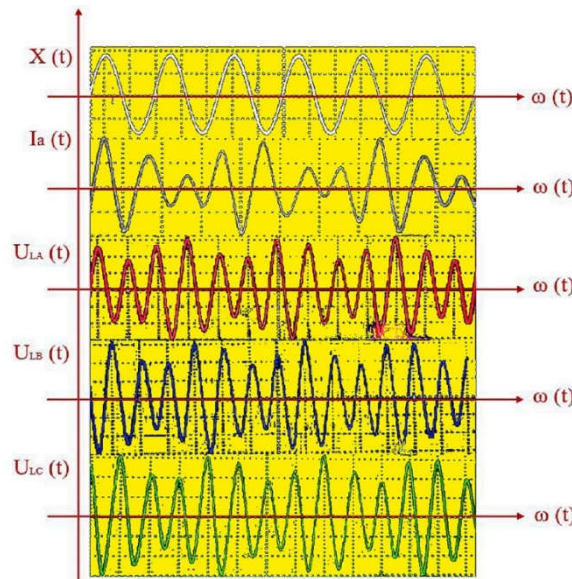


Figure 3. Oscillographs of the main parameters of the device

First of all, we note the following feature of the formation of conditional packets of magnetic fluxes of individual rods of a magnetic circuit. Let's imagine packages of magnetic fluxes in accordance with the connection of the windings creating them to the three-phase power supply in the form :

$$\Phi_{\Sigma A}(t) = \Phi_{(k-1)m} \cdot \sin(\omega_{(k-1)}t + \alpha_{(k-1)}) \\ + \Phi_{(k)m} \cdot \sin(\omega_{(k)}t + \alpha_{(k)}) + \\ + \Phi_{(k+1)m} \cdot \sin(\omega_{(k+1)}t + \alpha_{(k+1)})$$

$$\begin{aligned}\Phi_{\Sigma_B}(t) &= \Phi_{(k-1)_m} \cdot \sin(\omega_{(k-1)}t + \alpha_{(k-1)} - 120^\circ) + \\ &+ \Phi_{(k)_m} \cdot \sin(\omega_{(k)}t + \alpha_{(k)} - 120^\circ) + \\ &+ \Phi_{(k+1)_m} \cdot \sin(\omega_{(k+1)}t + \alpha_{(k+1)} - 120^\circ)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{\Sigma_C}(t) &= \Phi_{(k-1)_m} \cdot \sin(\omega_{(k-1)}t + \alpha_{(k-1)} - 240^\circ) + \\ &+ \Phi_{(k)_m} \cdot \sin(\omega_{(k)}t + \alpha_{(k)} - 240^\circ) + \Phi_{(k+1)_m} \cdot \sin(\omega_{(k+1)}t + \alpha_{(k+1)} - 240^\circ) \quad (9)\end{aligned}$$

These values in (9) show that when determining the symmetry of the parameters of the winding circuits of a three-phase electromagnetic exciter and its power supply system, symmetry is performed in the distribution of not only the parameters of the harmonic components of magnetic fluxes at the supply frequency $\omega_{(k)}$, but also the parameters of the harmonic components of magnetic fluxes at the side frequencies $\omega_{(k-1)}$ and $\omega_{(k+1)}$.

Otherwise, it is executed

$$\Phi_{\Sigma_A} + \Phi_{\Sigma_B} + \Phi_{\Sigma_C} = 0 \quad (10)$$

the condition and taking into account the presence in Φ_{Σ_n} of the harmonic components $\omega_{(k-1)}$ and $\omega_{(k+1)}$. Note that this is consistent with the above-mentioned judgments, carried out on the basis of the above, regarding the appearance of phase shifts in the lateral harmonic components of individual phases while maintaining the shape of the envelope of packets of these harmonic components. However, in accordance with (2), the traction force of the converter, taking into account the above, is determined by summing the values of the magnetic fluxes, each of which is squared [2,3]. Therefore:

$$\begin{aligned}F_\Sigma &= F_\Sigma(t) = \\ &= h[\Phi_{\Sigma_A}^2(t) + \Phi_{\Sigma_B}^2(t) + \Phi_{\Sigma_C}^2(t)] \quad (11)\end{aligned}$$

For convenience, we rewrite (11) normalizing by h :

$$\frac{1}{h}F_\Sigma(t) = \Phi_{\Sigma_A}^2(t) + \Phi_{\Sigma_B}^2(t) + \Phi_{\Sigma_C}^2(t) \quad (12)$$

Substituting (9) into (12) and performing certain transformations, we have that when squared, two types of combinational harmonic forms appear: total and difference. In the case of total harmonic components, there is both an increase in their frequency (due to the summation of their frequencies) and an increase in phases. Since in the latter case, conditional rotations of vectors at angles $n \frac{2\pi}{3}$ occur during summation, then there is a coincidence in phases and frequencies of components belonging to different harmonic components. With the symmetry of the parameters of individual circuits and mains power supply, the amplitude distribution of the harmonic components of the force is such that the above phase shifts lead to mutual compensation. The components of the total combination components completely compensate each other and, therefore, the resulting force on these components is zero. Turning to the consideration of differential combinational harmonic components, we note that after transformations in (12), the following terms are preserved: the summation of constant components and harmonic components at difference frequencies is carried out. The main harmonics can form such a system of components according to the distribution of their frequencies, in which the difference frequencies in the combinational harmonics of the force will be equal to the frequency ν , which is a given frequency of mechanical vibrations included in the frequency of the traction force, determining the frequency in its alternating component. The nature of the occurrence of $\omega_{(k+1)}$ and $\omega_{(k-1)}$ is explained by the movement of an electromagnet, in which the mechanical part is tuned to the frequency

$$\nu = \sqrt{\frac{1}{\lambda m}} \quad (13)$$

The following frequency composition is presented here:

$$\omega_{(k+1)} - \omega_{(k)} = \omega_{(k)} - \omega_{(k-1)} = \nu \quad (14)$$

and also

$$\alpha_{(k+1)} - \alpha_{(k)} = \alpha_{(k)} - \alpha_{(k-1)} = \theta \quad (15)$$

It follows that

$$\omega_{(k+1)} - \omega_{(k-1)} = 2\nu \quad \text{and} \quad (16) \quad \alpha_{(k+1)} - \alpha_{(k-1)} = 2\theta \quad (17)$$

Taking into account (14), (15), (16) and (17) these expressions (12) can also be represented in the form

$$F_r(t) = \frac{F_\Sigma(t)}{F_m} = \frac{1}{2}\gamma_{(k-1)}^2 + \frac{1}{2}\gamma_{(k)}^2 + \frac{1}{2}\gamma_{(k+1)}^2 + \gamma_{(k+1)}\gamma_{(k-1)} \cdot \cos 2(\nu t + \theta) + \gamma_{(k)}(\gamma_{(k-1)} + \gamma_{(k+1)})\cos(\nu t + \theta) \quad (18)$$

where $F_m = 3 h \Phi_m^2$ - some normalizing value of the traction force of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations [2].

The traction force of the vibration exciter contains harmonic components forming a group of combinational harmonics, traction force. The frequency of these harmonics differs from the initial part of the total magnetic flux both in the direction of increasing frequency and in the direction of its significant decrease.

In addition, there are groups of force components that do not depend on time, and a group of components that have strictly doubled frequencies relative to the original ones. The main harmonics can form such a system of components according to the distribution of their frequencies, in which the difference frequencies in the combinational harmonics of the force will be equal to the frequency, which is a given frequency of mechanical vibrations and thus included in the frequency of the traction force, determining the frequency in its alternating component [4,5].

The design of the above-mentioned device was carried out using the MATLAB program and based on the data obtained, a device was manufactured for a specific deposit.



Fig. 4. General view of the device:
a-control unit; b - three-phase influencer

By changing the parameters of these oscillations using a control device located on the surface of the earth (a in fig.4), the formation of a set of nonlinear resonances in the layers is achieved.

The use of the activator for one month gave the results of increasing the recoverability of oil from neighboring wells by 10-15%, which confirms the uniqueness of the above technology, which consists in the principle of interaction of nonlinear physical processes of the activator, i.e. the source of excitation and nonlinear physical processes in a productive hydrocarbon deposit.

The creation of vibration by this transducer in the bottom of an oil well contributes to the destruction of pore structures and an increase in channels through which oil can move. Vibration vibrations contribute to the removal of impurities and mechanical impurities, which improves the filtration properties of the formation. Vibration effects can temporarily reduce the viscosity of the oil, which facilitates its movement through the pores of the formation. The generation of vibration vibrations leads to an increase in pressure in a porous medium, which contributes to the displacement of oil from low-permeable zones to more permeable ones and further to producing wells [4,5,6].

The effective use of vibration exposure can significantly improve the economic performance of oil production and reduce the environmental impact.

CONCLUSION

1. The occurrence of the above processes in a productive formation serves to change the permeability of the formation and increase production. The creation of mechanical resonance phenomena in several wells located at a certain distance from each other at the same time led to an increase in oil production (by 10-12%) in most of the spent wells located in this area.
2. This method is used for the first time, since it is considered a method of physical impact on the productive reservoir.

REFERENCES:

1. Hasanov R. A, Babazade I.S., Musevi S.A., 2024. "Ensuring the Extraction of an Additional Volume of Hydrocarbons by Influencing Productive Formations by Physical Methods (ENHANCED Oil Recovery)", "Global Summit on Interdisciplinary Innovations: Material Sciences, Engineering Technology, Health Care and Sustainable Waste Management" held during June 12-13, 2024 in Dubai, UAE, pp.137-143
2. Babaev I.S. Three-phase adjustable electromagnetic exciters of low-frequency mechanical vibrations for control systems of technological processes with vibration // Dissertation. step. Ph.D. tech. sciences in special 05.13.05, Moscow, Moscow Higher Technical School named after N. E. Bauman, 1987
3. Y. E. Nitusov, A. I. Kotsyubinsky, I. S. Babaev A.S. 1356136, A1, H02K 33/12, B06B1/04 Electromagnetic vibrator // Discoveries, inventions, Moscow, 1987
4. Ramiz Hasanov, İkrım Babazade, Saida Musevi (2024) Physical Method Development for Increasing EOR the Performances Wells. Journal of Earth and Environmental Science Research. SRC/JEESR-291.DOI:doi.org/10.47363/JEESR/2024(6)222
5. R.F. Ganiev, L.E. Ukrainsky, 2011, "Nonlinear Wave Mechanics and Technologies. Wave and vibrational phenomena in the basis of high technologies", Scientific and Publishing Centre "Regular and Chaotic Dynamics", Moscow, 780 pp.
6. Y.S. Kuznetsov, S.R. Ganiyev, D.R. Sultanov, V.N. Fedorov, S.N. Bastrikov, 2023, "Experimental and field studies of wave technology for bottomhole cleaning and clogging of permeable formations", "Oil and Gas", № 6, pp.25-34.

EFFECT OF REFRIGERANT TYPES ON FLOW BOILING IN MICROCHANNELS**Ömer ÖKSÜZ**

Research Assistant, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering,
Trabzon-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0003-4027-4666

Burak MARKAL

Associate Professor, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering,
Trabzon-Türkiye, ORCID: 0000-0001-6356-3503

Abstract

Heat sinks with flow boiling inside microchannels are among the existing thermal management techniques that have the potential to be used for cooling highly functional, complex electronic equipment to the desired level. The phase change within the flow channels, the manipulation of the flow by bubbles, the high level of compactness due to the microstructure and the potential to maintain constant temperature in phase-change flows are the reasons that make this technique popular. Since the medium/component that provides heat transfer in cooling with phase change flows in the channel is the working fluid, the type of working fluid or modifications made to the working fluid have the potential to significantly affect the cooling performance. For this reason, it is important to investigate the different types of fluids used in microchannels and to reveal the specific boiling flow characteristics in order to improve the boiling heat transfer.

In this study, the main types of refrigerants used in flow boiling in microchannels were grouped in detail under specific headings, based on a comprehensive review of the literature and considering the topics focused on in related studies. In this grouping, three different headings were created for the fluids: (1) different pure fluids, (2) fluids with nanoparticles, (3) surfactant containing fluids. Each heading was presented in detail based on the available knowledge in the literature.

In summary, this review paper reported in detail the effects of thermo-physical properties of fluids on the characteristics of flow boiling in microchannels. Emphasis was placed on surface tension, an important fluid property for boiling, which was manipulated by surfactant doping. Furthermore, the role of nanoparticle doping in flow boiling, an alternative option for single-phase flows, was discussed. This study is intended to provide a new perspective to the existing literature and to serve as an important guiding source for new studies on the subject.

Keywords: Coolant type, Flow boiling, Microchannel.

Introduction

Some of the cooling methods used from the past to the present become unable to meet the needs of the developing technological electronic devices as they release relatively more heat. Indeed, fan cooling has gradually been replaced by heat pipe or thermoelectric cooling systems to meet the heat dissipation needs of laptop computers (Lee, 2022). Some other alternative cooling systems, namely, impinging jets, and vortex tubes, are not compatible with operational requirements, such as the need for cooling in restricted spaces and the importance of maintaining low noise levels (Markal et al., 2023). In addition to those mentioned, two-phase cooling systems have gained popularity in recent years due to the inadequacy of liquid cooling systems in microelectronic devices with dissipation of high heat flux. Two-phase flow cooling systems absorb more heat than liquid cooling systems for the same mass flux through their ability to utilize both sensible and latent heat. In addition, potentially providing constant fluid temperature during phase change allows for uniform temperature distribution over the cooled device (Camarasa et al., 2024).

Heat transfer enhancements in microchannel systems can be classified into two principal techniques: (1) active and (2) passive. Each of these techniques offers distinctive advantages and limitations. Active techniques, necessitate usage of external power inputs through methodologies including mechanic mixing, fluid pumping, suction or injection, rotation, vibration, or the application of electric or magnetic fields. Although the

techniques can significantly improve heat transfer performance, they often lead to complexity of the systems, more energy consumption and potential reliability issues in long-term operation. In contrast, passive techniques manage the heat transfer process without the need for external device. Although their effectiveness may be limited compared to active methods, in the previous studies by Liang and Mudawar (2020) and Parizad Benam et al. (2021) showed that passive techniques were more easier to imply.

The role of fluid's properties in enhancing heat transfer mechanisms in microchannel systems has been the subject of extensive research. This approach not only simplifies system design by being independent of system design parameters, but also offers a more sustainable alternative. However, as noted in previous studies by Moreira et al. (2023) and Zhuang et al. (2023), achieving significant heat transfer enhancement only through the modification of fluid properties may be challenging. This result underlines the need for innovative strategies that fully exploit the potential of fluid dynamics and thermal behaviour in microchannels. In addition, it is an inescapable reality of the contemporary era that the Ozone Depletion Potential abbreviated as ODP and Global Warming Potential abbreviated as GWP of fluids should be considered.

This review paper thoroughly examines how the thermal and physical properties of fluids influence the behavior and characteristics of flow boiling in microchannels. Special attention is given to the role of surface tension which is a critical fluid property in boiling processes. The study highlights how surface tension can be adjusted through the addition of surfactants to optimize boiling performance. Additionally, the paper explores the impact of nanoparticle doping, a common alternative method utilized in single-phase flows, and its potential applications in flow boiling systems. By presenting these insights, the review aims to offer a fresh perspective on existing research, filling potential gaps in the existing literature. Furthermore, It is aimed to serve as a valuable reference and useful guide for researchers engaged in advancing their studies in this evolving field.

Investigation of Different Fluid Types in Flow Boiling

The selection of refrigerants for practical engineering applications necessitates a cautious examination of crucial properties, including low toxicity, low flammability, a brief atmospheric lifespan, and minimal ODP. Furthermore, the new generation refrigerants are anticipated to demonstrate an exceptionally low or ultra-low GWP. These two metrics, ODP and GWP, serve as pivotal criteria in determining the suitability of refrigerants (Lv et al., 2022). In addition to ODP and GWP being critical environmental metrics that minimise the environmental impact of refrigerants, these refrigerants must also have strong thermophysical properties and cost effectiveness to ensure their feasibility and wide-scale use (Ali Kadhim, 2024). Refrigerants with superior heat transfer capabilities, high latent heat of vaporisation, and low operating pressures are highly desired for utilisation in household and commercial refrigeration systems. In the study by Zhang et al. (2024), it is also accepted that fluid's properties such as wettability, thermal conductivity and viscosity have a crucial role on the efficiency of flow boiling. Therefore, the following sections present refrigerants classified under 3 different headings.

Different Pure Fluids

Recent reviews and studies on heat transfer processes in microchannel and instability focus mainly on water which has favorable thermal properties, according to a very recent review study by Zhang et al., (2024). However, the high boiling point of water makes it less suitable for cooling of widely used electronic devices. Correct determination of the critical heat flux (CHF) is essential for the design of two phase microchannel heat sinks, as it defines the maximum thermal capacity of the system. Exceeding the CHF can result in a rapid rise in operating temperature, putting the reliability and performance of electronic devices at considerable risk. Therefore, determination of CHF in a correct manner, and comprehension of its mechanisms in microchannels are essential steps in developing effective and reliable two-phase microchannel heatsinks for advanced thermal management applications (Kuan and Kandlikar, 2006). In multi-microchannels with flow boiling, several geometric and fluid-related factors such as (including channel dimensions, surface roughness, heated length, fluid properties, inlet subcooling, mass flux and saturation temperature) influence the CHF (Kærn et al., 2021). Among these parameters, the saturation temperature plays a key role. It directly affects the phase change dynamics and the heat transfer efficiency within the microchannel system. A second crucial performance parameter in the field of flow boiling in microchannels is pressure drop. Pressure can be also affected by other

parameters in the process such as saturation temperature. Generally, an increase in saturation temperature results in a slight decrease in both total and channel pressure drop. This reduction is primarily related to alterations in the properties of the fluid caused by the increase in temperature, as outlined by Huang and Thome (2017). Additionally, the researchers describe the mechanism of pressure drop in their experiments conducted with different refrigerants. As the saturation temperature increases, the viscosity of the liquid phase decreases, resulting in lower shear stress at the interface of the liquid-wall. Similarly, the reduced ratio of liquid and vapor density decreases the slip ratio, which in turn reduces the shear stress at the vapor/liquid interface. These combined effects contribute to the overall decrease in pressure drop with increasing saturation temperature. The overall effect of the saturation temperature on pressure dynamics remains a critical consideration in optimising flow boiling performance in microchannels, although occasional deviations may occur due to experimental variability.

In their experimental study, Park and Thome (2010) showed that at lower mass velocities, increasing the saturation temperature generally leads to an increase in CHF. However, at higher mass velocities or in channels with larger dimensions, increasing the saturation temperature may reduce the CHF due to the competing effects of other parameters altered by higher pressures, such as reduced surface tension and latent heat of vaporisation. Li et al. (2022), in their research, considered capillary structures using micro-pin fins and demonstrated their significant impact on heat transfer performance under condition of high heat flux, these structures ensure effective inhibition of vapor film formation at elevated heat flux levels. In addition, they promote the formation for a continuous liquid thin film along the sidewalls. The effect on CHF varies significantly either the fluid is water or HFE-7100. For water, CHF rises up to 437%. In contrast, HFE-7100 showed a lower CHF enhancement of 86%. Such outcomes emphasise poor thermophysical properties of fluorinated fluids and the need for fluid-specific designs in thermal management systems (Zhuang et al., 2023). Also see the Table 1 in order to compare the crucial thermophysical properties of different working fluids.

Table 1 Essential thermophysical properties of different working fluids (Chang et al., 2022; Nalbandian et al., 2022; Sun et al., 2024)

Properties	Water	HFE-7100	HFO-1234yf	HFC-134a	Ethanol
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	2264.76	111.6	153.76	187.44	920.66
Thermal conductivity of liquid (W/m K)	0.6	0.069	0.066957	0.085878	-
Specific heat of liquid, 25 °C 1 ATM (J/kg K)	4181.6	1183	1343.7	1383.5	2434.6
Boiling point, 1 ATM (°C)	99.97	61	14(T _{sat})	14(T _{sat})	78
Liquid density, 25 °C (kg/m ³)	1000	1520	1130.6	1246.9	790
Kinematic viscosity of liquid (cSt)	0.89004	0.37	-	-	-
Surface tension of liquid, 25 °C (mN/m)	72	13.6	7.57	9.66	22
Vapor pressure, 25 °C (kPa)	3.17	26.9	-	-	-

Sun et al. (2024) demonstrated that working fluids with different physical properties, such as viscosity and surface tension, significantly affect bubble dynamics and flow patterns. They found that HFE7100, with its lower surface tension, promotes faster interfacial motion resulting rapid transition from bubble to slug and annular flow. High surface tension of water generates strong adhesive forces, attaching vapor bubbles to the heated wall and limiting bubble detachment. Ethanol's higher viscosity, as highlighted by both researchers, creates stronger viscous forces that facilitate bubble nucleation and accelerate bubble movement. The thermal behavior of micro-pin fins is strongly influenced by fluid properties. In a related study presented by Chang et al. (2022) on HFE-7100, its higher vapor density and lower surface tension, compared to water, were found to result in greater inertial forces, which can disrupt stability of capillary-driven liquid film under high heat flux. This underscores the need to tailor microstructures to fluid-specific characteristics for optimum heat transfer parameters. Deng et al. (2019) observed that as the heat flux and vapor qualities increased, the heat transfer

coefficient for flow boiling initially rapidly decreased at lower heat fluxes. However, at relatively high heat fluxes, the coefficients either remained almost same or slightly increased. Significant improvements in two-phase heat transfer performance were observed, with notable improvements in both ethanol and water tests. Ammonia is a particularly advantageous refrigerant for aerospace applications in comparison to conventional working fluids. The significant latent heat enables efficient heat transfer even with limited flow rates, rendering it suitable for the management of high heat loads. Furthermore, ammonia's extensive phase transition temperature range prevents freezing in low-temperature conditions, thereby enhancing its reliability in extreme environments (Huang et al., 2020). Some studies from the literature comparing pure fluids are presented in Table 2.

Table 2 Comparison of pure fluids in terms of the effect of flow boiling

Study	Working Fluids	Saturation Temperature (°C)	Mass flux (kg/m ² s)	Heat flux (W/cm ²)	Main Findings
Hong et al. (2018)	Ethanol and acetone	-	2-71	1-11	Quite similar thermophysical properties and thus heat transfer performance.
Radwan et al. (2019)	Ethanol and Novec-7000	78.4, 34	-	-	Working fluid with saturation temperature of 34°C effectively maintains the constant wall temperature at 45°C
Deng et al. (2019)	Deionized water and ethanol	100, 78	125-300	0-100	The water shows better heat transfer performance, characterized by a lower pressure drop and a more stabilised flow process.
Kærn et al. (2021)	R1234yf, R1234ze(E), R134a	30, 40	333-1260	-	R134a exhibited the highest CHF, which can be attributed to its lower latent heat compared to the other coolants.
Nalbandian et al. (2022)	HFC-134a and HFO-1234yf	14	100, 200, 400, 600	15-45	The primary factors influencing HTC are closely tied to the vapor-liquid flow patterns under different flow conditions.
Sun et al. (2024)	Water, Ethanol, HFE7100	100, 78, 61	50-330	1-40	With increasing mass flux, HTC improved significantly, showing enhancements of 121.3% for water, 33.6% for ethanol, and 55.8% for HFE7100.

Fluids with Nanoparticles

The name nanofluid was first given by Choi and Eastman (1995) in a conference text to the mixture of materials with a size less than 100 nanometres and which will behave like a molecule of the liquid in a mixture with a liquid. In particular, he thought that solid metals, which have an excellent HTC compared to conventional heat transfer fluids, would increase the heat transfer capacity by mixing them with such fluids and brought a new field of study to the literature. Nanophase particles, with their larger surface areas compared to micron-sized particles, significantly enhance heat transfer through multiple mechanisms. These mechanisms summarised by Xuan and Li (2000) as following; they increase the fluid's surface area, heat capacity, and effective thermal conductivity as well as intensifying particle interactions, turbulence, and mixing. Additionally, nanoparticle dispersion reduces the transverse temperature gradient, leading to a more uniform thermal profile and improved heat transfer efficiency. Nanoparticles significantly influence bubble dynamics during boiling by modifying both the formation of them and the frequency of bubble generation on the wall. The reduction in surface tension caused by nanoparticles results in smaller bubble size compared to pure water. Moreover, nanoparticles reduce bubble growth time, thereby mitigating the occurrence of local dry-out as bubbles depart from the surface. These combined effects enhance boiling characteristics of nanofluids, leading to a higher CHF than that of pure fluids (Wang and Wang, 2024). In their review of a study on nanofluids in microchannels, Colangelo et al. (2017), highlighted several findings, including an increase in both the HTC and the Nusselt number, as well as a reduction in thermal resistance at a fixed volume fraction. There are several studies on the effects of

nanoparticle size, mass fraction and mass flow rate on the flow boiling heat transfer characteristics. Studies conducted on nanoparticle-enhanced working fluids are presented in Table 3. Li et al. (2024) conducted numerous experiments and showed that increasing mass flow rate, nanoparticle size and mass fraction of the nanoparticles increased the average HTC of the flow, but the effect of mass fraction reached a peak point and then started to decrease the HTC. They found that the maximum coefficient was obtained at mass fraction of 0.025% for TiO₂- H₂O.

Nanoparticles are not only particles composed of a single metal, but they can also be presented as hybrid structures with different inorganic compounds. Very recent study performed by Gupta (2024) showed such hybrid nanoparticles used in a working fluid of a flow boiling process. In the study, they created the nanofluid by synthesizing the copper with zinc and oxygen. Consequently, the addition of ZnO-coated copper to the working fluid enhanced thermal conductivity and chemical stability, thereby improving flow boiling heat transfer. As demonstrated in recent study conducted by Hou et al. (2024), the additive of Al₂O₃ nanoparticles to a fluid significantly enhanced boiling performance by improving the wettability of a surface, increasing nucleation sites, and promoting bubble detachment. These effects were evident in visual analyses, where the nucleation process became more efficient. At a nanoparticle concentration of 0.01 wt%, CHF and HTC improved by up to 32% and 26%, respectively, with negligible changes in pressure drop. However, at higher concentrations, excessive nanoparticle deposition on the surface led to an increase in thermal resistance, which diminished the heat transfer benefits. These findings highlighted the need for careful optimization of nanoparticle concentrations to maximize thermal efficiency. Chen et al. (2023) reported that highly stable SiO₂ nanofluids, synthesized through precise control of inlet flow rates, had significant potential for enhancing heat transfer performance in flow boiling applications. Experimental results revealed improvements in both the CHF and HTC. These effects were seen at relatively high flow rates and nanofluid concentrations. The enhanced performance was attributed to nanoparticles improving the liquid-vapor interface by limiting bubble coalescence and increasing bubble occurrence frequency. Additionally, the deposition of nanoparticles on heated surfaces created more nucleation sites and facilitated rapid liquid replenishment, further boosting thermal efficiency. These findings highlighted the transformative impact of SiO₂ nanofluids on boiling heat transfer processes. The addition of nanoparticles to a fluid enhances wettability; however, this improvement does not directly influence the development of CHF. Instead, the enhancement of CHF is primarily attributed to the impact of the nanoporous layer formed on the surface, which mitigates thermal instabilities. This improvement is associated with the altered surface characteristics rather than the fundamental CHF mechanism itself. In the study performed by Do Nascimento et al. (2019), it was found that different sizes of the added nanoparticles only led to weak effect on CHF (within the limits of measurement uncertainty). Similar results were reported by Wang and Wang (2024). They reviewed flow boiling studies of nanofluids in microchannels. In summary, while surface wettability was improved by the addition of nanoparticles, the improvement in CHF was related to the local drying mechanism rather than surface wettability.

Table 3. The effect of nanoparticles in the flow boiling in microchannel studies

Study	Working Fluid	Size of the nanoparticle (nm)	Mass Fraction of Nanofluids (%)	Mass flux (kg/m ² s)	Heat flux (W/cm ²)	Main Findings
Balasubramanian et al. (2018)	Deionized water with Al ₂ O ₃	40-50	0.01, 0.05, 0.1	-	80	Enhanced CHF and reduced time for reaching steady state.
Do Nascimento et al. (2019)	Deionized water with Al ₂ O ₃ and SiO ₂	10, 40, 80	0.1-0.01	133-494	-	Increased wettability/wickability but its effect on the CHF was almost invisible.
Chen et al. (2023)	Deionized water and ethanol mix with SiO ₂	30-100	-	-	0-350	Simultaneously enhanced HTC and CHF (greater than 100%).
Li et al. (2024)	Water with titanium dioxide	5-30	0.01-0.1	370.9-532.2	13.84-22.05	Increasing flow boiling HTC.

Gupta (2024)	Water with ZnO coated Cu hybrid nanoparticles	-	0.025-0.1	100-900	0-220	Improved thermal conductivity and chemical stability.
Hou et al. (2024)	Deionized water with Al ₂ O ₃	57	0.01, 0.02, 0.03	-	0-400	Substantial improvements in both CHF and HTC of base liquid.

Surfactant Containing Fluids

Flow boiling is naturally quite dynamic and unstable phenomenon; such that the complexity becomes even more significant in micro-scale channels. Under such conditions, the stability of nanofluids can be compromised, resulting in the formation of deposition layers that may obstruct flow paths and reduce heat transfer efficiency. As highlighted by Rui et al. (2023), many researchers shifted their focus toward enhancing heat transfer through modifications to purely liquid-based working fluids as an alternative solution. Boiling heat transfer and bubble dynamics can be significantly influenced by the addition of surfactants to water, making them a dominant area of focus for heat transfer enhancement. A surfactant is defined as a low molecular weight chemical compound exhibiting dual characteristics, comprising both a hydrophilic (water-attracting) and a hydrophobic (water-repelling) component. Surfactants are classified into anionic, cationic, and non-ionic types based on the characteristics of their hydrophilicity. These classifications influence key characteristics such as molecular weight and the degree to which they reduce surface tension in aqueous solutions, with non-ionic surfactants typically showing the highest molecular weights and cationic surfactants exhibiting the greatest surface tension reduction. The effect of different operating conditions on the design of boiling flow systems and subsequently the effect of these factors on the operating performance are determined by some correlations (Rui et al., 2023). In this context, correlations for pressure drop and heat transfer were generally developed on pure working fluids (Al-Zaidi et al., 2019). Rui et al. (2023), on the other hand, reviewed the relevant correlations in their experimental study based on two different channel geometries with sodium dodecyl sulphate (SDS) aqueous solution. This solution increased the heat transfer and the enhancement of heat transfer by SDS was primarily attributed to its ability to reduce the formation of large vapor slugs and to promote rewetting the bottom wall of the channel (improved thermal efficiency). In a review study conducted by Acharya and Pise (2017) pure water and the additives mixed with water were considered. It was determined that the surface tension decreased significantly with increasing additive concentration, and the surface tension of the additive mixed solution also decreased with increasing temperature. Even at low concentrations, surfactants can substantially lead to decrease the surface tension of water, with the extent of this reduction depending on both the concentration and the specific type of surfactant used. Hetsroni et al. (2007) used glycoside alkyl as working fluid in their study. It was experienced that the increase in surface tension with the increase in surfactant concentration could reach a certain level and then the effect of concentration increase on surface tension was almost invisible. Understanding these effects is crucial for optimization of boiling processes in various engineering applications. A summary of the studies in the literature investigating the effect of surfactants in the flow boiling in microchannel is given in Table 4.

Cheng et al. (2007) explained the mechanism of surface tension reduction of surfactants in detail as follows; In order to take part in the process, the surfactant diffuses to the interface and during this process, the surface tension changes until it reaches a stable value called equilibrium surface tension. This process can take some time depends on the type of surfactant and how much is present in the solution. In certain scenarios of the study by Hetsroni et al. (2004), wall temperatures did not increase despite an increase in heating power per area, which could allow the development of near-isothermal heat sinks under controlled conditions.

Mohammadi et al. (2021) examined how surfactants (Tween 80 and SDS) at varying volume fractions (0.01–0.3%) affected pressure drop and heat transfer characteristics in a mini-channel. The thermal and hydraulic behavior of the flow were analyzed for Reynolds numbers ranging from 1000 to 8500 (including both laminar and turbulent flow regimes). For water/Tween 80 solutions, a gradual increase in dynamic viscosity was observed as the surfactant volume fraction rises. In contrast, water/SDS solutions exhibited an initial rise in viscosity, peaking at a volume fraction of 0.05%, followed by a gradual decrease as the volume fraction increased from 0.05% to 0.3%. Tween 80 also enhanced surface wettability by lowering the contact angle of water. Furthermore, an increase in the volume fraction of Tween 80 resulted in higher pressure drops. Notably,

at higher concentrations, Tween 80 significantly enhanced the Nusselt number compared to pure water, indicating improved heat transfer performance.

Table 4. The effect of surfactants in the flow boiling in microchannel studies

Study	Working Fluid	Concentration of the Surfactant (ppm)	Mass flux (kg/m ² s)	Heat flux (W/cm ²)	Main Findings
Hetsroni et al. (2004)	Water with Polyglycoside (APG)	-	38.3-59.6	12-42	Maximum surface temperature remains constant.
Klein et al. (2005)	Water with Alkyl Poly glycosides (APG)	0-300	39-173	1-50	There exist optimal concentration of additives for reaching maximum heat flux. An increase up to 300 ppm concentration reduces the surface tension, then the surface tension remains almost constant at an increase up to 1200 ppm.
Hetsroni et al. (2007)	Water(%48) with Alkyl (8-16) Glycoside	0-1200	5, 8.3, 18	5-25	
Huang et al. (2016)	Cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) with addition Counter-ion salt NaSal	0.16, 0.22, 0.31, 0.47 (mmol/L)	-	-	Excellent drag- reducing effect.
Wang and Li (2017)	Cetyltrimethyl ammonium chloride (CTAC) with addition of sodium salicylate (NaSal)	0-600	-	5-40	Increase in CHF, stronger pressure fluctuations compared to water, existence of ten times more small bubbles than water.
Sachi et al. (2020)	Water with surface-active ionic liquid (SAIL)	625	-	70-90	Temperature and pressure fluctuations were almost eliminated. Minimize the period of dryout.
Mohamma di et al. (2021)	Water with SDS and Tween80	0.16, 0.47 (mmol/L)	-	-	Decreasing and more uniform wall temperature.
Xanthopoul ou et al. (2023)	Water with sodium dodecyl sulfate(SDS)	100-12500	200-300	20-100	Decreasing surface tension, decreasing required energy to start boiling, Additional nucleation sites occur, bubble stacking, bubble cluster, activated bubbles can be seen.
Rui et al. (2023)	Water with sodium dodecyl sulfate(SDS)	100-800	-	4-38	Overall heat transfer enhancement up to %25.

Conclusion and Recommendations

The studies carried out on various pure fluids, nanofluids and surfactant loaded fluids provide valuable insights into their performance in flow boiling applications. This type of fluid based investigation emphasises the critical role of fluid properties, nanoparticle properties and surfactant behaviour in influencing heat transfer mechanisms, CHF and HTC.

- To improve the CHF and HTC, focusing on new types of fluids is a strong tool.
- Nanofluids, with their unique ability to improve thermal conductivity and surface properties, show great potential in improving boiling performance. The dispersion of nanoparticles increases nucleation site density, improves wettability and stabilises the liquid-vapor interface by reducing bubble collisions and increasing bubble departure frequency. Despite these advantages, challenges such as particle agglomeration, surface buildup and increased thermal resistance at higher nanoparticle concentrations can be addressed as disadvantages of nanofluids.
- Surfactant loaded fluids present unique boiling behaviours. The reasons are attributed to the ability of surfactants to modify the liquid-vapor interface, promote rewetting of heated surfaces and increase bubble dynamics. The improved wettability and suppression of dry-out regions contribute significantly to the improvement in CHF and HTC.

- The modification of fluids through the addition of nanoparticles or the use of surfactants has considerable potential for enhancing or optimization of flow boiling performance. However, the practical challenges and the sustainability are among the potential obstacles for their successful integration into industrial and commercial heat transfer systems. Therefore, the literature need new studies and further investigation.

References

- Acharya, A., Pise, A., 2017. A review on augmentation of heat transfer in boiling using surfactants/additives. *Heat Mass Transf.* 53, 1457–1477. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1905-3>
- Ali Kadhim, S., 2024. Thermodynamic and Environmental Analysis of Hydrocarbon Refrigerants as Alternatives to R134a in Domestic Refrigerator. *Int. J. Thermodyn.* 27, 10–18. <https://doi.org/10.5541/ijot.1368985>
- Al-Zaidi, A.H., Mahmoud, M.M., Karayiannis, T.G., 2019. Flow boiling of HFE-7100 in microchannels: Experimental study and comparison with correlations. *Int. J. Heat Mass Transf.* 140, 100–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.095>
- Balasubramanian, K.R., Krishnan, R.A., Suresh, S., 2018. Transient Flow Boiling Performance and Critical Heat Flux Evaluation of Al₂O₃ -Water Nanofluid in Parallel Microchannels. *J. Nanofluids* 7, 1035–1044. <https://doi.org/10.1166/jon.2018.1549>
- Camarasa, J., Crespo, A., Vilarrubí, M., Ibáñez, M., Barrau, J., 2024. A review of experimental studies on flow boiling instabilities mitigation through geometrical modifications. *Int. J. Heat Mass Transf.* 235, 126014. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126014>
- Chang, W., Luo, K., Li, W., Li, C., 2022. Enhanced flow boiling of HFE-7100 in silicon microchannels with nanowires coated micro-pin-fins. *Appl. Therm. Eng.* 216, 119064. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119064>
- Chen, H., Zhang, Y., Huang, L., Zhao, X., Ma, X., Ma, Z., Hou, J., Wei, J., Di Marco, P., Mahian, O., Hao, N., 2023. Microfluidic production of silica nanofluids for highly efficient two-phase cooling with micro pin-fins structure. *Chem. Eng. J.* 465, 142799. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142799>
- Cheng, L., Mewes, D., Luke, A., 2007. Boiling phenomena with surfactants and polymeric additives: A state-of-the-art review. *Int. J. Heat Mass Transf.* 50, 2744–2771. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.016>
- Choi, S.U.S., Eastman, J.A., 1995. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, in: ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, pp. 99–105.
- Colangelo, G., Favale, E., Milanese, M., De Risi, A., Laforgia, D., 2017. Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution. *Appl. Therm. Eng.* 127, 421–435. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.042>
- Deng, D., Chen, L., Wan, W., Fu, T., Huang, X., 2019. Flow boiling performance in pin fin- interconnected reentrant microchannels heat sink in different operational conditions. *Appl. Therm. Eng.* 150, 1260–1272. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.092>
- Do Nascimento, F.J., Moreira, T.A., Ribatski, G., 2019. Flow boiling critical heat flux of DI-water and nanofluids inside smooth and nanoporous round microchannels. *Int. J. Heat Mass Transf.* 139, 240–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.021>
- Gupta, S.K., 2024. Experimental subcooled flow boiling instability and heat transfer analysis through zinc oxide coated copper hybrid nanofluid boiling on the structured microchannels. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 197, 109691. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109691>
- Hetsroni, G., Gurevich, M., Mosyak, A., Rozenblit, R., 2007. Effect of surfactant concentration on saturated flow boiling in vertical narrow annular channels. *Int. J. Multiph. Flow* 33, 1141–1152. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.07.001>

- Hetsroni, G., Klein, D., Mosyak, A., Segal, Z., Pogrebnyak, E., 2004. Convective Boiling in Parallel Microchannels. *Microscale Thermophys. Eng.* 8, 403–421. <https://doi.org/10.1080/10893950490516965>
- Hong, S., Tang, Y., Wang, S., 2018. Investigation on critical heat flux of flow boiling in parallel microchannels with large aspect ratio: Experimental and theoretical analysis. *Int. J. Heat Mass Transf.* 127, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.110>
- Hou, J., Wu, J., Zhao, X., Ma, L., Huang, L., Qiu, Y., Li, D., Ding, Z., Chen, Z., Wei, J., Hao, N., 2024. Microfluidic flow synthesis of Al₂O₃ nanofluids for efficient phase-change boiling heat transfer enhancement of electronic devices. *Case Stud. Therm. Eng.* 58, 104458. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104458>
- Huang, C., Liu, D., Wei, J., 2016. Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow in longitudinal grooved channels. *Chem. Eng. Sci.* 152, 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.06.009>
- Huang, H., Thome, J.R., 2017. An experimental study on flow boiling pressure drop in multi-microchannel evaporators with different refrigerants. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 80, 391–407. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.030>
- Huang, Y., Yang, Q., Zhao, J., Miao, J., Shen, X., Fu, W., Wu, Q., Guo, Y., 2020. Experimental Study on Flow Boiling Heat Transfer Characteristics of Ammonia in Microchannels. *Microgravity Sci. Technol.* 32, 477–492. <https://doi.org/10.1007/s12217-020-09786-z>
- Kærn, M.R., Criscuolo, G., Meyer, K.E., Markussen, W.B., 2021. Critical heat flux characteristics of R1234yf, R1234ze(E) and R134a during saturated flow boiling in narrow high aspect ratio microchannels. *Int. J. Heat Mass Transf.* 180, 121840. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121840>
- Klein, D., Hetsroni, G., Mosyak, A., 2005. Heat transfer characteristics of water and APG surfactant solution in a micro-channel heat sink. *Int. J. Multiph. Flow* 31, 393–415. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.01.007>
- Kuan, W.K., Kandlikar, S.G., 2006. Critical Heat Flux Measurement and Model for Refrigerant-123 Under Stabilized Flow Conditions in Microchannels, in: *Heat Transfer, Volume 1*. Presented at the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME/EDC, Chicago, Illinois, USA, pp. 285–295. <https://doi.org/10.1115/IMECE2006-13310>
- Lee, H., 2022. *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*, Second Edition, 1st ed. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119686040>
- Li, J., Zhai, H., Shi, L., Tan, N., Zhang, Y., Huang, C., 2024. Experimental analysis of convective boiling heat transfer and nanoparticle deposition effect of TiO₂-H₂O nanofluids in microchannels. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 47, 102282. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102282>
- Li, W., Li, C., Wang, Z., Chen, Y., 2022. Enhanced flow boiling in microchannels integrated with supercapillary pinfin fences. *Int. J. Heat Mass Transf.* 183, 122185. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122185>
- Liang, G., Mudawar, I., 2020. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes. *Int. J. Heat Mass Transf.* 146, 118864. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118864>
- Lv, H., Ma, H., Mao, N., He, T., 2022. Boiling heat transfer mechanism of environmental-friendly refrigerants: A review. *Int. J. Refrig.* 133, 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.007>
- Markal, B., Kul, B., Aydin, O., 2023. Comparative investigation of different types of expanding micro-pin-fin heat sinks at low mass flux. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 148, 107062. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107062>
- Mohammadi, S., Hormozi, F., Rad, E.H., 2021. Effects of surfactants on thermal performance and pressure drop in mini-channels- An experimental study. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 128, 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.05.021>
- Moreira, D.C., Nascimento, V.S., Kandlikar, S.G., Ribatski, G., 2023. Flow boiling of R1336mzz(Z) in tapered microgaps with asymmetric dual-V microchannels. *Appl. Therm. Eng.* 228, 120440. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120440>

- Nalbandian, H., Yang, C.-Y., Chen, K.-T., 2022. Flow Boiling Heat Transfer of Refrigerants HFO-1234yf and HFC-134a in an Extruded Aluminum Tube with Multi-Port microchannels. *Int. J. Refrig.* 142, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.06.013>
- Parizad Benam, B., Sadaghiani, A.K., Yağcı, V., Parlak, M., Sefiane, K., Koşar, A., 2021. Review on high heat flux flow boiling of refrigerants and water for electronics cooling. *Int. J. Heat Mass Transf.* 180, 121787. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121787>
- Park, J.E., Thome, J.R., 2010. Critical heat flux in multi-microchannel copper elements with low pressure refrigerants. *Int. J. Heat Mass Transf.* 53, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.047>
- Radwan, A., Ookawara, S., Ahmed, M., 2019. Thermal management of concentrator photovoltaic systems using two-phase flow boiling in double-layer microchannel heat sinks. *Appl. Energy* 241, 404–419. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.017>
- Rui, Z., Sun, H., Ma, J., Peng, H., 2023. Experimental study and prediction on the thermal management performance of SDS aqueous solution based microchannel flow boiling system. *Energy* 282, 128747. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128747>
- Sachi, S., Zaitsev, D.V., Raj, R., 2020. Effect of ionic liquid additives on temperature and pressure fluctuations during water flow boiling in microchannels. *J. Phys. Conf. Ser.* 1677, 012093. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1677/1/012093>
- Sun, Y., Huang, A., Lu, J., Jiang, Y., Wang, C., 2024. Influence of the thermophysical properties of working liquids on heat transfer performance during flow boiling in microchannels. *Int. J. Multiph. Flow* 177, 104856. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104856>
- Wang, J., Li, F.-C., 2017. Experimental study on the characteristics of CHF and pressure fluctuations of surfactant solution flow boiling. *Int. J. Heat Mass Transf.* 115, 1004–1010. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.113>
- Wang, M., Wang, J., 2024. Flow boiling of nanofluids in microchannel heat exchangers: A critical review. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 55, 102930. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102930>
- Xanthopoulou, Y., Vlachou, M.C., Kostoglou, M., Karapantsios, T.D., 2023. Experimental study on subcooled flow boiling heat transfer of water-SDS mixtures in a vertical macrochannel. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 145, 110902. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.110902>
- Xuan, Y., Li, Q., 2000. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *Int. J. Heat Fluid Flow* 21, 58–64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- Zhang, Z., Jia, L., Dang, C., 2024. A Review on Flow Boiling of the Fluid with Lower Boiling Point in Micro-Channels. *J. Therm. Sci.* 33, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1885-9>
- Zhuang, X., Xie, Y., Li, X., Yue, S., Wang, Haitao, Wang, Handong, Yu, P., 2023. Experimental investigation on flow boiling of HFE-7100 in a microchannel with pin fin array. *Appl. Therm. Eng.* 225, 120180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120180>

**THE ROLE OF SURFACE WETTABILITY FOR FLOW BOILING IN MICROCHANNELS****Fatih ATCI**

Lecturer, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-9597-7743

Burak MARKAL

Assoc. Prof., Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon-Türkiye, ORCID: 0000-0001-6356-3503

Özet

Elektronik cihazlarda oluşan atık ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması, bu cihazların kullanım ömrünü uzatmak ve yüksek performansta çalışmasını sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, mikrokanallarda kaynamalı akışın gerçekleştiği ısı alıcıların kullanımı, yüksek soğutma potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Mikrokanallı ısı alıcılarda kaynamalı akış hem soğutucu akışkanın hem de ısı alıcı yüzeyinin özelliklerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Özellikle, mikro ölçekte, akışkanın yüzey gerilmesi ve buna bağlı olarak akışkanın yüzeyi ıslatıp ıslatmama durumu kaynamalı akış karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha açık bir ifade ile, yüzey ıslanabilirliği, kaynamalı akışta kabarcık oluşumu, kabarcık hareketi ve akış deseni gibi unsurları doğrudan etkileyerek, ısı transfer verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunabilir. Bu nedenle, mikrokanallı ısı alıcı yüzeylerinin çeşitli yöntemlerle modifiye edilip yüzey ıslanabilirlik seviyesinin düzenlenmesi ve bu yüzeylerdeki kaynamalı akış karakteristiklerinin incelenmesi, ısı transfer performansının iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, son yıllarda birçok araştırmacı hidrofobik (suyu iten), hidrofilik (suyu çeken) veya karma (her iki özelliği bir arada bulunduran) yüzey özelliklerine sahip ısı alıcılarda kaynamalı akış üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yürütmektedir. Farklı ıslanabilirlik koşulları altında, ısı alıcılarda gerçekleşen kaynamalı akışın fiziksel mekanizmasını anlamak, yüksek soğutma performansı sağlayan ısı alıcı yüzeylerinin geliştirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada, literatürde yüzey ıslanabilirliğinin mikrokanallarda kaynamalı akış karakteristikleri üzerindeki etkisini ele alan çalışmaların kapsamlı bir incelemesi sunulmaktadır. Çalışma içeriği üç ana başlık altında düzenlenmiştir: (a) yüzey ıslanabilirliğinin temel kavramları ve teorik modelleri, (b) mikrokanallarda yüzey ıslanabilirliğini kontrol etme yöntemleri ve (c) yüzey ıslanabilirliğinin mikrokanallarda kaynamalı akış karakteristikleri üzerindeki etkisi. Yapılan bu derleme çalışmasında, mikrokanallarda yüzey ıslanabilirliği ile kaynamalı akış arasındaki ilişki hakkında ileriki çalışmalara yönelik yol gösterici bilgiler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: yüzey ıslanabilirliği, ısı transferi, kaynamalı akış, mikrokanal.

Abstract

Effective removal of waste heat generated in electronic devices is of critical importance to extend the lifetime of these devices and ensure that they operate at high performance. In this context, heat sinks with flow boiling in microchannels attract great attention due to their high cooling potential. In microchannel heat sinks, the flow boiling strongly depends on the properties of both the coolant and the heat sink surface. Especially at the micro scale, the surface tension of the fluid and, accordingly, whether the fluid wets the surface or not has an important effect on the flow boiling characteristics. More precisely, surface wettability can play a role in improving heat transfer efficiency by directly influencing factors such as bubble formation, bubble motion, and flow pattern in flow boiling. Therefore, modifying microchannel heat sink surfaces using various methods, regulating surface wettability, and investigating flow boiling characteristics on these surfaces are crucial for enhancing heat transfer performance. In this context, in recent years, many researchers have conducted experimental and numerical studies on flow boiling in heat sinks with hydrophobic, hydrophilic, or mixed surface properties. Understanding the physical mechanism of flow boiling in heat sinks under different wettability conditions is crucial for the development of heat sink surfaces that provide high cooling performance. In this study, a comprehensive investigation of studies considering the influence of surface wettability on flow boiling characteristics in microchannels is presented. The content of this paper is organized

based on three headings: (a) basics and theoretical models of surface wettability, (b) methods for controlling the surface wettability of microchannels, and (c) the influence of surface wettability on flow boiling characteristics in microchannels. This paper provides useful information about the relation between surface wettability and flow boiling in the microscale, which guides future studies focusing on relevant literature.

Keywords: surface wettability, heat transfer, flow boiling, microchannel.

Introduction

The miniaturization of electronic devices is a key driving force of modern technology, enabled by advances in micro- and nanoscale manufacturing. These developments allow more transistors to be packed into smaller spaces, making devices more compact and powerful. However, this also leads to increased heat generation in confined areas, which can affect a device's stability, performance, and lifespan. Advanced cooling systems are therefore essential to effectively dissipate this waste heat from the relevant components for ensuring reliable and efficient electronics. At this point, usage of flow boiling in heat sinks with microchannels for cooling of electronic systems is received significant attention. The reasons of this attention stem from their compact structures, high heat transfer coefficients, ability to maintain relatively uniform surface temperatures, and capability to operate with low fluid flow rates.

The flow boiling phenomenon involves complex characteristics and strongly depends on the properties of the fluid and heat transfer surface. Particularly, in microscale channels, surface tension plays an important role, and thus, wettability of the surface becomes a critical parameter for flow boiling (Choi et al., 2011; Kandlikar, 2010; Zhou et al., 2017; Ahmadi et al., 2020; Vontas et al., 2021). Importance of surface wettability can be explained based on the changes caused by it in the flow. It affects bubble dynamics, nucleation site number and flow patterns. In brief, it influences thermal and hydraulic performance (Ahmadi et al., 2020; Du & Hu, 2023). In last years, it is clear that there is an increasing interest in studies investigating the effect of surface wettability on flow boiling and heat transfer processes in microchannels. However, there are still relatively few studies in the literature. Further studies are needed to gain an in-depth understanding of influence of surface wettability on flow boiling in microscale channels.

In this review study, basics and theoretical models of surface wettability is initially provided to aid in a better understanding of the topic, along with methods for controlling microchannel heat sink's surface wettability. Following this, a detailed summary of existing studies examining role of surface wettability in flow boiling in microchannels is presented. Each section is presented below under separated headings.

Basics And Theoretical Models of Surface Wettability

Wettability describes how a liquid droplet spreads or wets a solid surface. Contact angle is a measure for this phenomenon, and it reflects interaction between surface and liquid. When a droplet contacts with a solid surface, it either spreads out or keeps its shape. This behaviour is determined by measuring contact angle (CA) at the point where the liquid, vapor, and solid phases meet (Figure 1a).

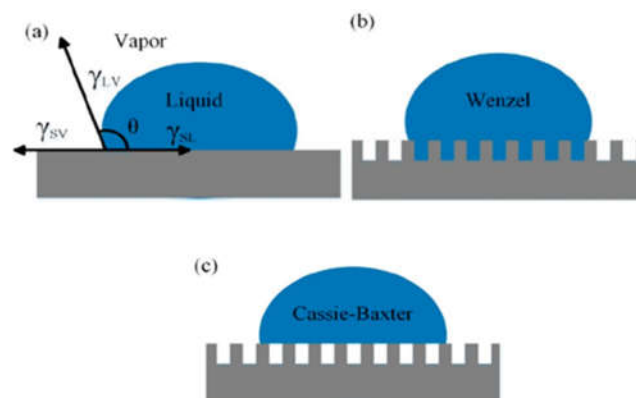


Figure 1. Schematic illustration of a water droplet interacting with both rough and smooth solid surfaces, demonstrating different wetting scenarios (a) Young's model, (b) Wenzel state, (c) Cassie-Baxter state (Iqbal et al., 2019).

A liquid droplet's contact angle (based on the surface) is directly related to morphology and chemical properties of the solid surface (Ellinas et al., 2021). For a chemically homogeneous, flat, smooth solid surfaces, at the thermodynamic equilibrium condition, contact angle is determined by the following equation based on Young's model (Figure 1a) (Nyankson et al., 2022). Here, θ , denotes the contact angle, and γ_{vl} , γ_{sv} and γ_{sl} refer to the vapor-liquid, solid-vapor, and solid-liquid interfacial tensions, respectively (Ahmad et al., 2018).

$$\gamma_{vl} \cos\theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (1)$$

Young's model is applicable for ideally flat and smooth solid surfaces. However, in practical applications, solid surfaces fabricated by using various manufacturing techniques have a certain roughness value. Therefore, two important models for understanding the wettability behaviour of rough solid surfaces have been developed: Wenzel model and Cassie-Boxter model. In the Wenzel case (Figure 1c), the liquid drop penetrates between the micro-nano voids in the rough surface and fills all the roughness completely. The liquid droplet adheres to the surface, and it becomes difficult to roll on the solid surface. In the Cassie-Boxter case (Figure 1c), there are small air packets between the micro-nano voids in the rough solid surface. These air packets prevent the liquid droplet from completely penetrating the surface, repel the liquid and keep the liquid droplet suspended on the micro-nano structure. This facilitates the rolling of the liquid droplet on the surface. The Cassie-Baxter state of a solid surface may transition into the Wenzel state. In this transformation, surface roughness and surface chemistry play a crucial role.

Wenzel determined the contact angle of the liquid on rough surfaces. In this model, the roughness factor is added to Young's equation (Eq. (2)) (Wenzel, 1936).

$$\cos\theta_r = r \cos\theta \quad (2)$$

Here, on rough surfaces, contact angle of the liquid droplet is denoted by θ_r , and the roughness factor is presented by r . The roughness factor, r , is determined by dividing actual surface area (rough surface) that the liquid contacts, A_a , by the projected surface area (smooth surface), A_p . Moreover, the mathematical expression of the model developed by Cassie-Baxter is given in the following equation. Here, θ_1 and θ_2 represent the contact angles of the first (solid) and second phase (air), while f_1 and f_2 represent the surface area fractions of the first and second phases, respectively (Cassie & Baxter, 1944).

$$\cos\theta_r = f_1 \cos\theta_1 + f_2 \cos\theta_2 \quad (3)$$

In the literature, the classification of surface wettability is generally based on water static contact angle (WSCA) measurements. According to these measurements with water, surfaces are classified into four distinct categories. (1) hydrophobic (HPo; contact angle between 90° and 150°), (2) hydrophilic (HPi; contact angle between 10° and 90°), (3) superhydrophobic (SHPo; contact angle greater than 150°), and (4) superhydrophilic (SHPi; contact angle less than 10°) (Iqbal et al., 2019).

Methods For Controlling Microchannel Heat Sink's Surface Wettability

In recent years, the advancement of materials science and surface modification technologies has led to a growing interest in the fabrication of hydrophilic, hydrophobic, and mixed- wettability surfaces. Surface modification methods can be broadly classified into two categories. The first category, polarized surface wettability, involves increasing the surface roughness to enhance hydrophilicity or hydrophobicity. The secondary category is that of modified surface wettability, which involves the modification of the surface's chemical properties. (Hu et al. 2024). Based on these two approaches, there are various methods for preparing different surface wettability, such as coating, etching, templating, layer-by-layer assembly, and sol-gel methods etc. This section reviews the surface treatment methods used in the studies that examine role of surface wettability for flow boiling in micro-scale. Table 1 [also](#) categorizes each study based on the heat sink material, surface treatment method, surface type, and the measured contact angle achieved.

Choi et al. (2011) used micro electrical mechanical system (MEMS) techniques to create a microchannel (hydraulic diameter: 500 μm) made from photosensitive glass. The untreated photosensitive glass is naturally

hydrophilic. To create a hydrophobic microchannel heat sink's (MCHS) surface, they applied the dip-coating method to coat the hydrophilic microchannel with octadecyltrichlorosilane (OTS). In order to characterize surface wettability, the researchers employed the sessile drop method utilizing deionized water for measurement apparent contact angle of the surfaces. It was observed that the contact angles for uncoated and coated photosensitive glasses were approximately 25° and 105° , respectively. Liu et al. (2011) also, employed MEMS techniques to develop silicon microchannels (105 μm hydraulic diameter). The silicon MCHS surface was hydrophilic ($\theta = 36^\circ$). To enhance hydrophobicity, they applied a thin coating of perfluorodecyltrichlorosilane (FDTS) using chemical vapor deposition (CVD) method, resulting in a hydrophobic surface (contact angle of around 103°). For super-hydrophilic surface, to fabricate silicon nanowire arrays, they utilized a vapor–liquid–solid (VLS) growth process, achieving a contact angle near 0° . Phan et al. (2012) fabricated microchannels made from Pyrex substrate. The microchannels had rectangular geometry with length, width and height dimensions of 180 mm, 0.5 mm and 5 mm, respectively. To investigate the impact of surface wettability, they developed four distinct surface types using physical and chemical vapor deposition techniques. Nanoparticles were deposited through patterned masks to create surfaces with different compositions: a silicon oxide (SiO_x) layer, a titanium (Ti) layer, a diamond-like carbon (DLC) layer, and a carbon-doped silicon oxide (SiOC) layer. These surfaces demonstrated varying contact angles with 26° , 49° , 63° , and 103° , respectively. Zhou et al. (2017) prepared there rectangular microchannels made from silicon with varying surface treatments. The bare silicon displayed natural hydrophilicity, with a contact angle of approximately $65^\circ \pm 3^\circ$. To achieve super-hydrophilicity, the researchers employed plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) method, wherein N_2O was reacted with silane, resulting in the deposition of nanoscale silicon dioxide particles. This treatment enhanced the hydrophilicity significantly, yielding contact angles of around $50^\circ \pm 3^\circ$ for a 1000 nm silicon dioxide layer and less than 5° for a 100 nm layer. Wang et al. (2019) utilized plasma dry etching and photolithography methods to fabricate microchannel with mixed wetting-surfaces. On a SiO_2 hydrophilic surface, hydrophobic square islands made of Teflon were patterned with dimensions of 50 μm and a pitch distance of 100 μm . SO_2 hydrophilic regions exhibited a contact angle of 43.32° , while the Teflon hydrophobic islands had a contact angle of 123.9° . In another study, Ahmadi et al. (2020) used a structured manufacturing process to create mixed wettability surfaces on silicon thermal oxide wafers and aimed to investigate influence of wettability gradients on flow boiling within high aspect ratio microchannels. To achieve the desired wettability patterns, they applied lift-off technique: For 30 seconds at 4000 rpm, AZ 4562 photoresist was spin-coated onto wafer, then soft-baked. The resist was exposed to UV light through photomasks to define specific hydrophobic and hydrophilic regions on the wafer. Following patterning, a 200 nm-thick layer of Al_2O_3 was deposited via e-beam evaporation, imparting hydrophobic properties to designated regions. The lift-off process removed excess material, leaving distinct hydrophobic regions on the silicon oxide substrate. The completed surface design consisted of five regions: a fully hydrophobic Al_2O_3 region, three mixed wettability configurations with varying hydrophobicity ratios (A^*) and a fully hydrophilic SiO_2 region. Contact angle measurements confirmed hydrophilic (SiO_2) and hydrophobic (Al_2O_3) properties with values of 57° and 87° , respectively. Lin et al. (2021) created a superhydrophobic surface with micropores ranging from 1 to 5 μm on copper single rectangular microchannel, with dimensions of 0.50 mm in height and 5 mm in width. The microporous structure was developed using electroless plating. The structured copper surface exhibited a contact angle over 150° , indicating super hydrophobicity in the Cassie-Baxter state. In contrast, an unmodified copper surface with inherent hydrophilic properties displayed a contact angle of approximately 75° . Zhou et al. (2021) fabricated three aluminium microchannels with identical dimensions (0.6 mm x 78 mm x 1.6 mm) using electro discharge machining (EDM). The blank, untreated surface obtained through EDM exhibited a naturally hydrophilic property ($\theta = 70^\circ$). To further enhance hydrophilicity, they applied a chemical etching method. Thus, they prepared three distinct surface types for the microchannels: an untreated one ($\theta = 70^\circ$), a super-hydrophilic one ($\theta = 0^\circ$) and a hydrophilic one ($\theta = 43^\circ$). Additionally, they used scanning electron microscopy (SEM) to analyse morphology of surface for each microchannel. While the unmodified surface was flat and smooth, the super hydrophilic surface had a rough structure containing a large number of active micro-nano cavities. Tan et al. (2023) utilized chemical etching method to fabricate gradient wetting surfaces on the microchannel. The microchannel was made from copper and had a hydraulic diameter of 400 μm . Unmodified copper microchannel surface initially displayed a contact angle of approximately 92.6° , indicating its natural hydrophobicity. To achieve superhydrophilicity, the copper surface was placed in an aqueous type of solution including 0.05 M ammonium persulfate and 1.0 M sodium hydroxide for 20 minutes, producing a nanostructured surface with a contact angle below 1° . For the superhydrophobic surface, a copper having the characteristic of superhydrophilic was further treated in an ethanol solution with 1 wt% fluorosilane for 1 hour, forming a self-assembled monolayer that increased the

contact angle to 168.1°. To achieve a gradient wettability surface, they masked the central 8 mm of the channel with PTFE tape, creating distinct superhydrophobic, hydrophobic and super hydrophilic regions along the flow path. Ahmadi et al. 2024 fabricated silicon-based microchannels (1 mm x 50 mm x 15 mm) with superhydrophilic, superhydrophobic, and mixed wettability surfaces. They used laser texturing to create a super hydrophilic based on a silicon substrate. Superhydrophobic surfaces were then introduced using a wet chemical etching process, providing a stable coating with strong adhesion. Before coating, the silicon substrates treated O₂ plasma to generate hydroxyl groups, facilitating effective bonding. The surfaces were subsequently dip-coated in a 2% solution of methyl trichlorosilane (MTS) in toluene, then for 15 minutes, washed by toluene and annealed at 80°C to complete the process. For the biphilic surfaces, they selectively masked the superhydrophobic substrate with aluminium foil, allowing O₂ plasma treatment on only one-third or two-thirds of the surface to create mixed wettability regions. They determined the contact angle by sessile drop method, and they found that the super hydrophilic areas displayed a contact angle of 8°, while the superhydrophobic areas showed a contact angle of 160°. They also used scanning electron microscopy (SEM) to characterize the morphology of the surface and determine its chemical composition.

Table 1. Summary of the studies: heat sink material, surface treatment method, surface type, and measured contact angle.

Reference	Heat sink Material	Surface treatment Method	Surface Type	Measured contact angle
Choi et al. (2011)	Photosensitive glass	Dip Coating	Hydrophobic	105°
Liu et al. (2011)	Silicone	Chemical Vapor Deposition (CVD)	Hydrophobic	103°
Pan et al. 2012	Pyrex	Physical and Chemical Vapor Deposition (PVD and CVD)	Hydrophilic and hydrophobic	26°,49°,63°,104°
Zhou et al. (2017)	Silicone	Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD)	Hydrophilic and Super-hydrophilic	50° and 5°
Wang et al. 2019	Silicone	Plasma Dry Etching and Photolithography	Mixed Wettability: the combination of hydrophilic and hydrophobic surfaces	43.32° and 123.9°
Lin et al. (2021)	Copper	Electroless Plating	Superhydrophobic	150°
Zhou et al. (2021)	Aluminium	Chemical Etching	Super hydrophilic and hydrophilic	0°,43°
Ahmadi et al. (2020)	Silicone	Lift off technique with e-beam evaporation	Mixed Wettability: the combination of hydrophilic and hydrophobic surfaces	57°,87°
Tan et al. (2023)	Copper	Chemical Etching and Dip Coating	Mixed Wettability: the combination of superhydrophobic, hydrophobic and super hydrophilic surfaces	1°, 92.6°, 168.1°
Ahmadi et al. (2024)	Silicone	Laser Etching, O ₂ plasma treatment, Dip coating	Mixed Wettability: the combination of superhydrophobic and super hydrophilic surfaces	8°, 160°

ROLE OF SURFACE WETTABILITY IN FLOW BOILING CHARACTERISTICS

This section evaluates effects of wettability of surface on flow boiling characteristics in microchannels. Based on the surface wettability modification methods described in the previous section, many researchers have produced modified surfaces to investigate how surface wettability influences flow boiling characteristics in micro-scale channels. In these studies, microchannel surfaces have been developed either hydrophilic, hydrophobic, super-hydrophilic, and superhydrophobic, or designs combining these surfaces in various configurations and tested. In this context, a detailed review of the studies in the literature is presented under two subheadings: (a) Homogeneous wetting-surface, and (b) heterogeneous wetting-surface. Homogeneous wetting-surface describes a microchannel heat sink surface that exhibits a single wettability characteristic (HPi, HPo, SHPo, or SHPi). In contrast, heterogeneous wetting surface refers to a microchannel surface with multiple wettability regions formed by combining these characteristics. For flow boiling in microchannel, Table 2 also summarize the related studies investigating the influence of surface wettability.

Homogeneous Wetting-Surfaces

Choi et al. (2011) performed tests for flow boiling with water in microchannels. One of the surfaces of the microchannels was hydrophobic and the other was hydrophilic. The results demonstrated that the hydrophobic surface exhibited superior heat transfer coefficient, pressure drop, and bubble generation characteristics when compared to the hydrophilic alternative. This enhancement was primarily attributed to the increase in the density of nucleation sites and improved movement of the liquid film for the hydrophobic channel. In contrast, the pressure drops in the hydrophobic microchannel were higher, due to the unstable motion of both the bubbles and liquid film. It was emphasized that wettability represents a pivotal parameter that exerts a considerable influence on the behavior of two-phase flow and the formation of flow patterns. Additionally, they noted that nucleate boiling is a primary thermal mechanism for the lower-quality region, while for higher vapor qualities, it transitions to thin-film evaporation. Liu et al. (2011) carried out experimental investigations in microchannels ($105 \times 1000 \times 30000 \mu\text{m}$.) with varying wettability characteristics: hydrophobic, hydrophilic, and super-hydrophilic. They conducted the experiments under different heat flux ($230\text{--}354.9 \text{ kW/m}^2$) and mass flux ($50\text{--}583 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) conditions. Their results revealed that the flow boiling patterns were significantly influenced by the surface wettability. Specifically, for hydrophilic surfaces, cyclic flow, which causes temperature oscillations, was observed. In contrast, hydrophobic surfaces required higher heat fluxes for onset of boiling, which led to superheating of the liquid phase before bubble nucleation, resulting in faster bubble growth. On super-hydrophilic surfaces, bubble nucleation was easier, and a higher number of bubbles formed compared to the other surfaces. Their remarks reveal that wettability of a surface is a crucial factor for formation, growth, and merging of bubbles, which significantly influences the flow boiling. To examine the role of surface wettability for flow boiling in micro-scale channels, Phan et al. (2012) fabricated four different microchannel heat sink's surfaces that have hydrophilic or hydrophobic characteristics within varying contact angles (CA: $26^\circ, 49^\circ, 63^\circ, 104^\circ$). They performed experiments with water at atmospheric pressure. Their results showed that an augmentation in the contact angle resulted in a reduction in the superheat required for boiling inception. However, for the hydrophobic surface (CA: 104°), they observed that nucleate boiling took place when the liquid temperature was below the saturation temperature. They explained this phenomenon through an extensive quantity of gas confined within surface cavities. For the surface with the highest wettability (CA: 26°), they noted the necessity of a high superheat to trigger bubble nucleation. Due to the surface's high wettability, capillary action became dominant. Consequently, despite increased heat flux and vapor quality, the liquid layer level remained almost unchanged, resulting in a relatively constant heat transfer coefficient. In a study conducted by Zhou et al. (2017), an experimental investigation was conducted to investigate the effect of surface wettability on flow boiling in rectangular microchannels with a high aspect ratio. The surface of the microchannels was super hydrophilic (CA: $<5^\circ$), hydrophilic (CA: 50°), and untreated (CA: 65°). They preferred water (deionized) as working fluid. In their study, they performed the experiments with wall heat fluxes between 4 and 20 W/cm^2 , mass fluxes ranging from 120 to $360 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, and inlet vapor qualities varying from 0.03 to 0.1 . Their flow visualization results showed that under high heat flux and low mass flux conditions, local drying occurs on the untreated surface, which adversely affects the performance of heat transfer. In contrast, the super-hydrophilic surface did not exhibit dry out under identical conditions. Additionally, they noted that an increase in inlet vapor quality resulted in significant heat transfer deterioration on the hydrophilic surface, whereas super-hydrophilic surface maintained a stable heat transfer coefficient without an increase in pressure drop, outperforming the untreated surface. Lin et al. (2021) investigated the

hydraulic and thermal performance of superhydrophobic and hydrophilic microchannel surfaces in subcooled flow boiling conditions. The superhydrophobic surface, designed with microscopic pores (1–5 μm), was compared with the unmodified copper surface, which is hydrophilic. In their study, the researchers employed deionized water as the working fluid, and they conducted experiments under different heat flux (4 to 40 W/cm^2) and mass flux (200 to 500 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) conditions. They observed that the superhydrophobic surface exhibited earlier onset of nucleate boiling (ONB), lower required superheat, and up to 74.84% enhancement in heat transfer efficiency compared with hydrophilic one. The observed enhancement was attributed to three primary factors: the earlier onset of nucleate boiling, an increased frequency of bubble nucleation, and the enhanced boiling process on the superhydrophobic surface. Additionally, at low heat fluxes, the porous superhydrophobic surface experienced a higher pressure drop due to earlier boiling inception and increased nucleation. However, at high heat fluxes, the pressure drop on the bare copper surface surpassed that of the modified surface due to the expansion of elongated bubbles towards the upstream flow. Zhou et al. (2021) examined influence of surface wettability on super hydrophilic microchannels with flow boiling at various conditions: (CA: 0°), hydrophilic (CA: 43°), and untreated (CA: 70°) surfaces. They used R-134a as a coolant. Their remarks reveal that the average heat transfer coefficient was higher for super-hydrophilic (65%) and hydrophilic (300%) surfaces compared to untreated surfaces, with difference becoming more clear with an increase in mass fluxes. The improved performance of the super-hydrophilic surface was ascribed to its increased roughness and the higher density of active nucleation sites, which led to a reduced bubble departure diameter and a higher rate of bubble formation. This facilitated to improved flow and heat transfer characteristics. Additionally, they observed that the dry-out phenomenon did not occur on super-hydrophilic surfaces due to their excellent re-wettability.

Heterogeneous Wetting-Surfaces

Wang et al. (2019) investigated impact of heterogeneous wettability on flow boiling through experiments using two microchannels of identical dimensions. One channel was entirely hydrophilic, while the other featured small square hydrophobic islands (50 μm x 50 μm) on a hydrophilic surface. Flow boiling tests were conducted with water under varying heat fluxes (2.56–78.61 W/cm^2) and mass fluxes (103–203 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$). The results showed that the patterned microchannel outperformed the fully hydrophilic one, achieving a 22% higher heat transfer coefficient (HTC). This improvement is attributed to enhanced nucleation on the hydrophobic regions, leading to greater bubble mobility and longer triple contact lines. An analytical model was also developed, revealing that bubble detachment forces are lower on wettability-patterned surfaces compared to uniform hydrophobic surfaces. Ahmadi et al. (2020) presented an experimental study in which the effects of mixed wettability surfaces on flow boiling in microchannels were investigated under various heat fluxes (5–40 W/cm^2) and mass fluxes (40, 80, 120 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$). They also visualized the flow to analyse the behavior of flow boiling regimes. Their findings revealed that biphilic (mixed wettability) surfaces achieved up to a 56.7% rise in heat transfer coefficient against hydrophobic surface. They identified that the breakup of vapor on biphilic surfaces plays a key role in improving flow boiling performance. Additionally, they observed that the length of the bubbly flow regime was diminished, and the slug flow regime was extended by the biphilic surfaces, which contributed to an increase in thermal efficiency. Tan et al. (2023) developed a bionic gradient wettability surface to mitigate instabilities caused by intense boiling in parallel microchannels. They conducted experiments with water in microchannel featuring superhydrophobic (inlet), untreated section in the middle, and super-hydrophilic (outlet) surfaces and they visualized the flow boiling behaviour. Their findings indicated that the superhydrophobic surface and gradient transitions suppressed reverse flow and promoted churn flow, while the super-hydrophilic surface improved liquid supply and vapor evacuation. Additionally, they reported that the gradient design prevented partial dry-out and reduced pressure drop increases. The bionic surface demonstrated up to a 50.1% rise in average heat transfer coefficient against the untreated surface. To examine influence of mixed wettability surfaces on flow boiling in microchannels, Ahmadi et al. (2024) evaluated four types of surfaces: superhydrophobic (S2), super-hydrophilic (S1), one-third superhydrophobic (S3), and two-thirds superhydrophobic (S4). They carried out the experiments using water as the working fluid at mass fluxes of 103 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ under system pressures of 68 kPa, 101 kPa and 48 kPa, with heat fluxes ranging from 2.3 W/cm^2 to 23.0 W/cm^2 . Their remarks showed that mixed-wettability surfaces (S4 and S3) significantly rised thermal performance by extending the regime of bubbly/slug flow for a wide range of heat fluxes. At low heat fluxes, the superhydrophobic regions facilitated bubble nucleation by reducing the energy requirements, while the superhydrophilic regions expanded the evaporating liquid film, effectively preventing dry spot formation. For

high heat fluxes (up to 23.0 W/cm²), the surface with one-third superhydrophobic area (S3) achieved a 28% higher heat transfer coefficient as compared with the superhydrophilic surface (S1) at a system pressure of 48 kPa. Their results highlight the advantages of mixed-wettability configurations in optimizing heat transfer efficiency under subatmospheric boiling conditions, demonstrating their potential for enhancing thermal management in microchannel systems.

Table 2. Summary of related studies investigating the influence of surface wettability for flow boiling in microchannel.

Reference	Method of Study	Working Fluid	Surface Characteristic of Heat Sink	General Remarks
Choi et al. (2011)	Experimental	Deionized water	Homogenous HPi and HPo wetting surfaces. (CA: 25°, 105°)	HPo microchannel exhibited higher heat transfer coefficients, pressure drops, and bubble generation rates compared to HPi one.
Liu et al. (2011)	Experimental	Deionized water	Homogenous HPo, HPi and SHPi wetting surfaces (CA: 103°, 36°, 0°)	For the SHPi surfaces, bubble nucleation was easier, and a higher number of bubbles formed compared to the other surfaces. The wettability of a surface plays a crucial role in bubble nucleation, growth, and coalescence, which significantly influences the flow boiling.
Phan et al. (2012)	Experimental	Deionized water	Homogenous HPo and HPi wetting surfaces within varying contact angles (CA: 26°, 49°, 63°, 104°)	Increase in contact angles caused decrease in superheat temperature. When the surface is highly wetted, the capillary action become dominant.
Zhou et al. 2017	Experimental	Deionized water	Homogenous SHPi, HPi and untreated surfaces. (CA: <5°, 50°, 65°)	Under low mass flux and high heat flux conditions, local drying occurs on the unmodified surface, which adversely affects the performance of heat transfer. In contrast, the SHPi surface did not exhibit dry-out under identical conditions. For the hydrophilic surface, an increase in inlet vapor quality resulted in significant heat transfer deterioration, in contrast the SHPi surface maintained a stable HTC without an increase in pressure drop, outperforming the untreated surface.
Wang et al. 2019	Experimental		Heterogeneous wetting-surface: The patterned small square (50 µm x 50 µm) the HPo islands, on the HPi surfaces. (CA: 43.32°, 123.9°)	The patterned microchannel outperformed the fully hydrophilic one, achieving a 22% higher heat transfer coefficient (HTC). HPo regions, enhanced nucleation leading to greater bubble mobility and longer triple contact lines. Bubble detachment forces are lower on wettability-patterned surfaces compared to uniform HPi surface.
Ahmadi et al. (2020)	Experimental	Deionized water	Heterogenous/Bifilic/mixed wetting-surface: the combination of the HPo and HPi surfaces. (CA: 87°, 57°)	Bifilic surfaces increased the HTC up to 56.7%, reduced the length of bubbly flow regime and extending the slug flow regime compared to the HPo one.
Zhou et al. (2021)	Experimental	R-134a	Homogenous SHPi, HPi and untreated wetting surfaces. (CA: 0°, 43°, 70°)	Average heat transfer coefficient (HTC) is 85% higher for SHPi surface compared to untreated surface. The dry-out phenomenon did not occur on SHPi surface due to their excellent re-wettability.
Lin et al. (2021)	Experimental	Deionized water	Homogenous SHPo and HPi (untreated) wetting surfaces. (CA: 150°, 75°)	The SHPo surface exhibited earlier onset of nucleate boiling (ONB), lower required superheat, and up to 74.84% enhancement

				in heat transfer coefficient (HTC) compared to the HPi surface.
Tan et al. (2023)	Experimental	Deionized water	Heterogeneous wetting-surface: The combination of the SHPo, unmodified and SHPi surfaces. (CA: 92.6°, 168.1° and <1°)	The heterogeneous wetting surface exhibited up to a 50.1% enhancement in the average heat transfer coefficient (HTC) compared to the untreated surface. The SHPo surface and gradient transitions suppressed reverse flow and promoted churn flow, while the SHPi surface improved liquid supply and vapor evacuation.
Ahmadi et al. (2024)	Experimental	Deionized water	Heterogeneous wetting-surface: The combination of the SHPo, and SHPi surfaces. (CA: 92.6°, 168.1° and <1°)	Heterogeneous wetting-surface improved heat transfer performance up to 28% against SHPi surface under high heat flux conditions during subatmospheric boiling. The surfaces with mixed wettability enhance heat transfer by preventing the formation of dry spots and maintaining an efficient slug flow regime even at higher heat fluxes.

Conclusion and Recommendations

In this review study, the studies investigating the role of surface wettability for flow boiling in microchannels was comprehensively investigated. Providing insights surface wettability basics and theoretical models of surface wettability, modification methods, and their influences on flow boiling characteristics. The study highlighted several findings and proposed directions for future research.

- Generally, researchers have focused on homogeneously wettable surfaces such as hydrophilic hydrophobic, superhydrophobic and super hydrophilic, but interest in mixed/ heterogeneous wetting surfaces has increased in recent years.
- For surface of a microchannel, wettability is controlled through various methods such as chemical vapor deposition, chemical etching, laser etching, physical vapor deposition, plasma etching, etc. but, generally the coating methods being the most used.
- There exists a notable gap in the understanding of the stability and durability of surfaces produced through various modification techniques. This information is essential for translating laboratory-scale research outcomes into practical applications. Thus, future research should focus on this.
- Surface wettability significantly influence the bubble nucleation, growth, and detachment during flow boiling in microchannel.
- Hydrophobic surfaces enhance bubble dynamics and increase heat transfer efficiency by promoting active nucleation sites.
- Super-hydrophilic surfaces demonstrate superior re-wettability, preventing dry-out phenomena and maintaining stable heat transfer coefficients even under high heat flux conditions.
- The development of mixed wettability surfaces, combining hydrophilic, hydrophobic super hydrophilic and superhydrophobic regions, shows promising results in optimizing heat transfer performance by balancing nucleation and re-wettability effects. Therefore, future research can focus on optimizing composition of mixed wettability surface to enhance the heat transfer performance

References

- Ahmad, D., van den Boogaert, I., Miller, J., Presswell, R., & Jouhara, H. (2018). Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications. In *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* (Vol. 40, Issue 22, pp. 2686–2725). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1511642>
- Ahmadi, V. E., Aboubakri, A., Sadaghiani, A. K., Sefiane, K., & Koşar, A. (2020). Effect of functional surfaces with gradient mixed wettability on flow boiling in a high aspect ratio microchannel. *Fluids*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/fluids5040239>
- Ahmadi, V. E., Guler, T., Celik, S., Ronshin, F., Serdyukov, V., Surtaev, A., Sadaghiani, A. K., & Koşar, A. (2024). Effect of mixed wettability surfaces on flow boiling heat transfer at subatmospheric pressures. *Applied Thermal Engineering*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121476>
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday society*, 40, 546–551.
- Choi, C., Shin, J. S., Yu, D. I., & Kim, M. H. (2011). Flow boiling behaviors in hydrophilic and hydrophobic microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(5), 816–824. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.07.003>
- Du, L., & Hu, W. (2023). An overview of heat transfer enhancement methods in microchannel heat sinks. In *Chemical Engineering Science* (Vol. 280). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119081>
- Ellinas, K., Dimitrakellis, P., Sarkiris, P., & Gogolides, E. (2021). A review of fabrication methods, properties and applications of superhydrophobic metals. In *Processes* (Vol. 9, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr9040666>
- Hu, Y., Gao, H., & Yan, Y. (2024). A comprehensive review of boiling heat transfer on multi-scale hybrid surfaces and applications. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.09.002>
- Iqbal, M., Dinh, D. K., Abbas, Q., Imran, M., Sattar, H., & Ul Ahmad, A. (2019). Controlled Surface Wettability by Plasma Polymer Surface Modification. In *Surfaces* (Vol. 2, Issue 2, pp. 349–371). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/surfaces2020026>
- Kandlikar, S. G. (2010). Scale effects on flow boiling heat transfer in microchannels: A fundamental perspective. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7), 1073–1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.12.016>
- Lin, Y., Li, J., Sun, J., Li, W., & Cao, Y. (2021). Onset of Boiling, Heat Transfer, and Flow Patterns of Flow Boiling on the Superhydrophobic Porous Copper Surface in a Microchannel. *Journal of Heat Transfer*, 143(8). <https://doi.org/10.1115/1.4051324>
- Liu, T. Y., Li, P. L., Liu, C. W., & Gau, C. (2011). Boiling flow characteristics in microchannels with very hydrophobic surface to super-hydrophilic surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1–3), 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.060>
- Nyankson, E., Agbe, H., Takyi, G. K. S., Bensah, Y. D., & Sarkar, D. K. (2022). Recent advances in nanostructured superhydrophobic surfaces: fabrication and long-term durability challenges. In *Current Opinion in Chemical Engineering* (Vol. 36). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100790>
- Phan, H. T., Caney, N., Marty, P., Colasson, S., & Gavillet, J. (2012). Flow boiling of water on nanocoated surfaces in a microchannel. *Journal of Heat Transfer*, 134(2). <https://doi.org/10.1115/1.4004935>
- Tan, K., Hu, Y., & He, Y. (2023). Enhancement of flow boiling in the microchannel with a bionic gradient wetting surface. *Applied Thermal Engineering*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120784>
- Vontas, K., Andredaki, M., Georgoulas, A., Miché, N., & Marengo, M. (2021). The effect of surface wettability on flow boiling characteristics within microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121133>
- Wang, H., Yang, Y., He, M., & Qiu, H. (2019). Subcooled flow boiling heat transfer in a microchannel with chemically patterned surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 587–597. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.027>

- Wenzel, R. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), pp. 988–994. doi:10.1021/ie50320a024.
- Zhou, K., Coyle, C., Li, J., Buongiorno, J., & Li, W. (2017). Flow boiling in vertical narrow microchannels of different surface wettability characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.111>
- Zhou, S., Shu, B., Yu, Z., Huang, Y., & Zhang, Y. (2021). Experimental study and mechanism analysis of the flow boiling and heat transfer characteristics in microchannels with different surface wettability. *Micromachines*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/mi12080881>

INCREASING THE EFFICIENCY OF OIL AND GAS PRODUCTION ENTERPRISES THROUGH THE USE OF SMART GRIDS TECHNOLOGIES

İ. Babazade, O. Aliyeva, N. Shıxkarimov, X. Zulfuqarova

Ass. professor, senior researcher "Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry" Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

Phd, Head laboratory «Alternative energy» "Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry" Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

Leading engineer «Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry» Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

Engineer «Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry» Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

Abstract

The introduction of intelligent energy systems in oil and gas production makes it possible to use more efficient methods that reduce costs in oil fields. The decision-making process of the entire system, where large amounts of data collected from smart wells in oil and gas fields are processed, increases predictability and responsiveness. This solves the issues of reliability and safety at a high level, ensuring maximum production and minimizing costs at smart wells, as well as reducing the cost of oil field production using communications integrated into a modern system.

Direct receipt of information flows from the field and the use of predictive analysis programs allow oil fields not only to respond to problems, but also to instantly identify both risks and opportunities. Smart Grids allows real-time monitoring and distribution of energy consumption at field facilities, minimizing losses and improving overall efficiency.

To this end, it is important to minimize the costs of enterprises engaged in oil and gas production based on smart grid technologies. To reduce the cost of electricity consumption in Smart Grid systems, renewable sources (solar panels, wind turbines) are mainly used together with traditional power supply systems. Smart Grid helps to integrate these sources into a common network and manage them to ensure the stability and reliability of energy supply.

Unlike the above in the field of oil and gas production, in addition to the use of renewable energy sources, it is proposed to build a gas turbine power plant powered by accumulated and usefully used associated petroleum gas released from oil fields. A digital substation is also being built, equipped with modern technological systems, which not only converts and distributes electric energy to all wells of the field, but also exchanges information over fiber-optic communication lines using "smart sensors" to collect data on performance, equipment condition and energy consumption. The collection and analysis of this data allows you to predict breakdowns, optimize the operation of equipment and plan maintenance. The energy network of an oil and gas producing enterprise, including renewable sources and a gas turbine station, can provide all consumers with its generated electricity in this field.

The implementation of the project makes it possible to dramatically reduce energy costs, minimize the risk of emergency situations and introduce uninterrupted operation of an automated dispatch and technological control system.

Smart Grids provide a high degree of automation, which allows operators to remotely monitor and control energy systems in the fields. This improves the response to emergency situations and reduces downtime.

Keywords: Electric power sistem; Smart Grids; smart well ;gas turbine power plant

The implementation of intelligent energy systems in oil and gas production enables more efficient methods to reduce costs in oil fields. The decision-making process within the entire system, which processes large volumes of data collected from intelligent wells in oil and gas fields, increases predictability and responsiveness. This

solves the issues of reliability and safety at a high level, ensuring maximum production and minimizing costs in intelligent wells, and reduces the cost of oil production in the field with the help of communications integrated into the modern system (Fig. 1).



Fig. 1. Offshore oil and gas production enterprise with Smart Technologies

Directly receiving data streams from the field and using predictive analysis programs allow oil fields to not only respond to problems, but also instantly identify both risks and opportunities. Smart grids allow for real-time monitoring and distribution of energy consumption at field facilities, minimizing losses and increasing overall efficiency. A digital substation equipped with modern technological systems is also being built, which not only converts and distributes electrical energy to all wells of the field, but also exchanges information via fiber-optic communication lines using "smart sensors" to collect data on productivity, equipment condition and energy consumption. The collection and analysis of this data allows for the prediction of breakdowns, optimization of equipment operation and planning of maintenance.

Based on Smart Grid technologies, it is important to minimize the costs of enterprises engaged in oil and gas production. To reduce the costs of electricity consumption in Smart Grid systems, renewable sources (solar panels, wind turbines) are mainly used together with traditional power supply systems. Smart Grid helps to integrate these sources into the general network and manage them to ensure the stability and reliability of energy supply (Fig. 2).



Fig. 2. Onshore oil and gas production facility with Smart technologies

The energy network of an oil and gas producing enterprise, including renewable sources and a gas turbine station, can provide all consumers of generated electricity in this area. In addition to using renewable energy

sources, it is proposed to build a power plant operating on accumulated and usefully used associated petroleum gas emitted from oil fields. Associated petroleum gas (APG), formed during oil production, has long been considered a by-product that was disposed of by flaring. However, modern approaches to the rational use of resources and environmental standards offer more efficient ways of using it, one of which is electricity generation.

Flaring associated gas is not only a wasteful use of a valuable resource, it also causes serious environmental damage. It releases carbon dioxide, methane and other greenhouse gases, which contribute to climate change. According to the World Bank, about 140 billion cubic meters of associated gas are flared each year, equivalent to the emissions from 300 million cars.

However, in recent years, many oil and gas fields have been developing technologies that allow this gas to be used to generate electricity, which has several key advantages. Using associated gas to generate electricity reduces the amount of gas burned and, accordingly, greenhouse gas and pollutant emissions. This helps improve the environmental situation in oil and gas production regions, which is especially important for meeting environmental standards and reducing the carbon footprint.

On-site generation of electricity reduces dependence on external sources of electricity and optimizes energy supply costs. This is especially relevant for remote or hard-to-reach oil and gas fields, where the construction of power transmission lines can be expensive and technically complex. Processing associated gas into electricity can be a profitable solution in terms of fuel savings. Instead of burning gas, it can be used to generate electricity, which can be used for the oil and gas facilities' own needs or even sold to the grid.

To use associated gas as a source of electricity, gas turbines (efficiency 25-35%), piston units (efficiency 30-40%) and other generators are used that are capable of operating on low-calorie gases with variable composition. It is important that such units are adapted to production conditions and ensure stable and efficient operation.

The use of associated gas to generate electricity in the world has been implemented mainly in Russia, the USA and Canada. In some regions of the Russian Federation, such as the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, projects to use associated gas to generate electricity are actively developing. This allows for a reduction in dependence on electricity from the general energy system and an improvement in the environmental situation (Fig. 3)



Fig. 3. The LUKOIL Group operates in the area of sales of extracted and processed associated petroleum gas.

The United States and Canada are also using associated gas-to-electricity technologies as part of a broader strategy to reduce carbon emissions and improve energy efficiency in the oil and gas industry.

In recent years, many oil and gas fields have been developing technologies that allow this gas to be used to generate electricity, which has several key advantages:

1. Reducing emissions and improving the environmental situation
2. Energy independence
3. Economic benefit
4. Technologies and equipment
5. Solving the problem of lack
6. Innovation and development

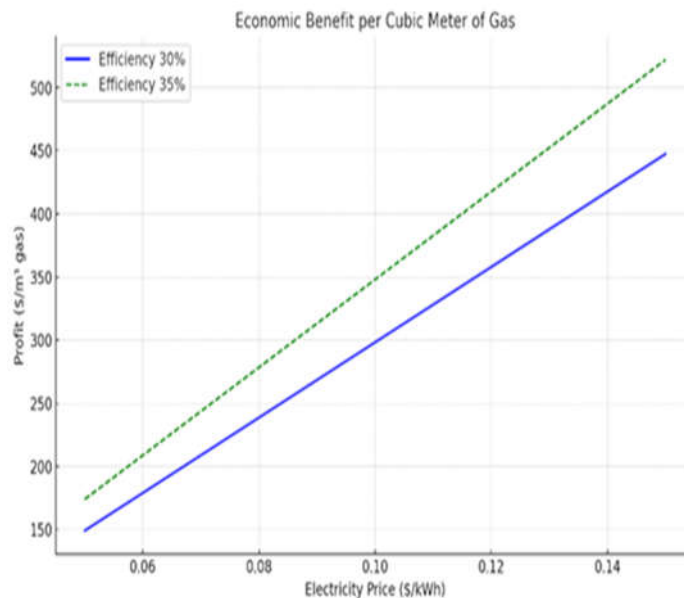
The amount of electricity produced from 1 m³ of gas is determined by formula (1):

$$E = GCV \cdot \eta \quad (1)$$

where: E — amount of energy produced (kWh);

GCV = 8 ÷ 10 — calorific value of gas (kWh/m³);

η — efficiency factor.



..... Green dotted line: 35% efficiency

—— Blue line: 30% efficiency

Fig. 4. Graph of the dependence of the unit's capacity on the associated gas consumption at an efficiency of 30% and 35%

As the price of electricity increases, the profit increases. For example, at \$0.10/kWh, the profit will be about \$0.85/m³ of gas for a plant with 35% efficiency. The higher the gas consumption and efficiency, the greater the electrical power. For example, at a consumption of 500 m³/h, a plant with 35% efficiency produces about 1.75 MW, which is higher than 1.5 MW with 30% efficiency.

Associated gas consists of methane (CH₄), ethane (C₂H₆), propane (C₃H₈), butane (C₄H₁₀), carbon dioxide (CO₂) and other components. Knowing the percentage of components, it is possible to estimate their impact on CO₂ emissions. Example of composition (in percent): CH₄: 70%; C₂H₆: 10%; C₃H₈: 10%; CO₂: 5%; other: 5%.

The calorific value of each component is determined by its calorific value. The average calorific value of APG is calculated as a weighted average for all components:

$$Q_{gas} = \sum_i (X_i \cdot Q_i) \quad (2)$$

where: X_i — fraction of component i (e.g. for CH_4 $X_{CH_4} = 0,7$),

Q_i — calorific value of the component, MJ/m³.

Approximate values of calorific value:

Methane (CH₄): 35.8 MJ/m³;

Ethane (C₂H₆): 63.5 MJ/m³;

Propane (C₃H₈): 93.0 MJ/m³.

For each gas component, a CO₂ emission factor is used, which shows how much CO₂ is released when 1 m³ of this component is burned. Approximate values:

Methane (CH₄): 1 kg/m³;

- Ethane (C₂H₆): 1.56 kg/m³;

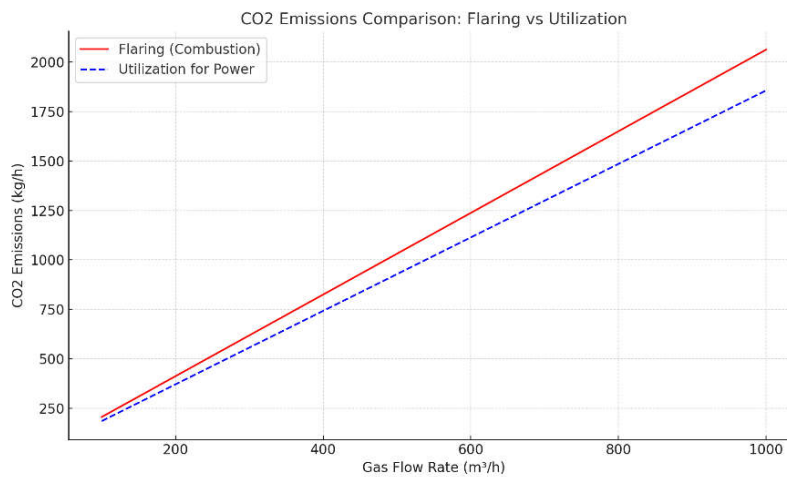
- Propane (C₃H₈): 2.31 kg/m³.

Total CO₂ emissions are calculated as:

$$M_{CO_2} = \sum_i (X_i \cdot V_{gas} \cdot E_i) \quad (3)$$

where:

- X_i is the component share,
- V_{gas} is the volume of gas burned (m³),
- E_i is the emission coefficient for the component (kg/m³).



— Red line: emissions from combustion (flare method)

..... Blue dotted line: emissions from gas-to-electricity conversion

Fig. 5. Graph of CO₂ emissions from flaring and associated gas processing

When processed, emissions are reduced by approximately 10%. For example, for a flow rate of 500 m³/h, the difference is approximately 140 kg CO₂/h.

The economic effect was calculated on Matlab and a graph of the dependence of profit from gas processing on the price of gas and electricity was obtained (Fig. 6).



Fig.6. Dependence of profit from gas processing on the price of gas and electricity.

Improving the efficiency of oil and gas production facilities through the use of Smart Grid technologies is a significant step towards improving energy supply management, increasing reliability and reducing operating costs. Smart Grid is a system that uses modern information and communication technologies to optimize the operation of energy networks, including collecting, analyzing and processing real-time data to manage energy distribution, monitoring and predicting needs.

Here are some key ways in which Smart Grid technologies can help improve the efficiency of oil and gas operations:

1. Real-time energy monitoring and management
2. Optimizing power distribution
3. Integrating renewable energy sources
4. Predictive maintenance and prevention
5. Reducing operating costs
6. Improving grid resilience and minimizing losses
7. Managing energy efficiency
8. Improving transparency and reporting

Globally, Smart Grid implementations in the oil and gas industry have been applied mainly in the following countries:

- **Projects in Russia:** In some Russian regions, such as the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Smart Grid technologies are being tested and implemented to manage energy supply at oil and gas enterprises. This includes the integration of intelligent networks that help reduce operating costs and improve the reliability of energy supplies.
- **International experience:** In the US and Canada, oil and gas companies are actively implementing Smart Grid technologies to manage remote facilities and optimize energy infrastructure. This helps not only reduce costs, but also minimize the impact on the environment.

CONCLUSION

The use of associated gas to generate electricity in oil and gas fields is an effective environmental and economic solution that helps reduce environmental impact, improve energy efficiency and reduce costs. It also helps oil and gas companies comply with modern environmental standards and legislation.

The use of Smart Grid technologies in oil and gas production enterprises can significantly increase efficiency, reduce energy costs and improve environmental performance. The introduction of such technologies helps optimize processes, increase the reliability of energy systems and improve environmental sustainability, which in turn strengthens the competitiveness of companies in the conditions of the modern energy market.

REFERENCES

1. Babazade I.S. "Ensuring the Extraction of an Additional Volume of Hydrocarbons by Influencing Productive Formations by Physical Methods (ENHANCED Oil Recovery)", "Global Summit on Interdisciplinary Innovations: Material Sciences, Engineering Technology, Health Care and Sustainable Waste Management" held during June 12-13, 2024 in Dubai, UAE
2. Bernd M. Buchholz, Zbigniew Styczynski Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Network, Springer Berlin Heidelberg, 2014, 396 pages
3. Babazade I.S., 2024, Three-phase electric energy converter for excitation of low-frequency mechanical vibrations "17th International Scientific Conference on Energy and Climate Change 11th Green Energy Investments Forum – Scientific Sessions – Brokerage event, 9-11 October 2024, Athens – Greece
4. Hussein T. Mouftah "Smart Grid: Networking" Data Management, and Business Models" ISBN 9780367872854,444 Pages, 2019
5. Hasanov R.A., Babazade I.S., Musevi S.A. (2024) Physical Method Development for Increasing EOR the Performance Wells. Journal of Earth and Environmental Science Research. SRC/JEESR-291. DOI: doi.org/10.47363/JEESR/2024(6)222

CORRELATIONS DEVELOPED FOR MICROCHANNEL FLOW BOILING**Res. Assist. Alperen EVCİMEN¹**¹Recep Tayyip Erdogan Uni., Faculty of Engr. and Arch., Dept. of Mech. Eng., Rize, TURKEY.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5337-5952>**Assoc. Prof. Burak MARKAL²**²Karadeniz Technical Uni., Faculty of Engr., Dept. of Mech. Eng., Trabzon, TURKEY.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6356-3503>**Abstract**

This study analyses the correlations for flow boiling in microchannels that have been introduced in the literature. The flow boiling has become a significant cooling method in a number of fields, including the electronics industry, energy systems and the defense industry. Its high surface-to-volume ratio makes it suitable for use in systems where there are volume constraints. Boiling and microchannel heat sinks allow a greater amount of waste heat to be removed from the systems to be cooled with a reduced amount of refrigerant compared to conventional cooling systems.

In order for the associated cooling system to operate optimally, it is required to optimize certain parameters according to the prevailing conditions. The effects of different conditions on flow boiling are presented in the literature through the use of correlations based on the aforementioned studies. In these correlations, the objective is to predict flow boiling characteristics by employing dimensional or dimensionless parameters that express the underlying physics of flow. To investigate these correlations is the aim of study. To facilitate analysis, the correlations were reduced to five categories based on the parameters or quantities they predict: (1) heat transfer coefficient prediction, (2) pressure drop prediction, (3) determination of flow patterns, (4) determination of critical heat flux (CHF) and (5) determination of onset of bubble boiling (ONB).

A literature review indicates that the presented correlations include a variety of variables, including fluid flow rate, channel geometry, surface properties, and thermophysical properties of the working fluid. Each of the correlations can have different ranges of accuracy and applicability, often depending on the flow regime or experimental conditions from which they are derived. In this study, we will review the underlying assumptions made for these correlations and the limits within which they are considered to be valid.

This study is intended to evaluate the correlations that have been developed for flow boiling in microchannels and to examine the parameters that exert influence on the design and performance of heat sinks. Moreover, this study aims to provide a comprehensive understanding of the flow boiling characteristics. The findings will inform the design and optimization of microchannel heat sinks, facilitating the development of more effective thermal management systems.

Keywords: correlation, microchannel, flow boiling characteristics

Introduction

The subject of flow boiling in micro scale has emerged as a topic of considerable interest among researchers engaged in a diverse range of fields, including energy, electronic cooling and biomedical engineering, over the past few years. This is primarily attributable to the high heat transfer capability and compactness that flow boiling in micro scale offers. In this flow state, the heat transfer process is influenced by a number of factors, including not only the phase change but also the surface properties, geometry, flow patterns and characteristics of working fluids. The precise description of flow boiling processes in microchannels is a crucial step in optimization of system performance and integration of design improvements in engineering applications. In this context, the experimental and numerical correlations developed for flow boiling are of great value in predicting the tendencies associated with evaporative cooling and heat transfer performance. However, boiling phenomena in micro-scale systems are far more complicated than those in macro-scale systems; thus, the applicability of existing correlations is limited. This study discusses and presents the characteristics of flow

boiling and the existing correlations for heat sink with microchannel in the literature that reflect these characteristics. Some studies are summarized from the open literature.

Liu et al. (2005) examined the onset of nucleate boiling (ONB) within a microchannel, utilizing a rectangular channel dimension 275 μm in width and 636 μm in depth. Analytical studies were conducted to support the findings presented, and a correlation was identified which offers insight into the threshold heat flux which is necessary for the occurrence of ONB. In a flow boiling experiment conducted by Fu et al. (2013), an ethanol-water combination was used in a microscale channel with an enlarging cross-section. A correlation between pressure drop and flow pattern was presented. The authors indicated that the mean absolute error (MAE) of established correlations in comparison to the experimental results was 11.6% and 13.7%. Al-Zaidi et al. (2019) performed an experimental investigation on a heat sink comprising multi-parallel channel microchannels with dimensions of 0.7 mm in width and 0.35 mm in depth. They employed the HFE-7100 refrigerant at mass fluxes of 50-250 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. They posited that the experimental results are consistent with the relation proposed by Stephan & Preuder (1979), with a MAE of 22.7%. Huang et al. (2021) investigated the flow behavior in square cross-section microchannels with a hydraulic diameter of 550 μm . Experimental studies were performed within a range of 790 to 1122 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mass flux and 0 to 31.08 kW m^{-2} heat flux. A correlation for pressure drop was presented, which includes vapor quality, inertia force, flow rate, and surface tension parameters. Fu et al. (2024) carried out experimental work in microchannels bounded by porous copper walls. The working fluid was water, and the mass flux range was 66–407 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A new relation for pressure drop was presented, with mean absolute percentage errors of 5.51% for 268 data points. Rui et al. (2023) conducted a study in a microchannel with a tree-shaped geometry using a mixture of Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) and water. The mixing ratio of SDS and deionized water varied between 100 - 800 mg kg^{-1} . Correlations were developed for pressure drop and heat transfer coefficient. In correlation developed for pressure drop, it was stated that the MAE was below 20%.

As stated previously, researchers have provided correlations included heat transfer coefficient, pressure drop, transition of regimes, ONB and CHF in flow boiling in microchannels. These correlations and the related parameters provide preliminary design data on the heat sink or the cooling system. In the following sections, the correlations and related parameters in the open literature are discussed. Furthermore, it is also the aim of this study to serve as a guiding source in the related field.

Correlations for Heat Transfer Coefficient

In fluid dynamics, the heat transfer coefficient (HTC) represents a fundamental parameter in the context of flow boiling. This is due to the direct correlation between the HTC and the efficiency with which heat transfer occurs between the heated surface and the surrounding fluid. Microchannel systems, where compactness and high heat fluxes are key design considerations, accurately predicting the HTC is essential for optimizing performance and prevention of thermal failures. A variety of both empirical and semi-empirical correlations are presented in the existing literature as a means of predicting the HTC in flow boiling. Each of these correlations is tailored to a specific working fluid, flow regime, and microchannel geometry. These correlations are typically developed on the basis of experimental data and are designed to capture the intricate interplay of heat transfer phenomena occurring during flow boiling. Flow boiling differs from single-phase heat transfer in that it encompasses additional mechanisms, such as nucleation, bubble growth, and liquid-vapor interactions. These supplementary mechanisms facilitate the transfer of thermal energy but simultaneously introduce a greater degree of complexity into prediction models. Consequently, in order to account for these effects, HTC correlations frequently incorporate variables associated with mass flux, vapor quality, heat flux and properties of fluid.

Table 1 presents a selection of the correlations presented in the literature. These include a number of dimensional and/or dimensionless parameters. While there are some parameters that appear in multiple correlations, such as the Reynolds number (Re), boiling number (Bo), and Weber number (We), there are also correlations containing specific parameters, such as the aspect ratio (AR), concentration factor (Cs), and reduced pressure (p_r). Warrior et al. (2002) conducted a study on flow boiling in micro-channel with a hydraulic diameter of 750 μm utilizing FC-84 working fluid. In their study, they presented a correlation, which incorporates Bo and vapor quality (x) parameters, for the heat transfer coefficient. Lee & Garimella (2008) employed water as the working fluid in a microchannel with a cross-sectional shape of a rectangle. Channels were constructed with four different widths (102 μm , 242 μm , 400 μm and 997 μm) and a nominal height of

400 μm. A correlation for heat transfer coefficient was presented, which included parameters designated as the convective boiling (F_{conv}), the nucleate boiling (F_{nb}) and the pressure (F_{PF}). This correlation was presented in a form that combined influences of convective and nucleate boiling. Furthermore, reduced pressure parameter was incorporated into the pressure correction factor. In their study, Li & Wu (2010) presented a general correlation for evaporative heat transfer. The data were obtained from thirteen different types of working fluids and channels, exhibiting a range of hydraulic diameters. The presented correlation includes the Bo, Re and Bond number (Bd). Additionally, the effect of flow characteristics with the use of the Re number is included in the relationship. In a study conducted by Mahmoud & Karayiannis (2012), micro tubes and the working fluid R134 were employed. The study yielded a correlation for HTC, presented with two distinct forms: one for vapor quality equal to or less than 0.3 and another for values exceeding this threshold. The correlation incorporates boiling number and Reynold number, along with confinement number (Co), convection number (N_{co}), and Weber number (We). Kew & Cornwell (1997) stated a limit value of $Co = 0.5$ as the transition point between the macro and micro dimensions. $Co > 0.5$ indicates micro size. Markal et al. (2017) presented a correlation that includes the effect of the ratio of microchannel cross-sectional dimensions. Additionally, the correlation incorporates aspect ratio (AR) and vapor quality. Furthermore, authors proposed the following range of study limits: $x=0.01-0.69$ $Re_L=7.72-190$, $AR=0.37- 5.00$, $Bo=9.56 \times 10^{-5} - 70.4 \times 10^{-5}$. A study conducted by Rui et al. (2023) employed a sodium dodecyl sulphate (SDS) and proposed a correlation for the HTC. The proposed correlation includes solute concentration of the SDS aqueous solution (C_s) as a parameter to account for the SDS effect.

The HTC correlation in microchannels shows how mechanisms interact within flow boiling. These models are adapted for the fluid, geometry and operational parameters based on many variations in dimensional and dimensionless parameters. They are all similar but complex, with many models for different flow regimes and applications. This shows the need for the right correlation to ensure accurate predictions for heat transfer in microchannels for applications.

Table 1. Proposed correlations for heat transfer coefficient

References	Working Fluid	Channel Type/Size	Correlation
Warrier et al. (2002)	FC84	Rectangular / $D_h = 750 \mu m$	$h_{tp} = \left[1 + 6Bo^{1/6} - 5.3x^{0.65} (1 - 855Bo) \right] \frac{Nuk_l}{D_h}$
Lee & Garimella (2008)	Water	Rectangular/ $102-997 \mu m * 400 \mu m$	$h_{tp} = Nu_3 / Nu_4 \left[(F_{con} h_{sp})^3 + (F_{nb} h_{nb})^3 \right]^{1/3}$ $F_{con} = (\phi_f^2)^{0.2743} (k_w / k_f)^{0.7257} (c_{pp} / c_{pf})^{0.2743}$ $F_{nb} = 4.6809 - 0.6705 \log \left(\frac{q_w''}{10^6} \right) + 3.908 \left(\frac{D_h}{0.001} \right)$ $h_{nb} = 5600 F_{PF} \left(\frac{q_w''}{20,000} \right)^{0.9-0.3 p_r^{0.15}}$ $F_{PF} = \left(6.1 + \frac{0.68}{1 - p_r} \right) p_r^2 + 1.73 p_r^{0.27}$
Li & Wu (2010)	13 different fluids	$D_h = 0.2 - 3 \text{ mm}$	$h_{tp} = 334 Bo^{0.3} (Bd Re_l^{0.36})^{0.4} \frac{k_l}{D_h}$
Mahmoud & Karayiannis (2012)	R134a	$D_h = 0.52 - 4.26 \text{ mm}$	$h_{tp} = 3320 \frac{Bo^{0.3} We^{0.2} Re^{0.11} k_l}{Co^{0.6} D_h} \text{ for } x \leq 0.3$

			$h_{tp} = 5324 \left[\frac{Bo^{0.3} We_l^{0.25}}{N_{Co}^{0.25}} \right]^{1.79} \frac{k_l}{D_h} \text{ for } x > 0.3$
Markal et al. (2017)	Water	$D_h = 0.10 \text{ mm}$	$h_{tp} = \frac{0.054 Re_L^{0.214} Bo^{0.913} AR^{0.552} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.7} \left(\frac{k_l}{D_h} \right)^{1.959}}{We_{Lo}^{0.094} Pr_L^{0.333}}$
Rui et al. (2023)	Water with sodium dodecyl sulfate	Rectangular 1mm * 0.5 mm	$h_{tp} = 0.05 (Csx10^{-3} + 4.5) Re^{2.2} Bo^{1.2} We^{-0.7} \frac{k_l}{D_h}$

Correlations for Pressure Drop

Modelling two-phase flow systems aims to predict pressure gradients and phase fractions. Phase fractions are the void fraction for the gas phase and the liquid hold-up for the liquid phase (Kandlikar, 1999). In microchannel systems, pressure drop is significantly affected by relatively small dimensions of the channels, also effects of viscous and surface tension forces increase. A comprehensive understanding of pressure drop and the ability to accurately predict them are essential for optimization of pump selection, ensuring reliable operation and preventing complications such as flow instability and dry-out.

The pressure drop in flow boiling can be attributed to three fundamental components: frictional, acceleration and gravitational pressure drop. In microscale channels, gravitational influence is frequently insignificant due to minimal channel height, while the frictional and acceleration components prevail. The frictional pressure drop can be attributed to shear stresses between fluid and surface of the channel; conversely, acceleration pressure drop is associated with the change in momentum that occurs as the liquid transitions to a vapor state.

Two fundamental approaches are typically employed to model the pressure drop in two-phase flow: the homogeneous model and the separated model. These models exhibit differences in their descriptions of the interactions between the phases (liquid and vapor) and their flow behaviors. In the context of a homogeneous model, calculations pertaining to the pressure gradient are based upon the assumption of pseudo-single-phase flow. Lockhart & Martinelli (1949) presented pressure drop multipliers for the separated model:

$$\phi_L^2 = \frac{(dp/dz)}{(dp/dz)_L} \quad (1)$$

$$\phi_v^2 = \frac{(dp/dz)}{(dp/dz)_v} \quad (2)$$

and parameter X_m^2 (Martinelli parameter) is defined as following equation.

$$X_m^2 = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_v} \quad (3)$$

Chisholm (1967) modified the Martinelli multipliers and presented them with the following relation:

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X_m} + \frac{1}{X_m^2} \quad (4)$$

$$\phi_v^2 = 1 + CX_m + X_m^2 \quad (5)$$

where the coefficient C (also known as the Chisholm parameter) is given in Table 2.

Table 2. Chisholm parameter (Chisholm, 1967)

Liquid	Vapor	C	
TF	TF	20	
LF	TF	12	
TF	LF	10	LF: Laminar flow
LF	LF	5	TF: Turbulent flow

In the interest of adapting frictional pressure drop to microscale, a series of equations have been proposed, as outlined in Table 3.

Table 3. Proposed correlations for pressure drop

References	Working Fluid	Channel Type/Size	Correlation
Mishima & Hibiki (1996)	Air-Water	Circular / D _h = 1-4 mm	$\Delta P_{p,f} = \frac{L_{tp}}{x_o} \int_0^{x_o} \frac{2f_L G^2 (1-x)^2 v_L}{D_h} \phi_f^2 dx_o$ $\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}; C = 21[1 - \exp(-0.319D_h)]$ $\Delta P_{p,a} = G^2 v_L \left[\frac{x_o^2}{\alpha_o} \left(\frac{v_g}{v_L} \right) + \frac{(1-x_o)^2}{1-\alpha_o} - 1 \right]$ $\alpha_o = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x_o}{x_o} \right) \left(\frac{v_L}{v_g} \right)^{2/3}}$
Qu & Mudawar (2003)	Water	Rectangular/ D _h = 0.349 mm	$C = (0.00418G + 0.0613) 21 \left[1 - e^{-0.319x10^3 D_h} \right]$
Zhang et al. (2010)	Varies	D _h = 0.07 – 6.25 mm	$C = 21x(1 - e^{-0.358/La}),$ $La = \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g} \right)^{0.5} / D_h$
Markal et al. (2019)	Water	Rectangular/ D _h = 0.1 – 0.25 mm	$C = -7.1 + \left[\frac{(1-x_o)^{1.766}}{\text{Re}_{Lo}^{0.12} AR^{0.031} Bo^{0.165} We_{Lo}^{0.074} \left(\frac{v_L}{v_g} \right)^{0.233} \left(\frac{L_{tp}}{D_h} \right)^{0.247}} \right]$
Huang et al. (2021)	R-134a	Rectangular/ D _h = 0.55 mm	$C = 21 \left[1 - e^{-0.358/La} \right] (0.06548 j_g + 0.17033)$ $j_g = \frac{Gx}{\rho_g}$

Zhang et al. (2023)	R-134a	Rectangular/ 1.5mm* 0.55 mm	$C = 21 \left[1 - e^{-0.358/La} \right] (0.34D_{ord} + 0.15)$ $D_{ord} = \frac{G}{x\rho_L} \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \theta + \cos \theta}}$
---------------------	--------	-----------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

In a study conducted by Mishima & Hibiki (1996), the C parameter was presented in conjunction with the hydraulic diameter. This study involved pipes with hydraulic diameters ranging 1 - 4 mm. Qu & Mudawar (2003) carried out a flow boiling experiment with water in a microchannel with rectangular cross-section. With the data they obtained, they defined the parameter C as dependent on the hydraulic diameter and mass flux. Zhang et al. (2010) proposed correlation utilizing data obtained from various databases with hydraulic diameters ranging from 70 to 6250 μm . In presented correlation, Laplace number (La), which incorporates surface tension and fluid densities, was employed. In their study, Markal et al. (2019) employed microchannels with varying channel inlet aspect ratios. The presented correlation incorporates the aspect ratio (AR), which reflects this geometric effect. Huang et al. (2021) indicated that the Chisholm coefficient is significantly influenced by the superficial gas flux (j_g) parameter. This parameter was integrated into the correlation they presented. Zhang et al. (2023) examined superhydrophilic, hydrophilic, and common channels to evaluate the impact of surface wettability. In the correlation they presented for frictional pressure drop, they used the flow order degree parameter (D_{ord}), which includes the effect of contact angles, in the C coefficient.

A number of correlations are available for the estimation of two-phase pressure drop in microchannels. These correlations typically account for key variables, including mass flux, vapor quality, fluid properties, and channel geometry. Despite the availability of various pressure drop correlations, their applicability and accuracy can vary depending on the specific operating conditions and fluid-channel combination.

Correlations for Flow Patterns

The flow regimes observed in microchannel boiling exhibits five principal categories, which are conventionally designated as bubble flow, slug flow, churn flow, annular flow and dryout region (Tibirićá et al., 2017). Flow patterns exert a considerable effect on mechanisms of heat transfer. Researchers have presented vapor quality-based correlations with the objective of determining the transitions between these flow regimes. Ong & Thome (2011a) put forth the following correlations for the transition between flow regimes bubbly flow (bf) to annular flow (af):

$$x_{bf/af} = 0.047 (Co^{0.05}) \left(\frac{\mu_v}{\mu_L} \right)^{0.7} \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0.6} Re_v^{0.8} We_L^{-0.91} \quad (6)$$

Here μ_v and μ_L indicate the viscosity of the vapor and liquid respectively. Also, Tibirićá et al. (2017) suggested the following relations for the transition from a bubbly flow (bf) to a slug flow (sf) regime:

$$x_{bf/sf} = \left[1 + 1.268 \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{2.793} Re_L^{0.3283} \left(\frac{\mu_L}{\mu_v} \right)^{-3.383} \right]^{-1} \quad (7)$$

for slug flow (sf) to churn flow (cf):

$$x_{sf/cf} = \left[1 + 0.0721 \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{0.7215} Re_L^{0.7864} La_L^{-0.3003} \right]^{-1} \quad (8)$$

for churn flow (cf) to annular flow (af):

$$x_{cf/af} = \left[1 + 10^{-2.1765} \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{0.6534} \text{Re}_L^{0.4444} \text{Fr}_L^{0.2416} \right]^{-1} \quad (9)$$

where Froud number is $\text{Fr}_L = G^2 / \rho_L^2 gD$.

Correlations for Critical Heat Flux

Critical heat flux (CHF) is a phenomenon that refers to the point at which maximum heat transfer from a surface to a liquid occurs and is an important limitation for thermal systems. The occurrence of CHF is associated with the formation of a vapor layer on the surface as a result of the evaporation of the liquid and the vapor acts as an insulating layer between the surface and the liquid, significantly reducing heat transfer. This phenomenon causes the surface temperature to rise rapidly and can lead to equipment damage or thermal safety violations in most systems. CHF during boiling is influenced by many parameters such as fluid properties, surface conditions, pressure and heat flow. For example, an increase in pressure generally causes CHF to rise because evaporation is more stable under higher pressure. However, surface properties such as surface roughness and wettability directly affect the CHF by changing the liquid evaporation dynamics.

Some of the correlations presented for critical heat flux are given in Table 4. Bowers & Mudawar (1994) carried out flow boiling studies in mini and microchannels with R-113 working fluids. In their study, they presented a correlation including We number for CHF. They stated that the critical heat flux for mini- and microchannel heat sinks is not a function of inlet temperature. Qu & Mudawar (2004) carried out a flow boiling experiment with a heat sink consisting of twenty-one microchannels. They used deionized water as the working fluid in the experiments. They explained that the critical heat flux increases with increasing mass flux in mini and microchannels. In the presented correlation, the densities of liquid and vapor were also included as parameters. Wojtan et al. (2006) conducted a study on Microchannels with internal diameters of 0.5 and 0.8 mm with R-134a and R-245fa refrigerants and presented correlation for CHF. They stated that parameters such as heating length and thermal properties of refrigerants are effective on CHF. Koşar & Peles (2007) conducted a study for CHF with a silicon-based microchannel heat sink. 291 - 1118 kg/m² s mass flux and 53 - 196 W/cm² heat flux conditions used R-123 as the working fluid. It was stated that, while some of the available correlations in agreement with the experimental results, they are unable to account for the impact of system pressure. They also included pressure parameters (p_{cr} and p_e) and outlet vapor quality in the correlation they presented for critical heat flux. In a study conducted by, Ong & Thome (2011), a number of parameters associated with CHF were investigated. These included bubble confinement, flow pattern and inlet temperature. In addition, the effects of viscosity ($\mu_L \mu_v$) and channel geometry, specifically bubble confinement (D_{th}), were also included in the CHF correlation presented. Tibiriçá et al. (2017) also added outlet vapor quality as a parameter in the correlation presented. In a recent experimental study, Markal et al. (2024) investigated the performance of a microchannel heat sink with an expanding cross-section. The study yielded a correlation for CHF, augmented by the inclusion of two additional parameters: the ratio of the heat sink's outlet cross-sectional area to the inlet cross-sectional area (AR_1) and the ratio of the heat transfer surface area to the platform area (AR_2). The authors concluded that the utilization of an expanding-type micro channel with micro fins is a contributing factor to an increase in CHF.

As a critical design parameter, CHF has always been of prime importance in boiling systems because it has direct implications on thermal performance and safety. Many studies have presented correlations that include mass flux, vapor quality, and geometry to predict CHF for a wide range of conditions. Recent developments have demonstrated that enhancements in CHF are achievable with designs such as microchannel heat sinks with expanding cross-sections and micro fins, thus pointing out the importance of tailored designs for optimal thermal management and system reliability.

Table 4. Proposed correlations for CHF

References	Working Fluid	Channel Type/Size	Correlation
Bowers & Mudawar (1994)	R-113	Circular / D _h =0.51mm and 2.54 mm	$q''_{CHF} = 0.16Gh_{fg}We^{-0.19}\left(\frac{L}{D_h}\right)^{-0.54}$
Qu & Mudawar (2004)	Water	Rectangular/ 0.215mm* 0.821 mm	$q''_{CHF} = 33.43Gh_{fg}We^{-0.21}\left(\frac{L}{D_h}\right)^{-0.36}\left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{1.11}$
Wojtan et al. (2006)	R-134a R-245fa	Circular/ D _h = 500 μm D _h = 800 μm	$q''_{CHF} = 0.437\left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{0.073}\left(\frac{L}{D_h}\right)^{0.073}We^{-0.24}Gh_{fg}$
Koşar & Peles (2007)	R-123	Rectangular/ 0.200 mm* 0.264 mm	$q''_{CHF} = Gh_{fg}\left\{\left[9.34 \times 10^{-2}\frac{p_e}{p_{cr}} - 0.34\left(\frac{p_e}{p_{cr}}\right)^2 - 1.3 \times 10^{-4}\right]x_e^{0.59}\right\}^{1/1.08}$
Ong & Thome (2011)	R134a, R236fa R245fa	Circular / D _h = 1030 μm, D _h = 2200 μm D _h = 3040 μm	$q''_{CHF} = 0.12Gh_{fg}We^{-0.141}\left(\frac{L_{ev}}{D_h}\right)^{-0.36}\left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{0.062}\left(\frac{\mu_L}{\mu_v}\right)^{0.183}\left(\frac{D_h}{D_{th}}\right)^{-0.36}$ $D_{th} = \frac{1}{Co}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$
Tibirić et al. (2017)	Varies	Varies	$q''_{CHF} = 0.242\left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{0.0598}\left(\frac{L}{D_h}\right)^{-0.6834}We_L^{-0.1635}Gh_{fg}La_L^{-0.0714}(1-x_i)^{0.881}$
Markal et al. (2024)	Water	Rectangular/ D _h = 333 μm	$q''_{CHF} = 2.9 \times 10^{-3}\left(\frac{1}{We}\right)^{0.15}\left(\frac{AR_1}{AR_2}\right)^{1.31}x^{0.25}Gh_{fg}$

Correlations for Onset of Nucleate Boiling

The onset of nucleate boiling (ONB) is defined as the moment at which small vapor bubbles begin to emerge on a heated surface, signaling a shift from regular heat convection to boiling. This transition significantly enhances heat transfer but depends on factors like heat flux, the fluid's physical properties, and the surface's texture or wettability. Understanding ONB helps engineers design safer, more efficient thermal systems and avoid overheating or surface damage. Hsu (1962) expressed the initial conditions of boiling by wall heat flux with the following equation.

$$q''_{ONB} = \frac{\rho_v h_{fg} \Delta T_w^2 k_L}{12.8 T_{sat} \sigma} \quad (10)$$

As can be seen in the equation, there are parameters such as saturation temperature, wall temperature, surface tension and heat conduction coefficient which affect the ONB (according to Hsu (1962)). He also stated that the onset of boiling quite depends on thickness of the thermal boundary layer. Basu et al. (2002) proposed the correction factor (F_c) given in the following equations for ONB correlation.

$$q''_{ONB} = F_c^2 \frac{\rho_v h_{fg} \Delta T_w^2 k_L}{2T_{sat} \sigma} \quad (11)$$

$$F_c = \left[1 - e^{-\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)^3 - 0.5\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)} \right]^2 \quad (12)$$

Here θ is the contact angle. He stated that the density of nucleating site depends on the contact angle and wall superheat. Wu et al. (2010) conducted a study with stainless steel pipes concentric fitting with gap values of 0.95, 1.5 and 2 mm. They presented the following correlation for the onset of boiling:

$$q''_{ONB} = 241.048 \left(\frac{Gs}{\mu} \right)^{0.0256} \left(\frac{\Delta T_{sat}}{T_s} \right)^{0.448} \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0.0562} x \left(\frac{2d_j}{d_{io} + d_{oi}} \right)^{-0.134} \left(\frac{2q_n}{q_i + q_o} \right)^{-0.341} \quad (13)$$

where s represents the gap value, d_j represents the relevant diameter value, d_{io} and d_{oi} represent inner and outer diameter values of the annulus forming the gap, respectively. It is stated that heat flux required for bubble formation is lower in the concentric formed channel compared to conventional channels. Kong et al. (2020) studied deionized water in heat sinks with circular, diamond and oval micro fin shapes. They developed the correlation given in equation (14) for the ONB.

$$q''_{ONB} = 3.22x \left(\frac{C}{L} \right)^{0.12} We^{0.41} Ca^{-0.35} \left(\frac{\rho_v h_{fg} \Delta T_{sat}^2 k_L}{8T_{sat} \sigma} \right)^{-0.01} \quad (14)$$

The parameter C/L , which approximates the number of capillaries and the characteristic length of the micro fin, is included in the equation. They stated that the heat flux required for the ONB is higher in oval and diamond micro fin heat sink compared to circular micro fin heat sink.

Conclusion

This study examines the development of correlations for flow boiling-based cooling systems, with a particular focus on the pivotal design parameters. The study demonstrates how correlations originally developed for macro-scale systems have been refined for micro-scale applications by incorporating factors such as surface tension and confinement numbers that reflect micro-scale dynamics. Furthermore, parameters related to properties of working fluid and the geometric designs are incorporated, thereby improving the accuracy of the correlations under specific conditions. However, due to complexity of boiling phenomena in microchannels and the incomplete understanding of some mechanisms, the predictive scope of these correlations remains somewhat limited. Nevertheless, the findings of this study offer practical guidance for the design of microchannel cooling systems, thereby helping to optimize their performance and ensure reliability.

References

- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., & Karayiannis, T. G. (2019). Flow boiling of HFE-7100 in microchannels: Experimental study and comparison with correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 100–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.095>
- Basu, N., Warriar, G. R., & Dhir, V. K. (2002). Onset of nucleate boiling and active nucleation site density during subcooled flow boiling. *Journal of Heat Transfer*, 124(4), 717–728. <https://doi.org/10.1115/1.1471522>
- Bowers, M. B., & Mudawar, I. (1994). High flux boiling in low flow rate, low pressure drop mini-channel and micro-channel heat sinks. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37(2), 17.
- Chisholm, D. (1967). A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. In *Inr J Heat Moss Transfer* (Vol. 10). Pergamon Press Ltd.

- Fu, B. R., Tsou, M. S., & Pan, C. (2013). Flow-pattern-based correlations for pressure drop during flow boiling of ethanol-water mixtures in a microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61(1), 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.012>
- Fu, K., Xu, X. H., & Liang, X. G. (2024). Experimental study and correlation development for the two-phase frictional pressure drop of flow boiling in copper foam fin microchannels. *Science China Technological Sciences*, 67(9), 2758–2776. <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2630-9>
- Hsu, Y. (1962). On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface. *ASME J. Heat Transfer-Trans. ASME*, 84, 207–213. <https://doi.org/10.1115/1.3684339>
- Huang, Y., Shu, B., Zhou, S., & Shi, Q. (2021). Experimental investigation and prediction on pressure drop during flow boiling in horizontal microchannels. *Micromachines*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/mi12050510>
- Kandlikar, S. G. (1999). *Handbook of phase change: boiling and condensation*. Routledge. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780203752654>
- Kew, P. A., & Cornwell, K. (1997). Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. *Applied Thermal Engineering*, 17(8–10), 705–715.
- Kong, L., Liu, Z., Jia, L., Lv, M., & Liu, Y. (2020). Experimental study on flow and heat transfer characteristics at onset of nucleate boiling in micro pin fin heat sinks. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109946>
- Koşar, A., & Peles, Y. (2007). Critical heat flux of R-123 in silicon-based microchannels. *Journal of Heat Transfer*, 129(7), 844–851. <https://doi.org/10.1115/1.2712852>
- Lee, P. S., & Garimella, S. V. (2008). Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(3–4), 789–806. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.019>
- Li, W., & Wu, Z. (2010). A general correlation for evaporative heat transfer in micro/mini-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9–10), 1778–1787. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.01.012>
- Liu, D., Lee, P. S., & Garimella, S. V. (2005). Prediction of the onset of nucleate boiling in microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(25–26), 5134–5149. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.021>
- Lockhart, R. W., & Martinelli, R. C. (1949). Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. *Chemical Engineering Progress*, 45, 38–48.
- Mahmoud, M., & Karayiannis, T. (2012, December). A statistical correlation for flow boiling heat transfer in micro tubes. *Proceedings of the 3rd European Conference on Microfluidics - Microfluidics 2012*.
- Markal, B., Aydin, O., & Avci, M. (2017). Prediction of Heat Transfer Coefficient in Saturated Flow Boiling Heat Transfer in Parallel Rectangular Microchannel Heat Sinks: An Experimental Study. *Heat Transfer Engineering*, 38(16), 1415–1428. <https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1255038>
- Markal, B., Aydin, O., & Avci, M. (2019). Prediction of Pressure Drop for Flow Boiling in Rectangular Multi-Microchannel Heat Sinks. *Heat Transfer Engineering*, 40(1–2), 26–38. <https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1404552>
- Markal, B., Evcimen, A., Atci, F., & Aydin, O. (2024). Investigation of heat transfer limits for flow boiling in expanding heat sinks having micro pin fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107650>
- Mishima, K., & Hibiki, T. (1996). Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. *Int. J. Multiphase Flow*, 22(4), 703–712.
- Ong, C. L., & Thome, J. R. (2011a). Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 1 - Two-phase flow patterns and film thickness measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(1), 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.08.004>

- Ong, C. L., & Thome, J. R. (2011b). Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 2 - Flow boiling heat transfer and critical heat flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(6), 873–886. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.12.003>
- Qu, W., & Mudawar, I. (2003). Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(15), 2737–2753. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00044-9)
- Qu, W., & Mudawar, I. (2004). Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(10–11), 2045–2059. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.12.006>
- Rui, Z., Sun, H., Ma, J., & Peng, H. (2023). Experimental study and prediction on the thermal management performance of SDS aqueous solution based microchannel flow boiling system. *Energy*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128747>
- Stephan, K., & Preuder, P. (1979). Wärmeübergang und maximale Wärme-stromdichte beim Behaltersieden binärer und ternärer Flüssigkeitsgemische. *Chemie Ingenieur Technik*, 51, 37.
- Tibirică, C. B., Rocha, D. M., Sueth, I. L. S., Bochio, G., Shimizu, G. K. K., Barbosa, M. C., & Ferreira, S. dos S. (2017). A complete set of simple and optimized correlations for microchannel flow boiling and two-phase flow applications. *Applied Thermal Engineering*, 126, 774–795. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.161>
- Warrier, G. R., Dhir, V. K., & Momoda, L. A. (2002). Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 53–64. www.elsevier.com/locate/etfs
- Wojtan, L., Revellin, R., & Thome, J. R. (2006). Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(8), 765–774. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.03.006>
- Wu, Y. W., Su, G. H., Hu, B. X., & Qiu, S. Z. (2010). Study on onset of nucleate boiling in bilaterally heated narrow annuli. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(5), 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.11.010>
- Zhang, W., Hibiki, T., & Mishima, K. (2010). Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1–3), 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.011>
- Zhang, Y., Wu, H., Zhang, L., Yang, Y., Niu, X., Zeng, Z., & Shu, B. (2023). Flow Pattern Study and Pressure Drop Prediction of Two-Phase Boiling Process in Different Surface Wettability Microchannel. *Micromachines*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/mi14050958>

**KÖMÜR ve KÖMÜRÜN PİROLİZİ****Öğr. Gör. Dr. Betül ŞAHİN**

Trabzon Üniversitesi, Beşikdüzü Meslek Yüksekokulu, Trabzon / Türkiye ORCID: 0000-0002-5205-3054

Özet

Dünya nüfusunun artması, büyüyen sanayi ve gelişen teknoloji enerji talebini artırmıştır. Birincil enerji kaynağı olarak hala fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak fosil yakıtların aşırı ve bilinçsiz kullanımı neticesinde oluşan hava kirliliği, sera gazı, iklim değişikliği gibi negatif sonuçlar söz konusudur. Bu sebeple araştırmacılar temiz, güvenilir, sürdürülebilir alternatif enerji kaynakları arayışı içindedirler. Öte yandan eldeki fosil yakıtların verimli ve güvenli bir şekilde değerlendirilmesi de gündemini korumaktadır. Araştırmacılar, önemli fosil kaynaklarımızdan biri olan kömürün 300 yıldan fazla rezervi olduğunu ön görmektedirler. Bu sebeple kalan rezervin akılcı kullanımı önem arz etmektedir. Kömür, termokimyasal bir işlem ile havasız bir ortamda bozundurulmuş katı, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilmektedir. Piroлиз denilen bu işlem, yakıt iyileştirme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile kömür ısıtılarak uçucu bileşenlerinden ayrıştırılır. Geriye kalan kömür artık daha sert, gözenekli, sünger yapıları ve karbon oranı oldukça yüksek bir kömürdür. Uçucu bileşenlerinden ayrıştırılan kömür, yanma sonucu ürünlerinden olan başta kül gibi kirleticilerden önemli oranda ayrılmıştır. Ayrıca bu işlem ile yanma kalitesi ve verimi yüksek, ısı transferi ve ısı transfer süresi iyileştirilmiş bir yakıt elde edilebilir. Kömürün koklaştırılma derecesi koklaştırılacak kömürün mahiyetinin yanı sıra elde edilmek istenen ürünlere bağlı olarak da değişebilmektedir. Bu çalışmada, kömür ve kömür türleri hakkında bilgi verildikten sonra kömürün piroliz süreçleri hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kömür, Piroлиз, Yakıt iyileştirme**COAL AND PYROLYSIS OF COAL****Abstract**

The increase in the world population, the growing industry and the developing technology have increased the demand for energy. Fossil fuels are still used as the primary energy source. However, there are negative consequences such as air pollution, greenhouse gases and climate change that occur as a result of excessive and unconscious use of fossil fuels. For this reason, researchers are in search of clean, reliable, sustainable alternative energy sources. On the other hand, the efficient and safe use of available fossil fuels remains on the agenda. Researchers estimate that coal, one of our important fossil resources, has reserves of more than 300 years. For this reason, rational use of the remaining reserves is important. Coal can be converted into solid, liquid and gaseous fuels by decomposing it in an airless environment through a thermochemical process. This process, called pyrolysis, is one of the fuel treatment methods. With this method, coal is heated and its volatile components are separated. The remaining coal is now harder, porous, sponge-structured and has a very high carbon content. Coal, which is separated from its volatile components, is significantly separated from the pollutants such as ash, which are the products of combustion. In addition, this process produces a fuel with high combustion quality and efficiency, improved heat transfer and heat transfer time. The degree of coking of coal varies depending on the nature of the coal to be coalification, as well as the products desired to be obtained. In this study, after giving information about coal and coal types, information about coal pyrolysis processes is given.

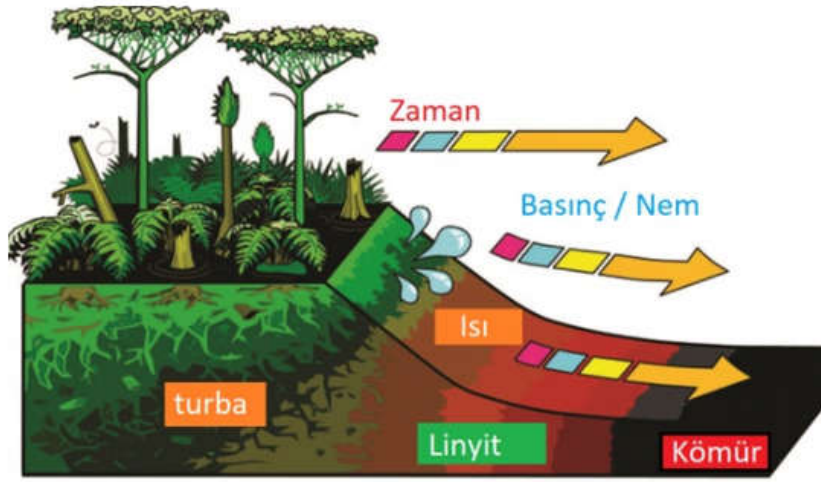
Keywords: Coal, Pyrolysis, Fuel improvement**GİRİŞ**

Isınma ve pişirme için çok uzun yıllar doğada bulunan orman atıkları, hayvan atıkları, odun gibi biyolojik yakıtlar kullanılmıştır. Ancak fosil yakıtlar biyoyakıtlara göre daha kısa zamanda daha fazla enerji sağladıkları

için zaman içerisinde kullanımları yaygınlaşmış, en çok tercih edilen yakıt haline gelmiştir. Özellikle sanayi devrimi sonrasında aşırı ve dengesiz kullanımı fosil yakıtların çevreye saldığı emisyonların tehlikesini daha hissedilir hale getirmiştir. Sebep olduğu hava kirliliği atmosferde bir sera etkisi yaratarak dünyayı sarmış ve iklim değişimine sebebiyet vermiştir (Doğanay H. & Coşkun O. 2020, Kademli M. 2020). Bu sebeple araştırmacılar fosil yakıtların dengeli ve verimli şekilde kullanılmaları üzerine çalışmalarını yoğunlaştırırken öte yandan alternatif enerji kaynakları arayışına girmişlerdir. Uzun yıllardır kullanılagelen fosil yakıtların yerini alternatif enerji kaynaklarının alması maddi olarak oldukça külfetlidir. Bu süreçte ülkelerin destekleyeceği doğru yatırımlarla alternatif enerji kaynaklarının fosil yakıtların yerini alması mümkün görünmektedir (Şahin & Şahin, 2024). Ancak belli bir zaman gerekeceği de aşikardır. Bu süreçte elde ki fosil yakıtların güvenilir ve verimli şekilde kullanılması önemlidir.

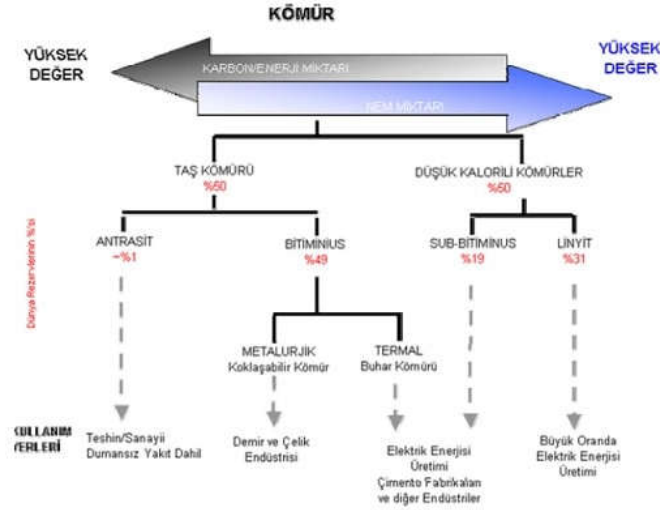
1.Kömür

Fosil yakıtlardan biri olan kömür, organik bir yakıttır ve yanabilen sedimanter bir kayadır. Bitki kalıntıları ve organik olan diğer tüm maddeler yeryüzüne gömüldükten sonra sıcaklık, basınç ve zaman etkisiyle kömüre dönüşürler. Bu oluşum milyonlarca yıl sürer. Şekil 1’de kömür oluşumu görülmektedir.



Şekil 1. Kömür oluşumu (<https://www.tki.gov.tr/enerji-ve-komur>)

Milyonlarca yıl süren bu zaman içinde kömür fiziksel ve kimyasal değişimlere maruz kalır. Kimyasal ve fiziksel dönüşümleri her kömürde farklı olduğundan heterojen bir yapıya sahiptir. Heterojen yapısı sebebiyle formülize edilebilmesi hayli zordur. Bileşenleri kömürleşme derecesine göre farklılıklar gösterir. Şekil 2’de kömürleşme ürünlerinin sınıflandırılması görülmektedir (Topaloğlu et al., 2020, Karayığit & Köksoy, 1998).



Şekil 2. Kömürleşme Ürünlerinin Sınıflandırılması (<https://www.thesisat.org/komur-nedir-nasil-olusur.html>)

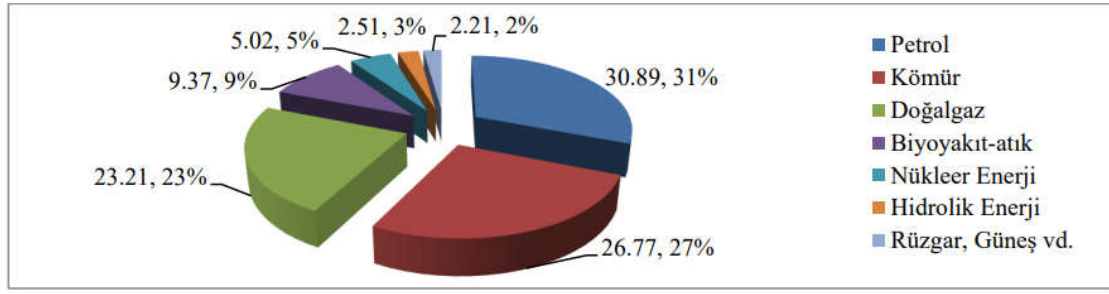
Bitkilerin ölümü kömürleşme sürecinin başlangıcını oluşturur. Ölen bitkiler mikroorganizmalar yardımıyla parçalanır. Ancak bataklık alanları, göller gibi sulak alanlarda mikroorganizmalar ölü bitkileri parçalamak için yeterli oksijen bulamazlar. Dolayısıyla mikroorganizmalar çürümeyi gerçekleştiremezler. Böylece ölü bitkiler organik yapılarını muhafaza ederler. Neticede ölen bitkiler üst üste birikir ve zaman içerisinde bu birikim tabakalara dönüşür. Bu tabaka kömürleşme sürecindeki ilk adımdır. “Yığın” ve “turf” adı verilen bu dönemde ki organik maddeye turba denir. Turba karbon oranı en düşük kömürdür.

Su ve toprak hareketleri, jeolojik süreçlerle birlikte zaman içerisinde turba birikintilerini başka maddelerle sarılmasına sebep olur. Sarılan turba zaman içerisinde sıkışır ve içeriğindeki su miktarı azalır. Su buharı bünyesinden uzaklaştıkça turbanın organik madde miktarında artış görülür. Zaman ilerledikçe basınç ve sıcaklığında etkisi ile birlikte turba linyite dönüşür. Linyit, turba gibi karbon oranı çok yüksek olmayan bir kömürdür, kırılğan bir yapıya sahiptir ve yumuşaktır. Fosilleşmeye uğrayan en yeni kömürlerden biri olan linyitin bileşiminde hümitik asit ve hümitik maddeler bulunur. Kalitesi düşük olduğu için linyit kömürü çok değerli değildir. Bünyelerinde çok miktarda nem tutarlar. Bileşenlerinde kükürt oranı yüksektir. Genellikle çıktıkları yerlerde kullanılırlar. Örneğin termoelektrik santrallerinde elektrige dönüştürülürler. Bunun yanında özel ocaklarda, kireç ocaklarında, kalorifer ocaklarında sıkça tercih edilirler. Ortalama olarak yanma sıcaklıkları 1260°C’yi bulur. Sarı linyit, esmer linyit, kara linyit, yağlı linyit gibi linyit çeşitleri mevcuttur (Civaoğlu, 1963).

Linyitin, basınç ve ısının etkisiyle beraber zaman içerisinde bünyesindeki karbon oranında artış görülür. Yapısında ki su buharı uzaklaşmaya devam eder ve bu süreç böylece ilerler. Ortalama 70 milyon yıl süren bir zaman içerisinde bitümlü kömür adı verilen kömür türleri oluşur. Zaman ilerledikçe, basınç ve sıcaklık arttıkça kömürdeki karbon oranında artış görülür. Renk koyulaşmaya ve parlaklaşmaya başlar. Yumuşak yapısı gittikçe sertleşir.

Oluşan bitümlü kömür ve türevleri ilerleyen zaman, sıcaklık ve basınç etkisiyle bünyesindeki su buharından ve uçucu bileşenlerinin çoğundan ayrılır ve antrasit kömürünü oluşturur. Antrasit en yüksek karbon içeriğinde sahip olan kömürdür. Aynı zamanda en parlak renkli ve sert yüzeyle kömürdür. Bir organik maddenin antrasit kömürüne dönüşümü 300 milyon yıl sürmektedir (Turan, 2009, Delibalta, 2024).

Çok zorlu aşamalardan geçerek oluşan kömür, jeolojik süreçlerin etkisiyle yer altına inebilir veya yerüstüne doğru hareket edebilir. Elektrik üretiminde, demir çelik üretiminde, kimyasal ürünlerin üretiminde kısacası endüstrinin birçok alanında ve evsel ısınlalarda kullanılır. En çok kullanılan fosil yakıtlardan biri olan kömür, insanlık tarihinin gelişiminin en önemli parçalarından biridir. Kömür, Dünya’nın genel enerji kullanımının %26,77’sini oluşturmaktadır (Arı & Yılmaz, 2023). Şekil 3’de 2019 yılında dünyanın genel enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 3. Dünya'nın genel enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı (2019) (Arı & Yılmaz, 2023).

Araştırmacılar, kömürün üç yüz yıldan fazla rezervi olduğunu iddia etmektedirler. Bu rezervin doğru bir şekilde kullanımı ile zararları minimuma indirilerek maksimum fayda alınması mümkündür. Bunun yanında kömürü farklı enerji türlerine dönüştürerek taşınması, dağıtımını, kullanımını gibi engellerinde aşılabilmesi imkan dahilindedir. Çeşitli kömür teknolojileri kullanılarak kömür, katı, sıvı gaz yakıtlara dönüştürülebilmektedir. Bu yöntemlerden biri de pirolizdir.

2. Kömürün Pirolizi

Piroliz, bir yakıtın havasız bir ortamda ısı verilerek bozundurulması işlemi olarak tanımlanabilir. Kömür karbonize edilirken ulaştığı sıcaklığa göre çıkan ürünleri de değişiklik gösterir. Kömür pirolize alındığında 300°C sıcaklıkta sıvı ve katran çıkışı başlar yaklaşık 500-600°C civarında ise bu çıkış sonlanır. Gaz ayrılması ise 900-1000°C civarına kadar devam eder. Kömür, karbonize edildiği sıcaklığa göre isimlendirilir. 600°C'a kadar olan işlemlere düşük sıcaklık karbonizasyonu denir. 900°C'e kadar olan işlemlere orta sıcaklık karbonizasyonu, 900°C'den yüksek sıcaklıklardaki karbonizasyona ise yüksek sıcaklık karbonizasyonu denilmektedir.

Kömür piroliz işlemi kömüre ısı verilerek başlatılır. Kömürde önce birincil piroliz tepkimeleri ardından da ikincil piroliz tepkimeleri gerçekleşir. Önce kimyasal bağlar parçalanarak ısıl parçalanma gerçekleşir ve serbest radikallerin oluştuğu görülür. Bu serbest radikaller başka atomlarla birleşerek yeni kararlı yapılarına dönüşürler. Oluşan bu kararlı bileşiklerin hafif olanları katranı, ağır olanları ise char'ı oluştururlar. Kömürdeki uçucu bileşiklerin taşınımı, uçucu bileşenlerin kömür taneciklerinin üzerine yapışarak, kömür yüzeyinden gaz fazına taşınarak, gaz fazında ise reaktörün sıcak alanlarından soğuk alanlarına doğru taşınarak gerçekleşir. Bu parametrelerin ilk ikisi için kömürün tanecik büyüklüğü, gözenek yapısı, gaz hızı ve uygulanan dış basınç etkindir. İçerisinde piroliz işlemi gerçekleştirilen reaktörün yapısı ve piroliz süreci ise son aşamayı etkiler. Uçucu bileşenlerin dönüşüm tepkimeleri, gazların tepkimeye girme yeteneklerine krakinge ve son olarak reaktördeki uçucu giderme işlemlerine göre değişiklik gösterilebilir (Turan, 2009).

Kömürün piroliz aşamaları;

Isıtma: Kömür, oksijensiz bir ortamda yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Bu sıcaklık genellikle 400-800°C arasında değişir. Bu aşamada kömürün bileşiminde kimyasal değişiklikler başlar.

Gazlaşma: Sıcaklık arttıkça, kömürdeki uçucu maddeler, karbon, metan, karbon monoksit, hidrojen ve diğer gazlar olarak serbest kalır. Bu gazlar, piroliz gazları olarak adlandırılır ve enerji üretiminde kullanılabilir.

Katı kalan maddeler: Piroliz işlemi sırasında kömürün karbon oranı artar ve geriye kömürün piroliz kalıntısı olarak bilinen katı maddeler kalır. Bu katı maddeler, kömürün daha yoğun ve yüksek kalorifik değere sahip bir formunu oluşturur.

Yağlar ve katı organik bileşikler: Piroliz sırasında oluşan gazlar ve sıvılar, bir dizi kimyasal bileşik içerir. Bu bileşiklerin bazıları, sıvı yakıtlar veya kimyasal ham maddeler olarak kullanılabilir (Karayigit & Köksoy, 1998).

2.1. Pirolizi Etkileyen Değişkenler

Kullanılan kömürün özelliklerine bağlı olarak kömürün pirolizinden katı, sıvı, gaz yakıtlar elde edilebilmektedir.

Gaz ürün çıkışı: Piroliz işlemine tabi tutulan kömürün bağlarında kırılmalar olur. Bu kırılmalar neticesinde H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈ gibi hidrokarbonlar, CO ve CO₂ gibi düşük molekül ağırlıklı maddelerin çıktığı görülür. Bunun yanında kükürt gibi istenmeyen kirletici nitelikteki gaz çıkışlarının olduğu da görülür.

Sıvı ürün çıkışı: Kömürün pirolize edilmesiyle açığa çıkan sıvı ürünlere katran veya pirolitik yağ adı verilir. Bu sıvı başlarda sarı reçinemi bir görüntüdedir. Ancak zamanla koyulaşarak siyah renge döner. Pirolize tabi tutulan kömürden oluşan sıvı yakıt, kömürün içerisindeki karbon, hidrojen oksijen atomlarının oranlarına ve piroliz sürecine bağlı olarak değişiklik gösterir. Kömür içerisinde oksijen miktarı arttıkça çıkan sıvı yakıt oranında artış görülür.

Katı ürün çıkışı: Kömür pirolize uğradığında char adı verilen katı bir yakıt oluşur. Oluşan bu yakıtta piroliz öncesi kömüre oranla kükürt içeriği azalmakta azot içeriği ise artmaktadır.

Kömürün piroliz işlemi, kömürün özelliklerine ve işlemin değişkenlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Tablo 1'de kömürün pirolizini etkileyen değişkenler görülmektedir.

Tablo1. Kömürün pirolizini etkileyen değişkenler (Karayığit & Köksoy, 1998).

Kömür özellikleri	İşlem değişkenleri
Rank	Sıcaklık
Organik yapı	Isıtma hızı
İnorganik yapı	Reaktörde kalma süresi
Tanecik boyutu	Reaktör geometrisi
Gözeneklilik	Katalizör
	Gaz ortamın özellikleri (İnert gaz, reaktif gaz, basınç)

3. Kömür Özelliklerinin Pirolize Etkisi

Kömürlerin kömürleşme derecesine göre sıralanmasına kömür rankı denir. Bu tanım aynı zamanda kömürün kalitesini ve sıralamasının da temel belirleyicisidir. Bununla beraber kömürün yaşı da kömürün kalitesinin bir diğer önemli belirleyicisidir. Bu özelliklerin değişkenliğine bağlı olarak kömürün bileşenleri de değişiklik gösterir. Tablo 2'de bazı kömürlerin üst ısıl değer, alt ısıl değer ve yüzde bileşenlerinin tablosu görülmektedir.

Tablo 2. Bazı kömürlerin üst ısıl değer, alt ısıl değer ve yüzde bileşenleri (Karayığit & Köksoy, 1998).

CİNSİ	ÜİD kcal/kg	AİD kcal/kg	KÜL %	H ₂ O %	C %	H %	N %	S %	O %
Yağlı taş kömürü	7700	7440	6	5	88.5	5	1.57	1.05	3.83
Yağsız taş kömürü	7640	7430	9	3	91.8	4	1.41	0.91	2.5
Gazlı taş kömürü	6850	6600	6	8	82	4.7	1.4	1.2	9.8
Alevli taş kömürü	6330	6100	6	8	8.9	4.7	1.4	1.2	9.8
Ham linyit	2400	2120	2.4	5.9	56.5	5.5	3.5	0.1	34.4
Linyit	5640	5380	11	10	73.2	5.1	1.5	7.1	13.1

Katı yakıtlarda gaz ya da sıvı yakıtlarda olduğu gibi tek bir kimyasal denklemden bahsedebilmek mümkün değildir. Özellikle uçucu bileşenleri, kül ve nem gibi yanmada sınırlı oranda istenen özellikleri kömürün

doğrudan yakılmasıyla birçok zararlı çıktıya sebep olur. Bu sebeple piroliz gibi yöntemler kullanılarak kömürün yakıt değeri iyileştirilebilir aynı zamanda emisyon miktarı da bir noktaya kadar kontrol altına alınabilir.

Kömürlerin yapılarındaki farklılık sebebiyle bitümlü kömürden görece daha genç bir kömür olan linyite doğru gidildikçe içerisindeki uçucu bileşenlerinde artış görülür. Karbon oksitleri, hidrokarbonlar ve su buharı artar. Katran miktarı ise düşer. Dolayısıyla aynı şartlar altında pirolize tabi tutulan iki farklı kömürün piroliz sonucu ürünleri de farklılık gösterir (Sayın et al. 2021).

Sonuçlar

Kömürün piroliz işlemi bir reaktör içerisinde oksijensiz bir ortamda gerçekleştirilir. Reaktörde kömür ısıtılarak bozundurulur. Kömürün piroliz işlemi ortalama olarak 400°C-900°C aralığında gerçekleştirilir. Isıtılma işlemi sonrasında kömür termal olarak ayrışır. Gaz, sıvı ve pirolitik kömür de denilen katı ürünler açığa çıkar. Piroliz işlemi sayesinde kömürdeki enerji miktarı iyileştirilmiş olur. Böylece kömürün yanması sonucu açığa çıkacak kirleticilerin miktarı azaltılır. Katı, sıvı ve gaza dönüşen yakıt formlarının taşınması ve kullanımı daha kolaylıkla gerçekleştirilir. 400°C - 500°C aralığında gerçekleşen yavaş piroliz işlemi ile sıvı ve katı ürün çıkışı yüksekken gaz ürün çıkışı daha az görülür. 500°C - 700°C aralığında gerçekleşen orta sıcaklıktaki bir pirolizde yüksek verim elde edilir. Gaz ve sıvı ürün çıkışlarının kalitesi artar. Metan, etilen, asetilen gazları ve organik sıvı çıkışları gözlemlenir. 700°C - 900°C aralığında gerçekleşen hızlı piroliz ile gaz ürün çıkışlarında artış görülürken sıvı ürün çıkışı azalır. Katı ürün çıkışı olan pirolitik kömür de de bir kalite artışı görülür. Piroliz işleminde seçilecek olan sıcaklık aralığı kömürün tipine, ne kadar zaman içerisinde işlemde kalacağına, hangi nihai ürünlerin istendiğine göre karar verilerek en uygun seçim yapılır. Kömürün piroliz işlemi sonrasında çıkan metan, etilen, asetilen, karbon dioksit ve karbon monoksit, vb. gibi gazlar kimya sanayi başta olmak üzere enerji üretiminde kullanılabilirler. Çıkan katı ürünün yani pirolitik kömürün ise karbon içeriğinde ve enerji değerinde artış olduğu izlenir. Kömürün pirolizi sonrasında antrasit gibi yüksek kaliteli kömürlerden katı ürün çıkışı yüksek olurken linyiti gibi genç kömürlerden ise gaz ürün çıkışının yüksek olduğu gözlemlenir.

Pirolize tabi tutulan kömürün, piroliz işlemi neticesinde yakıt kalitesinin iyileştiği ve enerji veriminde artış olduğu görülmektedir. Bunun yanında sera gazı etkisi yaratacak kirleticilerin salınımının azaltılması ve karbon ayak izinin minimuma indirilmesi potansiyeli dikkat çekicidir. Bu sebeple kömürün pirolizi alternatif bir enerji kaynağı olması bakımından da önemli bir noktadadır. Sonuç olarak kömürün piroliz işlemine tabi tutulmasıyla ekonomik, çevre dostu ve daha yüksek kaliteli yakıtlar elde etmek mümkündür.

Kaynaklar

Arı F., Yılmaz V. (2023). Türkiye’de ve Dünya’da enerji kaynaklarının genel görünümü ve alternatif enerji kaynaklarının önemi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 496-519.

Delibalta, M. S. (2024). Türkiye kömür rezervlerinin rasyonel değerlendirilmesi ve ekonomik önemi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 1-1.

Doğanay H., Coşkun O. (2020). Enerji kaynakları. *Pegem Akademi*, Ankara.

Civaoğlu İ. (1963). Yanma kimyası ve tabii katı yakacaklar-Cilt-I. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Enerji Atlası. Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller.

Figueiredo, J.L.; Moulijin, A.,J. (Eds). (1986). Carbon and coal gasification, NATO-ASI Series No.105, The Netherlands.

Kademli M. (2020). Temel enerji kaynakları. *Nobel Yayınevi*, Ankara.

Karayiğit, A.İ., Köksoy, M. (1998). Kömür, özellikleri, teknolojisi ve çevre ilişkileri, kömür, 59-70, Ed. Kural, O. *Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.*, İstanbul.

<https://www.tki.gov.tr/enerji-ve-komur> 19.11.2024

<https://www.thesisat.org/komur-nedir-nasil-olusur.html> 19.11.2024

<https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-komur> 19.11.2024

<https://www.enerjiatlası.com/komur/> 19.11.2024

Sayın C., Balki M.K., Erdoğan S. (2021). Yakıtlar ve yanma, *Nobel Yayınevi*, Ankara.

Şahin B., Şahin Y. (2024). Yenilenebilir enerji kaynakları ve yeşil finans: Bibliyometrik bir bakış. *Kesit Akademi Dergisi*, 454-474.

Topaloğlu B., Özcan H., Sungur. (2020). Yakma sistemleri. *Nobel Yayınevi*, Ankara.

Turan A. Z. (2009). Linyit biyokütle karışımlarının oksijen ortamında yakılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek lisans tezi, Fen bilimleri enstitüsü, 133.

APPLICATION OF NORTH WEST CORNER OPTIMIZATION METHOD TO RURAL ELECTRIFICATION USING RENEWABLE ENERGY SOURCES

Bello Ibrahim Monday¹, Habeeb Bolaji Onisabi², Olojede Abayomi Opeyemi³, Bankole Mustapha Olatunji⁴, Abbas Hussein Enezoza⁵

¹Federal University Lokoja, Faculty of Science, Department of Mathematics, Lokoja, Nigeria.

²Federal University of Technology, Minna, Faculty of Social Science, Department of Geography, Minna, Nigeria.

³Federal University Lokoja, Faculty of Science, Department of Mathematics, Lokoja, Nigeria.

⁴Federal University Lokoja, Faculty of Science, Department of Mathematics, Lokoja, Nigeria.

⁵Federal University Lokoja, Faculty of Science, Department of Geology, Lokoja, Nigeria.

Abstract

Rural electrification is critical for socio-economic development in underserved areas. However, conventional grid extension is often unfeasible due to high costs and geographic constraints. This research applies the North West Corner (NWC) method to optimize the distribution of renewable energy sources (RES) such as solar, biogas, and biomass to meet rural electricity demand efficiently. The study incorporates cost minimization and demand satisfaction constraints. In Kogi State, there are villages that are off-grid. A case study is performed to confirm the effectiveness of the approach, highlights the resilience of the developed framework. Results indicate that the NWC method offers a cost-effective, scalable framework for rural electrification projects. The findings advocate for using optimization techniques to achieve equitable rural electrification and promote local renewable energy integration for economic growth.

Keywords: North West Corner method, Renewable energy sources, Rural electrification, Cost-effective distribution

Introduction

Rural electrification plays a critical role in promoting sustainable development, as it significantly impacts various aspects of human and economic progress. Electricity access enhances education by facilitating modern teaching tools, extending study hours, and equipping schools with better infrastructure. In healthcare, it powers vital medical equipment, ensures effective vaccine storage through cold chains, and provides lighting for rural clinics, ultimately improving health outcomes and reducing mortality. In agriculture, electricity boosts productivity through irrigation systems, mechanized farming, and food processing. Additionally, it fosters economic growth by supporting small businesses, cottage industries, and local entrepreneurial ventures. Despite its immense potential to transform lives, achieving universal electricity access remains a daunting challenge in many developing regions. Obstacles such as inadequate infrastructure, the high initial cost of grid extensions to remote areas, and limited financial capacity among rural populations hinder progress. Traditional methods of electrification, such as expanding the national grid, are often impractical due to the financial and geographical difficulties posed by sparsely populated and isolated locations.

Renewable energy sources (RES), including solar, wind, biomass, and biogas, present a sustainable and innovative solution to these challenges. These energy sources are abundant, environmentally friendly, and increasingly affordable due to advancements in technology. Their modular and decentralized nature makes them ideal for powering remote communities through solutions like microgrids and standalone systems, bypassing the need for costly grid extensions. However, the success of RES-based electrification depends on meticulous planning and effective resource allocation to maximize their potential. Optimization techniques such as the North West Corner Method (NWCM) can play a crucial role in ensuring the efficient implementation of RES projects. NWCM is a traditional optimization algorithm commonly used in logistics and supply chain management. It systematically allocates resources starting from the "northwest" corner of the allocation matrix, balancing supply and demand while minimizing costs. By distributing resources efficiently and meeting demand constraints, NWCM ensures cost-effectiveness in complex allocation scenarios. Although

NWCM has been widely applied in transportation and distribution, its potential in the energy sector, particularly for rural electrification using renewable energy remains largely untapped. This study aims to explore how NWCM can be utilized to optimize planning and resource allocation for renewable energy systems. By applying NWCM, the research seeks to develop equitable and cost-efficient energy solutions tailored to address the financial constraints and energy needs of underserved rural communities.

The outcomes of this research could significantly contribute to the advancement of sustainable rural energy systems, encouraging the wider adoption of renewable technologies while promoting efficient resource utilization. By leveraging NWCM, policymakers and stakeholders can enhance the planning and management of energy generation, distribution, and consumption, paving the way for universal electricity access and sustainable development. **IRENA (2023)**: This study emphasizes that decentralized renewable energy systems, particularly solar and wind, have become a cost-effective solution for electrifying rural areas. The authors provide a global overview of successful solar microgrid installations in Africa and Asia, highlighting scalability and ease of deployment. **UNDP (2020)**: The UNDP report discusses the socioeconomic benefits of rural electrification using renewable energy. It emphasizes improved education, healthcare, and economic productivity in communities with access to renewable energy systems. **Adeyemi et al. (2022)**: The study illustrates the practical use of biogas in rural electrification. Biogas systems utilize agricultural and livestock waste to produce clean energy for cooking and electricity. These systems also promote waste management and environmental sustainability.

Singh et al. (2022): Biogas microgrids were highlighted as a cost-effective option for communities with sufficient organic waste. **Singh et al. (2022)**: Biomass energy systems were found to reduce pollution and ensure a consistent power supply in regions rich in agricultural residues. The use of gasification techniques to convert biomass into energy was particularly notable. **Akande et al. (2023)**: Emphasized the role of geospatial tools in identifying suitable locations for biomass power plants. **Solar: Kumar et al. (2023)**: Solar energy has become a leading option for rural electrification due to technological advancements in photovoltaic (PV) panels, reduced costs, and easy installation. Solar mini-grids have successfully powered schools, clinics, and households in remote areas. **Goswami et al. (2022)**: Explored hybrid solar systems that combine solar energy with other renewable sources like biomass to address variability in solar output. **Wind: Goswami et al. (2022)**: Although wind energy is site-specific, it has been successfully integrated into hybrid renewable energy systems to provide consistent power.

Optimization is critical to ensure efficient energy generation, distribution, and storage in renewable energy systems. The **North West Corner Method (NWCM)** is one such method that has shown promise in optimizing resource allocation for rural electrification. **Zhang et al. (2022)**: This review categorizes various optimization techniques, including NWCM, for energy systems. NWCM was identified as simple and effective, particularly for balancing supply and demand in multi-source energy systems. **Mishra & Singh (2019)**: Applied NWCM in solar energy distribution projects in rural India. The method ensured equitable distribution of electricity while minimizing transportation costs. **Uddin et al. (2018)**: Enhanced the NWCM for larger and more complex datasets, making it applicable to dynamic renewable energy systems.

Renewable energy networks often experience fluctuations in supply and demand. NWCM has been adapted to handle these dynamic conditions. **Chaturvedi et al. (2023)** integrated NWCM with IoT devices to monitor energy usage and adjust allocations in real-time. Microgrids are critical for rural electrification, and NWCM has been applied to optimize their design. **Abubakar et al. (2022)** used NWCM to allocate solar and wind resources to microgrids in Nigerian villages, achieving significant reductions in costs and improving system reliability.

NWCM is scalable and has been applied to large energy distribution networks. **Hasan et al. (2021)** explored its application in Bangladesh's rural electrification project, demonstrating its ability to handle large-scale solar energy distribution. While NWCM is simple and effective, it often requires additional methods for optimal results. **Kumar et al. (2020)** highlighted its limitation in scenarios where cost matrices are highly variable, recommending hybrid approaches for improved accuracy. Several case studies illustrate NWCM's success in renewable energy distribution. For instance, projects in Ethiopia, Kenya, and India have used NWCM to allocate solar, wind, and biomass resources, reducing costs and ensuring equitable energy access (**Mwangi et al., 2021; Tesfaye et al., 2022; Sharma et al., 2020**).

OBJECTIVES OF THE STUDY

- i. Establish an optimization framework using the North West Corner Method (NWCM) to allocate renewable energy resources efficiently in rural electrification projects.
- ii. Investigate how the NWCM can reduce the overall costs associated with the transportation, installation, and maintenance of renewable energy systems in rural areas.
- iii. Provide a decision-making tool for policymakers and stakeholders to allocate resources more effectively for rural electrification projects using the NWCM.

FORMULATION OF THE PROBLEM

The formulation of the transportation problem for rural electrification using renewable energy sources involves translating the real-world logistics scenario into a structured mathematical model. This model will allow the application of optimization techniques to minimize costs while ensuring that all supply and demand requirements are met. Below, the problem formulation is expanded with detailed descriptions of each component, including assumptions, mathematical expressions, and specific considerations for the rural electrification distribution network.

Problem Description and Assumptions

In the rural electrification distribution network within some selected local region in Kogi State, This research address the challenges of cost-effective rural electrification using renewable energy. sources like solar, biogas, and biomass. It emphasizes optimizing the distribution of energy resources from supply locations to rural areas with defined energy needs while accounting for varying transportation expenses. By applying the North West Corner Method (NWCM), an initial viable solution is formulated to reduce distribution costs and ensure fair access to energy. This strategy facilitates sustainable energy delivery, alleviates energy poverty, and fosters socioeconomic growth.

Assumptions:

- i. The transportation costs between supply and demand points are known and constant.
- ii. The supply at each depot is fixed and known in advance.
- iii. The demand at each retail outlet is fixed and must be met exactly.
- iv. No product loss occurs during transportation.
- v. The problem can be modeled as a linear program with continuous variables.

MATHEMATICAL ANALYSIS

To solve the transportation problem for rural electrification distribution network, we need to apply mathematical techniques that determine the optimal transportation plan. The following analysis breaks down the problem using standard transportation optimization methods:

Problem Setup

- i. Supply Points (Sources): S_1, S_2, \dots, S_m with supplies s_1, s_2, \dots, s_m .
- ii. Demand Points (Destinations): D_1, D_2, \dots, D_n with demands d_1, d_2, \dots, d_n .
- iii. Transportation Costs: c_{ij} is the cost to transport one unit from S_i to D_j .
- iv. Decision Variables: x_{ij} represents the quantity transported from S_i to D_j .

Objective Function

The goal is to minimize the total transportation cost Z , given by:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

This function sums up the products of the cost c_{ij} and the quantity transported x_{ij} across all routes.

Constraints

The model must satisfy the following constraints:

1. Supply Constraints:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq s_i \quad \text{for each } i = 1, 2, \dots, m$$

Each supply point S_i cannot send out more than its available supply.

2. Demand Constraints:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq d_j \quad \text{for each } i = 1, 2, \dots, n$$

Each demand point D_j must receive at least the required amount.

3. Non-Negative Constraints:

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{for all } i, j$$

The quantities transported cannot be negative.

METHOD

There are several methods used in transportation problem, but in this project we are only interested in Northwest corner method:

1. **Northwest Corner Method:** This is a simple and intuitive method that starts by allocating shipments in the northwest corner of the transportation tableau and then iteratively moves to the next available cell in a particular pattern until all supplies and demands are satisfied.

ALGORITHM

North West Corner Rule (N.W.C.R)

- i. Formulate the given problem as LPP and set up the problem in the tabular form known as transportation table.
- ii. Select the North-west (i.e., upper left) corner cell of the table and allocate the maximum possible units between the supply and demand requirements. During allocation, the transportation cost is completely discarded (not taken into consideration).
- iii. Delete that row or column which has no values (fully exhausted) for supply or demand.
- iv. Now, with the new reduced table, again select the North-west corner cell and allocate the available values.

- v. Repeat steps (ii) and (iii) until all the supply and demand values are zero.
- vi. Obtain the initial basic feasible solution.

RESULT

The research demonstrated that the North West Corner Method (NWCM) effectively minimized transportation costs while ensuring equitable distribution of renewable energy resources to rural communities. The method provided an initial feasible solution that met the energy demands of all communities without exceeding the supply capacity of any source. It proved scalable for larger distribution networks and practical for handling the logistical challenges of renewable energy systems.

Illustration 1:

Below is a transportation table showing the cost per unit (in naira) of energy sources distributing to four different communities using trucks. The supply and demand for each location is measured in truck load and the cost of transporting one truck load to each location in Kogi State varies in monthly.

Table 1: The balanced table for illustration 1

SOURCES/COMMUNITY	KABBA	OKENE	AYINGBA	IHIMA	QUANTITY SUPPLY
SOLAR	2000	2500	2200	3000	500
BIOGAS	2200	2600	2100	2800	450
BIOMASS	2150	2500	2450	2700	200
QUANTITY DEMAND	400	300	200	250	1150

We see that the total quantity available to be supplied is 500 and the total quantity demanded is 500, hence the transportation problem is balance.

THE NORTHWEST CORNER RULE (NWCR)

A balance table for illustration 1 in regards to northwest corner method

SOURCES/COMMUNITY	KABBA	OKENE	AYINGBA	IHIMA	QUANTITY SUPPLY
SOLAR	400	100			500
BIOGAS		200	200	50	450
BIOMASS				200	200
QUANTITY DEMAND	400	300	200	250	1150

Obtaining the optimal solution, we see that the number of allocated cells equals to $m + n - 1$ (where m is the number of rows and n is the number of columns) that is $3 + 4 - 1 = 6$ Hence, the solution is feasible solution.

The optimal solution is gotten as:

$$400(2000) + 100(2500) + 200(2600) + 200(2100) + 50(2800) + 200(2700) \\ = 2,670,000$$

CONCLUSION AND RECOMMENDATION

This research established that the North West Corner Method (NWCM) is an efficient and practical solution for optimizing rural electrification using renewable energy sources. The method effectively reduced transportation costs while ensuring fair distribution of energy resources, addressing the dual challenges of cost-effectiveness and equitable access. Its flexibility and scalability make it applicable to various energy distribution scenarios, ranging from small rural communities to extensive, dispersed networks. Beyond the technical benefits, the optimized energy allocation approach also significantly contributes to socioeconomic development by providing reliable energy access for critical services such as education, healthcare, and small-scale businesses. This, in turn, enhances living standards and economic opportunities in underserved regions.

Recommendations

- i. **Adopt the North West Corner Method for Initial Energy Allocation:** Policymakers and rural electrification planners are encouraged to adopt the North West Corner Method (NWCM) as a starting point for optimizing energy distribution. Its straightforward approach and cost-effectiveness make it well-suited for settings with limited resources and projects that demand prompt and practical solutions.
- ii. **Integrate Advanced Optimization Techniques:** While the NWCM provides an excellent starting point, it is recommended to incorporate advanced optimization methods, such as the Least Cost Method or Vogel's Approximation Method, to refine the solutions and further minimize costs.
- iii. **Expand Renewable Energy Infrastructure:** Governments and stakeholders should prioritize expanding the capacity of renewable energy sources such as solar, wind, and biomass to enhance rural electrification. This investment will ensure a reliable energy supply to accommodate increasing demand while enabling the distribution network to scale effectively.
- iv. **Develop Comprehensive Data for Transportation Costs:** Detailed and accurate information on transportation expenses and logistical obstacles is essential to refine energy allocation models. Collecting such data will enhance resource distribution efficiency and improve the overall viability and implementation of electrification projects.
- v. **Focus on Equitable Energy Access:** Efforts should focus on ensuring equitable energy distribution, providing underserved communities with sufficient energy to support essential services. This strategy fosters inclusivity and offers an effective solution to combat energy poverty.

REFERENCES

- Bansal, R. C., He, X., Kumar, A., Singh, A. R., & Rayudu, R. (2022). Feasibility analysis for renewable microgrid solutions in rural electrification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112224>
- Gupta, M., & Singh, N. (2023). Sustainable rural electrification with renewable energy: Optimization and cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111317>
- Gupta, R., & Jain, A. (2023). Hybrid renewable energy systems for rural electrification: A review of optimization techniques. *International Journal of Energy Research*, 47, 3742-3763. <https://doi.org/10.1002/er.7321>
- Khare, R., & Sinha, A. K. (2021). An improved methodology for transportation problems using Vogel's Approximation Method. *International Journal of Operations and Production Management*, 41(4), 571-591.
- Khan, M. A., & Sharma, S. (2019). Comparative study of various methods to solve the transportation problem. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 181(1), 150-165.
- Kizito, G., & Nneka, O. (2022). An evaluation of optimization techniques in distribution logistics: A Nigerian perspective. *Journal of Applied Mathematics and Logistics*, 12(3), 210-223.
- Kumar, A., He, X., Deng, Y., Singh, A. R., Sah, B., Kumar, P., Bansal, R. C., Bettayeb, M., & Rayudu, R. (2022). A sustainable rural electrification based on a socio-techno-economic-environmental-political

- microgrid design framework. *Energy & Environmental Science*, 15, 4213-4246. <https://doi.org/10.1039/D2EE01175A>
- Kumar, P., & Bansal, R. C. (2022). Techno-economic optimization for rural electrification using hybrid renewable systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 12, 473-485. <https://doi.org/10.21533/ijrer.v12i2.1223>
- Kumar, S., & Gupta, P. (2021). Optimization in supply chain management: A comparative study of North West Corner and Vogel's Approximation Methods. *Journal of Applied Optimization*, 9(2), 150-160.
- Li, Z., & Cheng, Y. (2023). A review of optimization models for freight transportation: Applications in beverage distribution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 171, 102-774.
- Marín, Á., & Codina, E. (2018). Algorithms for the transportation problem: Recent advances and applications. *Journal of Applied Operational Research*, 10(2), 67-82.
- Panigrahi, P., & Roy, A. (2022). Advances in transportation problem solving: Comparative performance of optimization algorithms. *Journal of Transportation Engineering*, 148(4), 0402-2013.
- Patel, K., & Paliwal, R. (2023). Energy optimization strategies for rural electrification: A case study from India. *Renewable Energy*, 205, 1107-1116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.025>
- Shukla, R., & Agarwal, A. (2024). Optimal hybrid power system for rural electrification: A techno-economic approach. *Renewable Energy*, 189, 1251-1263. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.053>
- Sharma, R., & Verma, S. (2023). Optimization of renewable hybrid systems for rural electrification in remote areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.106396>
- Singh, S., & Kumar, N. (2022). Optimization of hybrid renewable energy systems for off-grid rural electrification. *Renewable Energy*, 172, 1232-1245. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.066>
- Srinivasan, S., & Reddy, M. R. (2023). Optimization of renewable energy resource distribution for rural electrification. *Energy*, 253, 124339. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124339>
- Yadav, S., & Kumar, M. (2023). Optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in remote areas. *Energy Reports*, 9, 2245-2257. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.081>
- Zhang, L., Wang, Z., & Zhao, X. (2023). Cost-effective renewable energy solutions for off-grid rural areas: A case study. *Applied Energy*, 317, 119779. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119779>

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BIODIESEL PRODUCTION: A SYSTEMATIC REVIEW**Chisom C. Okpala^{*a}, Ifeoma F. Chukwuma^{ab}, Victor O. Apeh^c, Ozoemena E. Eje^a**^aDepartment of Biochemistry, University of Nigeria Nsukka, Enugu, Nigeria^bDepartment of Genetics and Biotechnology, University of Nigeria, Nsukka^cDepartment of Applied Sciences, Federal University of Allied Health Sciences, Enugu, Nigeria**Abstract**

The integration of Artificial Intelligence (AI) in biodiesel production has opened new frontiers for enhancing efficiency, sustainability, and scalability. This systematic review focuses on the application of AI in optimizing multi-feedstock biodiesel systems, which leverage diverse feedstocks such as vegetable oils, waste oils, animal fats, and microalgae to address feedstock scarcity and reduce production costs. AI technologies, including machine learning, neural networks, and genetic algorithms, are explored for their role in feedstock selection, process optimization, and supply chain management.

The review highlights how AI models predict oil content, optimize feedstock blending, and fine-tune reaction parameters like catalyst concentration and temperature, ensuring consistent biodiesel quality across variable inputs. Despite these advancements, challenges such as data scarcity, variability in feedstock properties, and high integration costs remain significant barriers.

The findings underscore the transformative potential of AI in revolutionizing multi-feedstock biodiesel systems by enhancing adaptability and reducing reliance on single feedstocks. Future research directions are proposed, including the development of robust datasets, the integration of AI with IoT for real-time monitoring, and AI-assisted synthetic biology approaches for feedstock engineering. This review provides valuable insights into the role of AI as a catalyst for advancing biodiesel production in a sustainable and economically viable manner.

Keywords: Biodiesel, Artificial Intelligence, Feedstocks, Multi-feedstock.

1.0 Introduction

The limited availability of the non-renewable fossil-based fuels and their inherent eco-toxicity tendencies upon combustion calls for alternative renewable and eco-friendly sources of fuels. This results to the continuous efforts being made to explore various suitable eco-friendly candidates that can either partially substitute or completely replace the conventional fossil-based fuels for power generation (Shokrani & Haghghi, 2020).

The biologically based diesel derived from the transesterification of feedstock such as vegetable oils has emerged as one of the leading alternative to the fossil-based fuels. Biodiesel as an alternative and renewable energy source offers significant advantages over the conventional petrodiesel, particularly in renewability, non-toxicity, biodegradability, superior lubricating characteristics, cleaner combustion, and lower emission profiles (Bharti et al., 2021). It has the potential to deliver comparable performance while significantly reducing the demand and reliance of the energy and transportation sector on various petroleum-derived fuels (Chaker Ncibi & Sillanpaa, 2014). Biodiesel is produced from vegetable oil through a transesterification reaction that is the reaction of triglycerides with alcohol in a specified time, temperature, mixing rate, and in the presence of catalyst producing fatty acids alkyl esters (biodiesel) and crude glycerol (Leung et al., 2010). Over the years biodiesel industries have been relying on the single feed stock system for the production of biodiesel. Biodiesel has been mainly produced from edible vegetable oils all over the world. Currently, more than 95% of the world biodiesel is produced from edible oils which are easily available on large scale from the agricultural industry. However continuous reliance on vegetable oil for the large scale production of biodiesel have some significant disadvantages such as high cost of raw materials, competition with food materials – the food versus fuel dispute (Mustafa, 2011), land availability and land use practices.

The raw material is a very important aspect to be considered in biodiesel industry as the cost of biodiesel is greatly affected by the processed raw material being used. Nowadays, feedstock equals at least 80 % of the costs associated with biodiesel production (Azizian & Kramer, 2005). Currently the high cost of biodiesel production stemming from the use of refined vegetable oil as raw materials poses as a major obstacle to the commercialization of the product. Moreover, the utilization of agricultural crops and edible oil for large-scale biodiesel production might cause food supply depletion and economic imbalance thus raising a potential conflict of “food vs. fuel” (Diego et al., 2017). In order to curb the adverse effects of the single feedstock system for biodiesel production, the multi-feedstock system is employed by biodiesel industries for the large-scale production of biodiesel. Alternative and non-edible sources of feedstocks such as residual or waste cooking oil (WCO), algae oil, non-edible vegetable oil, and residual animal fats are employed for the production of biodiesel due to its low cost and exemption from the food chain (Vilas Bôas, & Mendes, 2022). However, the challenge of using these cheaper raw materials are the presence of impurities, such as water and free fatty acids (FFA), which are common components in residual oils/fats (Mishra and Goswami, 2018). The interaction of FFA with water in the presence of an alkaline catalyst in the biodiesel production process reduces the quality of the biodiesel and calls for the various pre-treatment methods employed by scientists to reduce the FFA content of these raw materials (Mansir et al., 2017). Due to the complexity and nonlinearity of processes for biodiesel production and use, fast and accurate modeling tools are required for their design, optimization, monitoring, and control. Previous research has explored the role of AI technologies such as machine learning, neural networks and genetic algorithms in the production of biodiesel. Data-driven machine learning (ML) techniques have demonstrated superior predictive capability compared to conventional methods for modeling such highly complex processes (Mortaza et al., 2021). Presently, studies are directed towards the use of ML techniques for real-time process monitoring and control of biodiesel systems to enhance production efficiency, economic viability, and environmental sustainability.

Despite the widespread use of multi-feedstock system and the adoption of AI technology especially machine learning in biodiesel production and there is limited comprehensive reviews on the integration of multi-feedstocks and applications of various AI models in biodiesel synthesis. This article therefore gears towards the critical review of various AI models with a particular focus on ML, RSM, GA, and ANN in the production of biodiesel from multiple feedstocks.

1.1 Overview of multi-feedstock biodiesel systems

Feedstocks are essential components in the manufacturing of biodiesel because they accounts for 75% of the total production cost (Ali et al., 2016). The multi-feedstock biodiesel system leverages diverse raw materials, including vegetable oils, animal fats, used cooking oils, and algal oils, to produce biodiesel (Wan Nu et al., 2024). This approach addresses several challenges faced by conventional single-feedstock systems, such as fluctuating raw material prices, limited availability of specific feedstocks, and sustainability concerns. The feedstocks for biodiesel are largely categorized into; Edible vegetable oil: soybean, peanut, sunflower, palm oil, and coconut oil. Non-edible vegetable oil: rapeseed, jojoba, and waste cooking oil, jatropha tree (*J. curcas*), karanja (*P. pinnata*), tobacco seed (*N. tabacum* L.), rice bran, mahua (*M. indica*), neem (*A. indica*), rubber plant (*H. brasiliensis*) (Campanelli et al., 2010). Majority of these feedstocks have a high productivity of biodiesel due to the high concentration of triglycerides.

These feedstocks can be further categorized into;

1.1.1 First generation feedstocks which comprises of edible oil such as sunflower oil, rapeseed oil, olive oil, palm oil, soybean oil.

Palm oil is a very vital edible oil as 70 % to 90 % of palm oil is utilized in food industries and the rest is used in industrial applications. Globally, palm trees account for around 10% of biodiesel production and are proliferating rapidly (Szulczyk and Khan, 2018). Compared to other oilseeds such as soybeans, rapeseed or sunflower, oil palm is the most efficient and cost-effective biodiesel feedstock measured in terms of oil yield per unit hectare of cultivation land area per annum (Ali et al., 2019). However, the high cost of production is a major limitation to the use of this feedstock for biodiesel production.

1.1.2 Second generation feedstock made up of non-edible oil like Jatropha oil, castor oil, salmon oil, waste cooking oil (WCO), waste animal fat (Olatunji et al., 2019)

Jatropha is an oil seed plant cultivated in elevated temperature weather with sewage water. It is a promising raw material for biodiesel in Egypt and is mainly used for production of biodiesel in Asia and Africa (Rincón et al., 2014). Jatropha oil content changes based on species type but is about 46–58% in kernels and 40–60% in seeds. It also possesses similar properties to diesel such as the cetane number and calorific value (Sirisomboon et al., 2007)

1.1.3 The third-generation biodiesel feedstock is majorly microalgae, cyanobacteria and other single-celled oleaginous microorganisms (Oyedapo et al., 2019).

Microalgae are a group of organisms that can grow photosynthetically and accumulate large amounts of lipids (Christi, 2007). The microalgal feedstock systems, which include open ponds and closed photo bio reactors has the potential to overcome the varying limitations of the previous generations of feedstock because of their higher biomass yields than terrestrial crops per unit area, their ability to grow on non-arable lands, brackish or seawater, and they can be coupled with wastewater systems and industrial CO₂ sources, facilitating water remediation and decreasing CO₂ emissions (Diego et al., 2017).

1.1.4 Recently research has produced fourth-generation biofuels feedstocks. This generation of feedstock uses genetically engineered crops to enhance the quality or quantity of the obtained algal biofuel (Shokravi, 2019). The genetic and metabolic engineering is applied to improve the characteristics of oil-producing microorganisms, when the species isolated from nature does not meet the industrial requirements for biodiesel production (Abdullah et al., 2019).

1.2 Method of biodiesel production

Transesterification is a method widely employed in the synthesis of biodiesel because of its economic viability, particularly when produced at industrial scales. This method involves the reaction of oil or fat derived from feedstock with alcohol in the presence of a suitable catalyst create mono-alkyl esters of long-chain fatty acids and glycerol (Malek et al., 2023). Due to the FFAs and water content of the multi-feedstock, there's usually an occurrence of a saponification side reaction in the presence of an alkali catalyst. This reaction does not favour the synthesis of biodiesel because it decreases the quality and yield of the biodiesel produced. The major solution to this issue is by integrating multiple transesterification stages or by employing acid catalysis, however the later option is preferred because it is relatively cost effective and even more applicable due to the abundant source of catalytic materials from a waste product such as rice husk ash, chicken eggshells, fly ash, red mud, steel slag, and coconut shell and lime mud

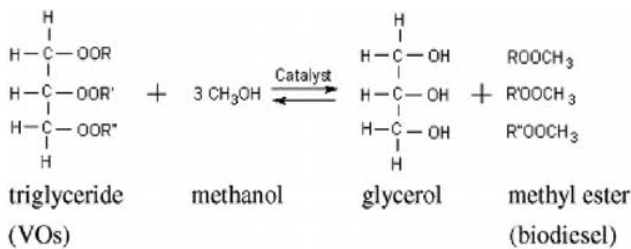


Figure 1: Transesterification of triglyceride and alcohol

Source: Kayode & Hart (2019)

The concentration of alcohol, the quantity of free fatty acids, the presence of water, the catalytic reaction, temperature, pressure, and duration are the primary variables impacting transesterification (Agarwal, 2007). The issue of FFA and water impurities in biodiesel feedstock can be solved by integrating multiple transesterification stages or by employing acidic catalysts to prevent saponification. Major types of transesterification in synthesis of biodiesel are the supercritical fluid transesterification and the catalytic transesterification

1.2.1 Supercritical Fluid Transesterification

Supercritical fluid transesterification is a catalyst-free chemical reaction between triglycerides, the main components of the feedstocks and low molecular weight ethanol or methanol in their supercritical state (Ngamprasertsith et al., 2011). This method employs a considerable amount of energy and incurs a high installation cost. During supercritical transesterification, a single-phase mixture is formed at approximately 350 °C with a decrease in the alcohol's dielectric constant. The reaction completes in about 3 mins, at the supercritical stage, and product purification is straightforward due to the absence of a catalyst. This approach allows the direct transesterification of unrefined vegetable oils, animal fats and waste oil bypassing the pretreatment steps (Feng et al., 2022). Nevertheless, the cost of production using this method remain relatively high compared to the catalytic approach.

1.2.2 Catalytic Transesterification

Catalysts are major constituents in the transesterification reactions of biodiesel production due to their ability to accelerate the rate of the reaction thus increasing the biodiesel yield. The types of catalyst used a divided into chemical and biological catalysts. The chemical catalyst investigated by researchers includes; homogeneous (acid or basic) catalyst, heterogeneous (acid or basic) catalyst and supercritical fluids (SCFs). Lipase is mostly employed as a biological catalyst in transesterification. These catalysts have been proven to be cost effective and eco-friendly in the large scale production of biodiesel (Shah et al., 2004).

a. Acid catalyst

Acids such as hydrochloric, phosphoric, sulphonic, and sulphuric acids have been used in the transesterification reactions of biodiesel generation. However, there's a preference of sulphonic acid over other acids (Fukuda et al., 2001). Although the acid catalyst generates a higher volume of biodiesel, the reaction rate is extremely slow and thus requires a higher oil:alcohol molar ratio and an extended reaction duration (Marchetti et al., 2007).

b. Basic catalysts

Basic catalysts are commonly used in biodiesel industries for large scale production of biodiesel due to their relatively cheap price, easy accessibility and market availability and their ability to accelerate transesterification under moderate reaction conditions efficiently. Major types of these catalyst include; potassium (KOH) and sodium (NaOH) hydroxide (Lam & Lee, 2011). They are usually preferred over acid catalyst due to their high transesterification activities at lower temperatures and pressures compared to acid catalyst which requires high temperatures (80-120) for transesterification to occur.

There is a prevalence in the use of base catalyst for biodiesel production because of their varying potentials such as their reuse ability, mildness, recoverability, reduce side saponification and ability to be synthesized from biomass (Kim et al., 2004). Homogenous catalyst (eg, KOH) in methanol has been used due to its numerous advantages such as high reaction rate, turnover frequency, selectivity, low cost, availability, and no need for hydrophobicity study. Additionally, heterogeneous base catalyst can be synthesized from waste or biomass which would further abate the environmental impact of solid wastes.

c. Enzymatic catalysis

Enzymatic transesterification is a type of catalytic transesterification that employs varying biological catalysts for the transesterification of triglycerides and alcohol. Lipase is the primary investigated biological catalyst in the transesterification of biodiesel. Unlike other conventional transesterification, enzymatic transesterification has ability transesterify feedstocks with high free fatty acid content. Enzymatic catalysis is a more efficient method of transesterification because the enzymatic reaction is more strategic than the other systems because of its higher product quality, no wastewater production, affluent product recovery, favourable reaction situations, and no saponification (Haldar & Nag, 2008).

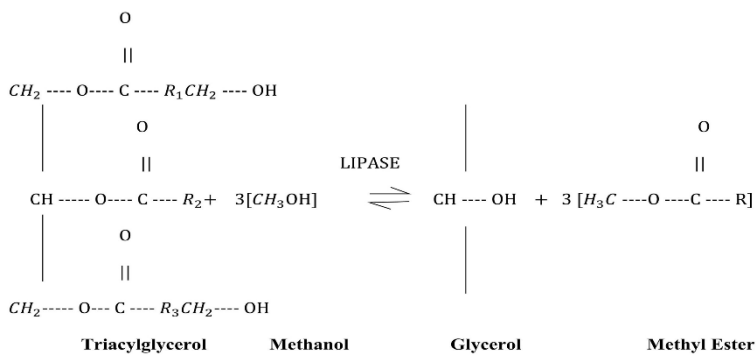


Figure 2: Lipase catalysed transesterification

Source: Baadhe et al. (2014)

1.3 Artificial Intelligence in Biodiesel Production

Artificial Intelligence refers to machines' ability to perform activities that mimic human intelligence. Currently research trends involve the application of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) to optimize the biodiesel process for improved yield and fuel quality. A variety of technologies have been employed to study the conversion of biomass feedstock into bioenergy products, such as biodiesel (Ferrari et al., 2020). This technologies offers a solution to issue data complexity, nonlinearity, and uncertainty of the operational parameters encountered in biodiesel production (Sukpancharoen et al., 2023).

Feedstock selection and blending are the first steps to consider in the biodiesel production process. The choice of feedstocks influences the cost, yield, and quality of biodiesel. Over 350 oil-producing plant crops are identified as potential sources for biodiesel production worldwide (Anwar, 2021). There is however a need to determine the type of oils to use or blend and the appropriate proportions in order to obtain a less viscous blend without compromising quality of the biodiesel produced. The use of trial by error experimental methods to assess the optimal production process parameters is cumbersome, complicated, expensive, time-consuming, and often results in acute material wastage. Thus the integration of data-based machine learning technology has been adopted to make informed decisions on factors such as the alcohol to oil ratio, catalyst concentration/dosage, reaction temperature, and reaction time which largely determine the success or failure of biodiesel synthesis to guarantee value for money on biodiesel production (Awogbemi & Kallon 2023).

1.3.1 Machine learning

Machine learning is a branch of artificial intelligence (AI) that allows systems to learn and improve from data without being explicitly programmed. This technology offers solution to the complex challenges (such as reactor configuration, stability, and operation) in the generation of biodiesel (Liu et al., 2023). The development of robust machine learning algorithms makes modeling of complex processes possible and enhances the optimization of . The ML models analyzes varying data sets (such as reaction temperature and time, catalyst types, and concentrations) for the biodiesel process to optimize and predict the yield during transesterification (Shelare et al., 2023). Some powerful machine learning algorithms; Linear regression, Principal Component Analysis (PCA), Decision Trees (DT), Genetic Algorithms (GA), K-nearest Neighbor Classifier (KNN), Random Forests regression (RF), and Support Vector Machines (SVM) are some powerful machine learning algorithms

Previous research have investigated the use of three machine learning algorithms—linear regression, random forest regression and AdaBoost regression—to predict the biodiesel production process responses based on the process parameters. The study analysed the biodiesel production yield estimated based on the process parameters and the biodiesel free fatty acid conversion percentage estimated based on the production process parameters (Gupta et al., 2021).

1.3.2 Response Surface Methodology (RSM)

Response Surface Methodology (RSM) is another model of ML used for the optimization of the reaction parameters such as molar ratio of methanol to oil, amount of catalyst, volume of water used and reaction time through. It is a combined statistical and mathematical approach having which wide applicability (Singh et al 2018). The optimization process involves the drawing of contours and curves in 2-D or 3-D planes and from the corresponding shapes the interaction between the variables are illustrated. The effects of the parameters and their interactions were studied through Analysis of variance (ANOVA). Tamoradi in his research exploited RSM in the process optimization of biodiesel from rapeseed oil and waste corn oil using a novel nano composite catalyst (Tamoradi et al., 2022).

1.3.3 Genetic Algorithm

Genetic algorithm is an optimization technique which operates on the principle of natural selection and is widely used for solving optimization problems across different sectors of medical science, vehicle routing, financial markets, etc. GA is a type of evolutionary algorithm that mimics the Darwin's theory of evolution characterized by the survival of the fittest nature. It is a randomized approach that works towards finding the best solution by making slow, mild and steady changes in every set of solutions. Several researcher in the energy sector have employed the genetic algorithm in the transesterification method of biodiesel generation (Katoch et al., 2021, Bobadilla et al., 2018, Ahmad et al., 2023). The genetic algorithm (GA) generates optimal values for transesterification process parameters based on the desired biodiesel properties, such as yield, viscosity, and density. A study conducted by Ahmad and his team investigated the synthesis of biodiesel from *Hiptage benghalensis* by exploiting the machine learning-coupled genetic algorithm approach (Ahmad et al., 2024). Khanna et al in their research were able to synthesize 72%, 85% and 98% biodiesel yields while utilizing genetic algorithm for optimization of the operating parameters (Khanna et al., 2023).

1.3.4 Artificial neural networks (ANN)

Artificial neural networks are type of machine learning (ML) process, called deep learning, that mimics the human brain's mode of processing information using interconnected nodes or neurons in a layered structure that resembles the human brain. The artificial neural network consists of three distinct layers; the input layer for the variables, the processing layer and the output layer (Uslu, 2020). This model is widely employed in the production process of biodiesel because of its high accuracy and efficient prediction even with data having challenges (such as uncertainty, incompleteness, noise, and missing values). ANN and its integrative models could potentially process the non-linear and multivariate data using a multilayer perceptron architecture (Haryanto et al., 2020). Artificial neural network (ANN) has been considered as a vital tool for estimating the fuel properties of biodiesel, especially from its fatty acid (FA) composition. The ANN model has been reported to accurately predict hybrid biodiesel fuel properties (such as KV, density, calorific value, and flash point) from FAs compositions of mixed and single oils and achieves ($R^2 = 1$) for mixed feedstocks (Giwa et al., 2024). After model optimization, the performances are assessed through various statistical matrices such as mean absolute error (MAE), correlation coefficient (R^2), mean square error (MSE), and root mean square error (RMSE) (Raj et al., 2021). Giwa in his study, designed and trained four ANNs to predict the cetane number (CN), flash point (FP), kinematic viscosity (KV) and density of biodiesel. He reported that the prediction accuracy and the average absolute deviation of the networks for the parameters were reasonably better when compared to previous studies on empirical correlations and the ANN predictions of these fuel properties found in literature (Giwa et al., 2015). Haryanto investigated the use of ANN model to predict the biodiesel yield produced from base-catalyzed transesterification of waste cooking oil and reported that biodiesel yield using ANN models were significantly better than those of first-order kinetics (Haryanto et al., 2020). ANN model is preferred over other artificial intelligence techniques because it can be developed by employing multiple training algorithms (Tu, 1996).

REFERENCES

- Ahmad, A., Yadav, A. K., Singh, A., & Singh, D. K. (2024). A machine learning-based genetic algorithm based models for optimization of intensification process through microwave reactor: A new approach for rapid and sustainable synthesis of biodiesel from novel Hiptage benghalensis seed oil, *Fuel*, 374, 132470. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132470>
- Shelare, S.D., Belkhode, P.N., Nikam, K.C., Jathar, L.D., Shahapurkar, K., & Soudagar, M.E.M. (2023). Biofuels for a sustainable future: Examining the role of nano-additives, economics, policy, internet of things, artificial intelligence and machine learning technology in biodiesel production. *Energy*, 128874. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128874>
- Y. Liu, B.T. Sayed, R. Sivaraman, S.M. Alshahrani, K. Venkatesan, K.Y. Thajudeen, et al. Novel and robust machine learning model to optimize biodiesel production from algal oil using CaO and CaO/Al₂O₃ as catalyst: Sustainable green energy *Environ Technol Innov* (2023), p. 103018, 10.1016/j.eti.2023.103018
- Kenneth R. Szulczyk, Rahman Atiqur Khan The potential and environmental ramifications of palm biodiesel: evidence from Malaysia *J. Clean. Prod.*, 203 (2018), pp. 260-272
- Mohd Ali, et al. Oil Palm Biomass Biorefinery for Sustainable Production of Renewable Materials *Biotechnology* (2019), p. 1800394
- Mortaza Aghbashlo, Wanxi Peng, Meisam Tabatabaei, Soteris A. Kalogirou, Salman Soltanian, Homa Hosseinzadeh-Bandbafha, Omid Mahian, Su Shiung Lam, Machine learning technology in biodiesel research: A review, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 85, 2021, 100904, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100904>.
- Mansir, N., Taufiq-Yap, Y.H., Rashid, U. and Lokman, I.M. (2017) Investigation of Heterogeneous Solid Acid Catalyst Performance on Low Grade Feedstocks for Biodiesel Production: A Review. *Energy Conversion and Management*, 141, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.037>
- V. K. Mishra and R. Goswami, "A review of production, properties and advantages of biodiesel," *Biofuels*, vol. 9, no. 2, pp. 273-289, 2018. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336350>
- Giwa, S.O., Adekomaya, S.O., Adama, K.O. et al. Prediction of selected biodiesel fuel properties using artificial neural network. *Front. Energy* 9, 433–445 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11708-015-0383-5>
- Vilas Bôas, Renata N., & Mendes, Marisa F.. (2022). A REVIEW OF BIODIESEL PRODUCTION FROM NON-EDIBLE RAW MATERIALS USING THE TRANSESTERIFICATION PROCESS WITH A FOCUS ON INFLUENCE OF FEEDSTOCK COMPOSITION AND FREE FATTY ACIDS. *Journal of the Chilean Chemical Society* , 67 (1), 5433-5444. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072022000105433>
- S.D. Shelare, P.N. Belkhode, K.C. Nikam, L.D. Jathar, K. Shahapurkar, M.E.M. Soudagar, et al. Biofuels for a sustainable future: Examining the role of nano-additives, economics, policy, internet of things, artificial intelligence and machine learning technology in biodiesel production *Energy* (2023), p. 128874, 10.1016/j.energy.2023.128874
- Diego F. Correa, Hawthorne L. Beyer, Hugh P. Possingham, Skye R. Thomas-Hall, Peer M. Schenk, Biodiversity impacts of bioenergy production: Microalgae vs. first generation biofuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 74, 2017, 1131-1146, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.068>.
- Leung, D.Y., X. Wu, and M. Leung, A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4): p. 1083-95(2010.)
- Mustafa Balat, Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work, *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 2, 2011, 1479-1492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.011>.
- Shokrani R, Haghghi M. Textural evolution of hierarchical nanostructured ZSM-5 via sono-hydrothermal design by various carbon shapes for efficient biodiesel production. *Appl Catal B Environ.* 2020;271:118940. doi: 10.1016/j.apcatb.2020.118940

- Bharti, M. K., Chalia, S., Thakur, P., Sridhara, S. N., Thakur, A., & Sharma, P. B. (2021). Nanoferrites heterogeneous catalysts for biodiesel production from soybean and canola oil: a review. *Environmental chemistry letters*, 19(5), 3727–3746. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01247-2>
- Agarwal A (2007) Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog Energy Combust Sci* 33: 233-271. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2006.08.003>
- Chaker Ncibi M, Sillanpaa M. Recent research and developments in biodiesel production from renewable bioresources. *Recent Patents Chem Eng.* 2014;6:184–193. doi: 10.2174/2211334707999140221164609).
- Azizian, H. and J.K. Kramer, 2005, A rapid method for the quantification of fatty acids in fats and oils with emphasis on trans fatty acids using Fourier transform near infrared spectroscopy (FT-NIR). *Lipids*, 40(8), 855-867.
35. Gnanaprakasam, A., et al., Recent strategy of biodiesel production from waste cooking oil and process influencing parameters: a review. *Journal of Energy*, 2013(2013).
- Ali, O.M.; Mamat, R.; Abdullah, N.R.; Abdullah, A.A. Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel. *Renew. Energy* 2016, 86, 59–67
- Sunday O. Oyedepo; Israel S. Dunmade; Tunde Adekeye; Ahme A. Attabo; Olukunle C. Olawole; Philip O. Babalola; Joseph A. Oyebanji; Mfon O. Udo; Oluwaseun Kilanko; Richard O. Leramo Bioenergy technology development in Nigeria –pathway to sustainable energy development *Int. J. Environ. Sustain Dev.*, 18 (2) (2019), 175-205
- Shokravi, Z., Shokravi, H., Aziz, M., & Shokravi, H. (2019). The Fourth-Generation Biofuel: A Systematic Review on Nearly Two Decades of Research from 2008 to 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429327773-12>.
- Hoofar Shokravi The Fourth-Generation Biofuel: A Systematic Review on Nearly Two Decades of Research from 2008 to 2019 (2019)
- Olatunji, O., Ayo, O., Akinlabi, S., Ishola, F., Madushele, N., & Adedeji, P. (2019). Competitive advantage of carbon efficient supply chain in manufacturing industry, *Journal of Cleaner Production*, 238, 117937, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117937>.
- Jim Bowyer, et al. Third Generation Biofuels – Implications for Wood-Derived Fuels Dovetail Partners, Inc, Minneapolis, MN 55403 USA (2018)
- Awogbemi, O. & Kallon, D. (2023) Application of machine learning technologies in biodiesel production process—A review. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1122638. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1122638>
- Rincón, L., Jaramillo, J., & Cardona, C. (2014). Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*, 69, 479-487.
- Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho, T., & Mahuttanyavanitch, W. (2007). Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. *Biosystems engineering* 97, 201– 207, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.02.011>
- Anwar, M. (2021). Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects *Fuel* (2021), 119204, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119204>
- Ferrari, G., Pezzuolo, A., Nizami, A., & Marinello, F. (2020). Bibliometric analysis of trends in biomass for bioenergy research. *Energies*, 13 (2020)
- Giwa, S., Aasa, S., Taziwa, R., & Sharifpur, M. (2024). Deploying artificial neural network to predict hybrid biodiesel fuel properties from their fatty acid compositions. *International Journal of ambient energy*, (2024), 2262466, <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2262466>
- Uslu, S. (2020). Optimization of diesel engine operating parameters fueled with palm oil-diesel blend: Comparative evaluation between response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) *Fuel* (2020), 117990, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129110>
- Malek M.N.F.A., Hussin N.M., Embong N.H., Bhuyar P., Rahim M.H.A.b., Govindan N., et al. Ultrasonication: a process intensification tool for methyl ester synthesis: a mini review *Biomass Convers. Biorefinery*, 13 (2) (2023), pp. 1457-1467

- Ngamprasertsith, S.; Sawangkeaw, R. Transesterification in supercritical conditions. In *Biodiesel-Feedstocks and Processing Technologies*; InTechOpen: Rijeka, Croatia, 2011; pp. 247–268
- FENG, Li; LIU, Jiajun; LU, Haitao; LIU, Bingzhi; CHEN, Yuning. Techno-economic and profitability analysis of plant for producing biodiesel from fresh vegetable oil and waste frying oil on large-scale. In: *Fuel*. September, 2022. vol. 323, 124304. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124304>
- Lam M. K. and Lee K. T., in *Biofuels*, ed. A. Pandey, C. Larroche, S. C. Ricke, C.-G. Dussap and E. Gnansounou, Academic Press, Amsterdam, 2011, 10.1016/b978-0-12-385099-7.00016-4, pp. 353–374
- Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007;25(3):294–306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Gupta, K. K., Kalita, K., Ghadai, R. K., Ramachandran, M., & Gao, X. -Z. (2021). Machine Learning-Based Predictive Modelling of Biodiesel Production—A Comparative Perspective. *Energies*, 14(4), 1122. <https://doi.org/10.3390/en14041122>
- Singh V, Belova L, Singh B, Sharma YC. Biodiesel production using a novel heterogeneous catalyst, magnesium zirconate (Mg₂Zr₅O₁₂): Process optimization through response surface methodology (RSM) *Energy Convers. Manag.* 2018;174:198–207
- Zakir Hossain SM, Sultana N, Irfan MF, Haque SM, Nasr N, Razzak SA. Artificial intelligence-based super learner approach for prediction and optimization of biodiesel synthesis—A case of waste utilization. *Int J Energy Res.* 2022; 46(14): 20519-20534. <https://doi.org/10.1002/er.7764>
- Shereena KM, Thangaraj T (2009) Bio-diesel: an alternative fuel produced from vegetable oils by transesterification. *Elec J Biol* 5: 67-74.
- Padhi S, Singh R (2010) Optimization of esterification and transesterification of Mahua (*Madhuca Indica*) oil for production of biodiesel. *J Chem Pharm Res* 2: 599-608.
- Haldar S, Nag A (2008) Utilization of three non-edible vegetable oils for the production of biodiesel catalysed by enzyme. *The Open Chem Eng J* 2: 79-83. <https://doi.org/10.2174/1874123100802010079>
- J. Vinoth Arul Raj, R. Praveen Kumar, B. Vijayakumar, E. Gnansounou, B. Bharathiraja Modelling and process optimization for biodiesel production from *Nannochloropsis salina* using artificial neural network *Bioresour Technol* (2021), p. 124872, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124872>
- S. Sukpancharoen, T. Katongtung, N. Rattanachoung, N. Tippayawong Unlocking the potential of transesterification catalysts for biodiesel production through machine learning approach *Bioresour Technol* (2023), 128961. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128961>
- Khanna, A., Lamba, B. Y., Jain, S., Bolshev, V., Budnikov, D., Panchenko, V., & Smirnov, A. (2023). Biodiesel Production from *Jatropha*: A Computational Approach by Means of Artificial Intelligence and Genetic Algorithm. *Sustainability*, 15(12), 9785. <https://doi.org/10.3390/su15129785>
- Katoch, S.; Chauhan, S.S.; Kumar, V. A review on genetic algorithm: Past, present, and future. *Multimed. Tools Appl.* 2021, 80, 8091–8126
- Bobadilla, Marina & Fernandez, Roberto & Lostado-Lorza, R. & Somovilla Gómez, Fátima & Vergara, Eliseo. (2018). Optimizing Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Genetic Algorithm-Based Support Vector Machines. *Energies*. 11 2995. <https://doi.org/10.3390/en11112995>.
- Ahmad, A., Yadav, A.K. & Singh, A. (2023). Application of machine learning and genetic algorithms to the prediction and optimization of biodiesel yield from waste cooking oil. *Korean J. Chem. Eng.* 40, 2941–2956. <https://doi.org/10.1007/s11814-023-1489-9>
- Tu J.V. Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes *J. Clin. Epidemiol.*, 49 (11) (1996), pp. 1225-1231
- Marchetti JM, Miguel VU, Errazu AF. Possible methods for biodiesel production. *Renew Sust Energy Rev* 2007; 11:1300–11.
- Fukuda H, Kondo A, Noda H. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *J Biosci Bioeng* 2001; 92:405–16.

- Shah S , Sharma S , Gupta MN . Biodiesel preparation by lipase-catalyzed transesterification of jatropha oil. *Energy Fuels* 2004; 18:154–9.
- H.-J. Kim, B.-S. Kang, M.-J. Kim, Y.M. Park, D.-K. Kim, J.-S. Lee, et al. Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst *Catal Today*, 93 (2004), pp. 315-320
- Artificial neural network modeling to predict biodiesel production in supercritical methanol and ethanol using spiral reactor Obie Farobia, Nur Hasanah, Yukihiro Matsumura. *Procedia environmental sciences* 28(2015) 214-223
- Abdullah, B.; Muhammad, S.A.F.a.S.; Shokravi, Z.; Ismail, S.; Kassim, K.A.; Mahmood, A.N.; Aziz, M.M.A. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2019, 107, 37–50.
- Wan Nur Aisyah Wan Osman, Mohd Hakimi Rosli, Wan Nur Athirah Mazli, Shafirah Samsuri, Comparative review of biodiesel production and purification, *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 2024, 100264, <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100264>
- Campanelli, Pasquale & Banchemo, Mauro & Manna, Luigi. (2010). Synthesis of biodiesel from edible, non-edible and waste cooking oils via supercritical methyl acetate transesterification. *Fuel*. 89. 3675-3682. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.033>

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIESEL-BIODIESEL-BIOETHANOL FUEL MIXTURES ON THE PERFORMANCE PARAMETERS AND EMISSIONS OF A DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE

Amin Ghaderi

University of Tehran, Aburihan Faculty, Agricultural Technical Department, Iran, Tehran

Seyed Reza HASSAN-BEYGI

University of Tehran, Aburihan Faculty, Agricultural Technical Department, Iran, Tehran

Abstract

Finding a realistic alternative to fossil fuels has become one of humanity's new challenges. To date, various fuels have been proposed by researchers to replace fossil fuels, one of which is a mixture of diesel, biodiesel, and bioethanol, known as D-series fuel. In this research, the performance parameters of power, torque, and specific brake fuel consumption, as well as the emission of pollutants from the engine exhaust—including CO, NO_x, soot, and HC—of a direct injection diesel engine from Fiat Company named F1C, were modeled in GT-Power software. This software, well-known in the field of internal combustion engine simulation, was used to investigate the fuel mixture of diesel, biodiesel, and bioethanol. The diesel engine was simulated one-dimensionally in GT-Power software. The performance parameters of the mentioned engine, including power, torque, and specific brake fuel consumption, were experimentally measured under laboratory conditions, and these data were used to validate the simulation model. The results of the simulations showed that as the amounts of biodiesel and ethanol in the D-series fuel mixture increased, engine power and torque decreased. All engine pollutants, except nitrogen oxides, decreased, while specific brake fuel consumption and the production of nitrogen oxides pollutants increased.

Keywords: Biofuels, 1D simulation, GT-power, Emission

Introduction

According to reports, it is predicted that oil resources are running out; therefore, fossil fuels, including diesel fuel, will only be available for a few more decades. Additionally, the high consumption of fossil fuels has resulted in an increase in greenhouse gases, leading to global warming. Unfortunately, this is not the only destructive effect of these fuels; they also cause water, soil, and air pollution, which endangers human life and various animal and plant species.

Due to the widespread use of diesel engines in the industry, agriculture, and transportation sectors, the consumption of diesel fuel is very high. Statistics show that the consumption of diesel fuel in the Islamic Republic of Iran has reached more than one hundred and ten million liters per day. Meanwhile, global consumption of diesel fuel exceeds 33 thousand billion liters per day. Therefore, it is necessary to replace fossil fuels with renewable fuels as soon as possible to preserve the environment. Additionally, research and development in the field of diesel engines should focus on increasing efficiency and reducing environmental pollutants.

Biofuels have been considered to address some of these concerns. The production of biofuels from biomass materials as a domestic source reduces energy costs, reduces dependence on imported fuels, and manages biomass (Ghobadian, 2012). Among the various types of biofuels, bioethanol and biodiesel as liquid biofuels have made significant progress (Ghobadian et al., 2007).

Bioethanol is a type of alcohol with the chemical formula C₂H₅OH. It is a volatile, flammable, and colorless liquid that is completely soluble in water and organic solvents, and it is highly hydrophilic. Bioethanol can be produced from plant materials containing sugar, starch, and even lignocellulosic materials (Ghobadian & Rahimi, 2010). The characteristics of bioethanol are similar to gasoline; therefore, it can be used in different percentages with gasoline or even pure in spark ignition internal combustion engines, as well as in cars that operate on fuel cells.

Biodiesel fuel is a biodegradable, renewable fuel prepared from the oil of oil seeds such as soybean, almond, waste kitchen oil, animal fat, certain microalgae, and more. Biodiesel is actually vegetable or animal oil that is usually converted into methyl ester or ethyl ester through the transesterification method in the presence of a catalyst (Demirbas, 2008). This fuel is very similar to diesel fuel in terms of molecular structure, with the difference being that the biodiesel fuel molecule contains an oxygen atom. The presence of oxygen in the molecule structure reduces the energy of this fuel by ten percent compared to diesel fuel; however, it causes more complete combustion of fuel and, as a result, reduces emissions. Other advantages of biodiesel fuel include the absence of sulfur, nitrogen, and polycyclic aromatics, greater lubrication properties compared to diesel fuel, and lower toxicity. These attributes make biodiesel fuel a suitable alternative to diesel fuel. However, biodiesel is not without its drawbacks; disadvantages include higher viscosity, lower energy content, higher production costs compared to diesel fuel, and, in some cases, an increase in NO_x pollutants (Ghobadian & Rahimi, 2010). Due to the higher viscosity of biodiesel fuel compared to diesel fuel, the use of pure biodiesel or mixtures with a high ratio of biodiesel to diesel can cause damage to engine parts, especially the fuel injection system (Demirbas, 2008). Therefore, the use of biofuel such as bioethanol, which can reduce the viscosity of the biodiesel-diesel fuel mixture, can be considered a solution.

In the field of internal combustion engines, like all engineering phenomena, research is conducted using both experimental and theoretical methods. The theoretical approach includes two methods: analytical and numerical. In the analytical method, accurate parametric calculations of the differential equations governing the physical field such as thermal field, stress field, etc., are performed. Due to the complexities of the physical phenomena of internal combustion engines, it is usually impossible to find an exact solution; to address this, numerical methods are used to approximate the real solution. In fact, real physical problems are simulated by numerical methods. To ensure the accuracy of simulations, numerical simulation results are validated with experimental results.

In general, internal combustion engines can be numerically simulated using the three-dimensional method based on Computational Fluid Dynamics (CFD) and the one-dimensional method. One-dimensional simulation is a relatively new method in the field of internal combustion engine simulation, which uses the laws of thermodynamics and heat transfer to solve the problem. Powerful one-dimensional software such as GT-Power and AVL Boost have been commercially developed for simulating internal combustion engines. GT-Power software is a one-dimensional module-based simulation software designed and developed to study various automobile parts and engines. The main difference between one-dimensional and three-dimensional simulations based on CFD is the faster one-dimensional software solver and the wide variety of results. In one-dimensional simulation, the complete simulation of the engine can be done to obtain outputs such as engine power and torque, pressure inside the cylinder, fuel consumption, emissions from combustion, etc. One-dimensional simulators have attracted researchers' attention in recent years due to their quick runtime solution and sufficient accuracy of the results.

To address the higher viscosity defect of biodiesel fuel compared to diesel fuel, studies have been conducted on using a mixture of diesel fuels, biodiesel, and a type of alcohol to investigate its effect on the performance parameters of compression ignition engines. Laboratory research conducted on a four-cylinder direct injection diesel engine showed that adding 5% bioethanol to biodiesel fuel improves engine performance. Biodiesel fuel and biodiesel-bioethanol mixtures had higher thermal efficiency compared to pure diesel fuel (Zhu et al., 2011). In another study, biodiesel fuel was used in a diesel engine, and bioethanol fuel was used as an additive; the engine was subjected to experimental tests. This study investigated the possibility of using higher percentages of biodiesel in diesel engines without making changes to engine systems. The fuels used included 80% diesel fuel number 2 and 20% biodiesel (B20), and 20% biodiesel and 80% diesel with bioethanol as an additive (BE20). The results showed that engine performance improved by using BE20, especially compared to B20 (Aydin & Ilkilic, 2010). In a laboratory study, the use of methanol as an additive to biodiesel-diesel blends was studied on the performance of a direct injection diesel engine under different operating conditions. A volumetric mixture with 50% biodiesel and 50% diesel (B50) was used as base fuel, and methanol was added with 5% and 10% (BM5 and BM10). The results showed that the output power and torque of the engine for these fuels were slightly lower than B50 (Qi et al., 2010). Rahimi et al. (2009) studied the performance of the Ruggnerini RD 270 diesel engine (two cylinders, direct injection) using a biodiesel-diesel-bioethanol fuel combination with different volume percentages. The results showed that by adding 12% bioethanol and 8% biodiesel to diesel fuel, the maximum power and torque of the engine decreased by 1.8% and 6.5%, respectively. The fuel consumption of the engine also increased by 12.1%. These researchers stated that the

biodiesel-diesel-bioethanol fuel mixture can adequately replace diesel fuel without any changes in engine structure and components.

Hasan-Beigi et al. experimentally evaluated the performance parameters of a six-cylinder diesel engine without any changes in engine components and systems with different diesel-biodiesel-bioethanol fuel mixtures. The results showed that mixtures with up to 20% biodiesel and up to 8% bioethanol had no significant change in engine power and torque compared to pure diesel fuel. The specific engine braking fuel consumption was higher for all different fuel mixtures of diesel-biodiesel-bioethanol fuel compared to pure diesel fuel. These researchers suggested the fuel mixture of 95% diesel, 5% biodiesel, and 2% bioethanol (D93B5E2) as a suitable alternative to pure diesel fuel, although the mixtures D86B10E4 and D79B15E6 were also suggested for higher proportions of biodiesel and bioethanol.

In another research, the recovery of the lost heat of a fixed diesel engine was simulated one-dimensionally using AVL-Boost software. These researchers stated that by using the inverse Brayton cycle, they achieved a 10% increase in production power and reported that if the organic Rankine cycle is used, this increase in power would reach 18% (Salek et al., 2022).

A different study investigated the mixing of hydrogen and CNG fuel with gasoline in an engine manufactured by Renault using a one-dimensional simulator. The results showed that with an increase in the amount of hydrogen, the amounts of carbon monoxide, carbon dioxide, and unburned hydrocarbons decreased, while the amount of nitrogen oxides increased (Nikole et al., 2020).

In a study investigating the improvement of power and torque of a six-cylinder engine to change its use from a car engine to a marine engine by embedding a turbocharger in GT-Power software, the results showed that with the use of suitable fuel, the braking power of the engine increased by 35% and the braking torque of the engine increased by 52% (Mehrabian & Sozani, 2020).

A study was conducted to investigate the effect of secondary pulse injection timing based on the amount of exhaust air recycled (EGR) on the performance and emissions produced by a diesel engine using a biodiesel and bioethanol fuel mixture in GT-Power software. They concluded that by placing the secondary fuel pulse in the range between 18 and 22 crank degrees after TDC, the amount of NO_x pollutant decreased by about 5% and the amount of soot pollutant production decreased by about 7% (Geng et al., 2023).

Another study investigated the effect of compression ratio in a biodiesel-fueled diesel engine produced from sunflower oil using AVL-Boost software. The single-cylinder diesel engine was numerically tested at different loads with sunflower oil biodiesel fuel. The results showed that fuel consumption increased with an increasing amount of biodiesel fuel. By increasing the compression ratio and at full load, the increase in fuel consumption was minimized. Due to the chemical structure of sunflower oil biodiesel, the amount of carbon dioxide produced increased by about 2% and the amount of unburnt hydrocarbons decreased by about 74% (Doğan et al., 2024).

In a study, an engine and a driving car were modeled to check fuel consumption using GT-Power software. In this research, a fuel combination of 20% biodiesel, 20% hydrogenated vegetable oil, and diesel fuel with low sulfur was used. On the route without Shabib, the amounts of HC and soot production decreased. By examining the movement of the car on an inclined road, it was found that the production of CO₂, CO, NO_x, and specific fuel consumption increased, but at the same time, the increase in HC pollutant production reached its minimum (Arciniegas et al., 2024).

A study was conducted to parametric investigation of the emission reduction of a two-stroke diesel and gas marine engine, in the presence of scavengers, using GT-Power one-dimensional simulation software. Based on this numerical study, it was concluded that with a decrease in the efficiency of the turbocharger, the maximum pressure inside the cylinder and braking efficiency decreased, while the pollutants carbon dioxide and nitrogen oxides increased. Only in a specific interval did the increase or decrease of the turbine ring of the turbocharger have a specific effect on the braking efficiency of the engine in both diesel and gas modes. Due to the advancement of fuel injection timing and higher combustion speed in the gas-burning mode of the engine compared to the diesel mode, with the decrease in the efficiency of the turbocharger, the increase in carbon dioxide pollutant production in the gas-burning mode was less than in the diesel mode (Shen et al., 2024).

The review of the sources showed that there are limited studies on the one-dimensional simulation of the effect of using different mixtures of diesel-biodiesel-bioethanol fuels on the performance parameters and output pollutants of direct injection diesel engines. In this research, biodiesel fuel and bioethanol were added to diesel

fuel in such a way that the characteristics of pure diesel fuel did not change significantly. Performance parameters (power, torque, and specific fuel consumption) and output pollutants of a direct injection diesel engine without any changes in engine components and systems using different diesel-biodiesel-bioethanol fuel mixtures were simulated and investigated.

Materials and Methods

The fuel used in the experimental tests was diesel fuel No. 2, obtained from a gas station in Tehran. The specifications of the mentioned diesel fuel were also used in the simulation. Bioethanol fuel was selected according to the software manual. The characteristics of biodiesel fuel can vary depending on the source. After examining available sources, soybean methyl ester was used as biodiesel.

Table 1. shows the specifications of the three fuels: diesel, biodiesel, and bioethanol.

Properties	Unit	Diesel-2	Biodiesel	Bioethanol
Carbon atoms	-	13.5	13.5	13.5
Hydrogen atoms	-	23.6	23.6	23.6
Oxygen atoms	-	0	0	0
Density	Kg/m ³	830	830	830
Lower heating value	Mj/kg	43.25	43.25	43.25
Critical pressure	bar	569.4	569.4	569.4
Critical temperature	K	24.6	24.6	24.6

The fuel mixtures examined in this research included pure diesel fuel (D100B0E0) and five diesel-biodiesel-bioethanol fuel mixtures with different volume percentages. The volume percentages of biodiesel and bioethanol added to pure diesel fuel were chosen based on the recommendations of Hasan-Beigi et al. The investigated fuel mixtures were as follows:

- D93B5E2: 2% bioethanol, 5% biodiesel, and 93% diesel
- D86B10E4: 4% bioethanol, 10% biodiesel, and 86% diesel
- D79B15E6: 6% bioethanol, 15% biodiesel, and 79% diesel
- D72B20E8: 8% bioethanol, 20% biodiesel, and 72% diesel
- D65B25E10: 10% bioethanol, 25% biodiesel, and 65% diesel

To validate the simulation results of the engine with diesel fuel No. 2, tests were conducted in the test room of the Iran Khodro Engine Research, Design, and Production Company (IPCO). For these tests, an asynchronous dynamometer model Elin Ebg, VA tech, which is an electromagnetic dynamometer, was used. To accurately monitor the engine's behavior, sensors such as a cylinder pressure sensor, temperature sensor, and camshaft speed sensor were installed in various parts of the engine. After ensuring that the engine was properly assembled and the sensors were calibrated, tests were carried out at speeds ranging from 1000 RPM to 2750 RPM in increments of 250 RPM.

From the results of these tests, two experimental graphs—specific braking fuel consumption and braking torque—were selected to validate the simulation results. In Figure 1, you can see a picture of the F1C engine under test.

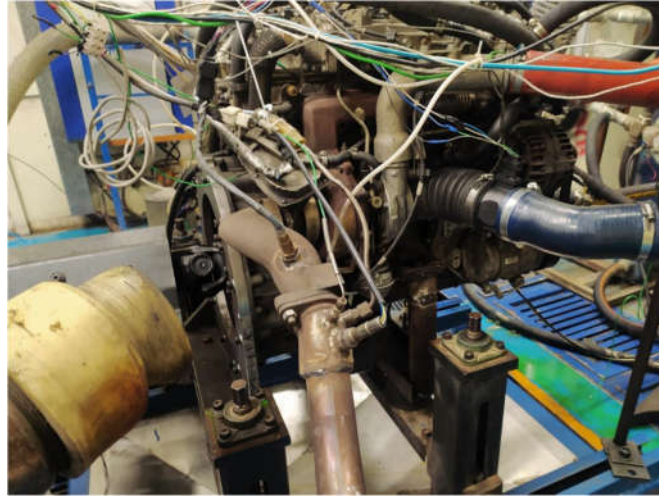


Figure 1.F1C engine in IPCO test room

Gt-power

GT-Power software is a one-dimensional simulator used for simulating engines and other car components. This software employs Navier-Stokes equations and the principles of numerical calculations. It breaks down the fluid in question into smaller components and solves the equations using the principles of fluid mechanics and thermodynamics. In Figure 2, you can see how the flow is analyzed by the software in a pipe (GT-suit, Engine Performance Application Manual. 2016).

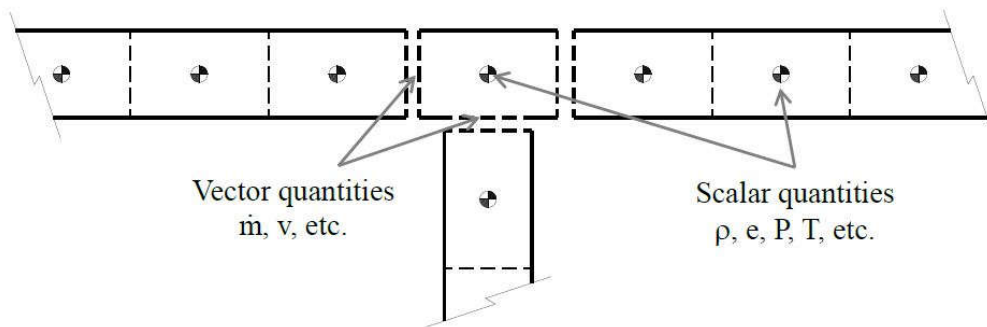


Figure 2.Fluid dynamic analysis in Gt-power software (GT-suit, 2016.Engine performance application manual. 2016)

By comparing the experimental results of the braking torque with the numerical results, a maximum difference of approximately 1.9% was observed at an engine speed of 1000 rpm, demonstrating the high accuracy of the simulation. Figure 3 illustrates the comparison between the experimental and numerical results of the motor braking torque graphs.

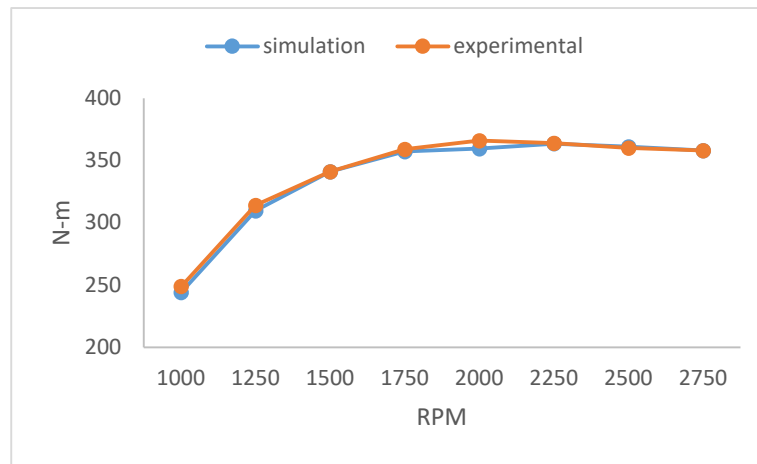


Figure 3. Examining experimental and numerical results of engine brake torque

By comparing the experimental results of brake fuel consumption with the numerical results, the maximum difference between the two was estimated to be 3.09% at an engine speed of 1000 rpm. Overall, the maximum difference observed was 3.09%, indicating the high accuracy of the simulator. Figure 4 illustrates the comparison between the experimental and numerical graphs of specific braking fuel consumption.

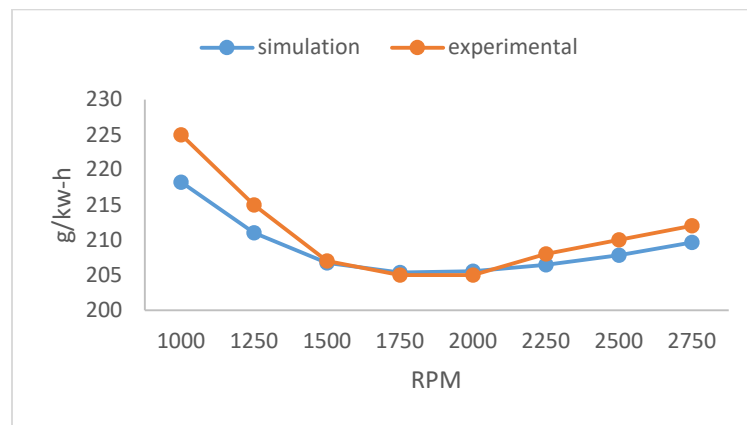


Figure 4. Examining experimental and numerical results of engine BSFC

Findings and Discussion

In this section, we will examine the changes in three performance parameters of the engine: braking power, braking torque, and specific braking fuel consumption. Braking power refers to the engine's ability to do work. Figure 5 illustrates the changes in engine braking power with different fuels as explained in the previous section.

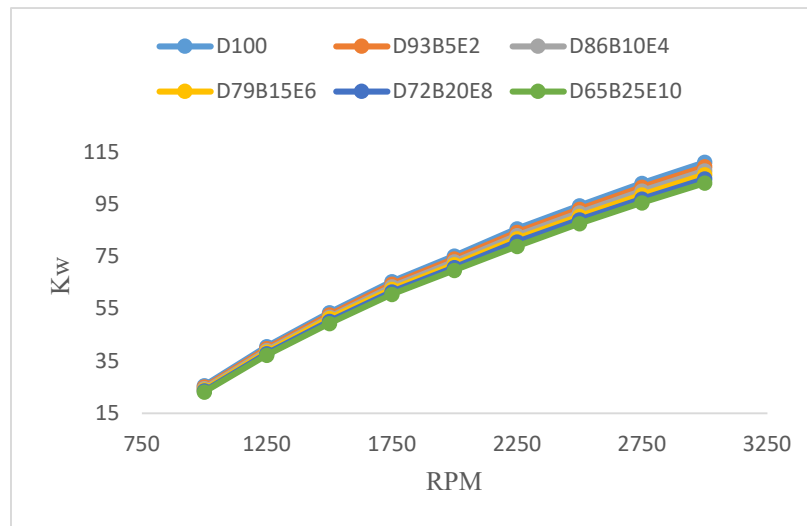


Figure 5. Analysis of changes in brake power with different D series fuels

As can be seen, with the increase in the amount of biodiesel and bioethanol, the brake power decreases. This is because the energy of these two fuels, namely biodiesel and bioethanol, is lower than that of diesel fuel 2. As the ratio of biodiesel and bioethanol increases, the total internal energy of the fuel mixture decreases, resulting in reduced braking power. This phenomenon is also evident in the examination of the engine's braking torque. Increasing the amount of bioethanol and biodiesel in the fuel mixture lowers the total energy of the fuel mixture compared to pure diesel fuel. However, due to the more complete combustion of the biodiesel and bioethanol fuel mixture, some of this energy loss is compensated, and the power and braking torque do not drop significantly. Figure 6 shows the changes in braking distance with different D series fuel mixtures.

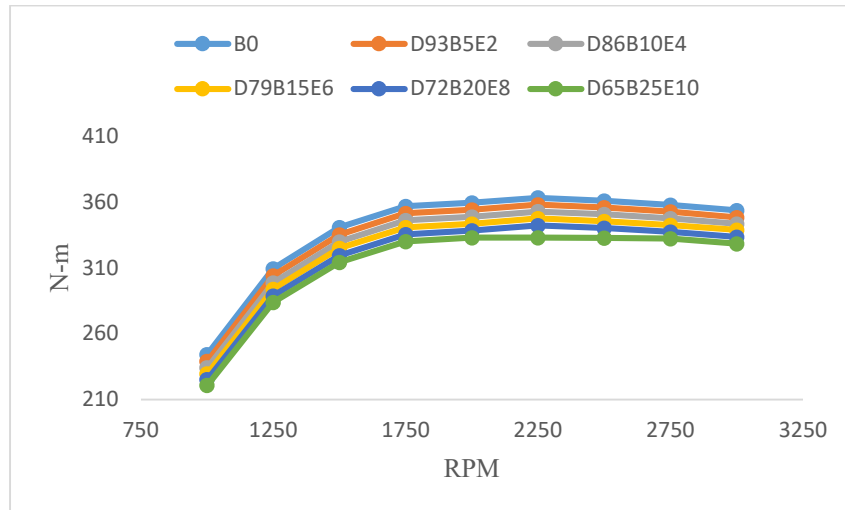


Figure 6. Analysis of changes in brake torque with different D series fuels

Due to the lower rotational energy of biodiesel and bioethanol compared to diesel fuel, the specific fuel consumption increases. However, the difference in specific fuel consumption is more pronounced than the changes in torque and braking power. This is because the more complete combustion of biodiesel and bioethanol compensates for a portion of the reduction in engine power and torque.

Another important performance parameter for internal combustion engines is the specific brake fuel consumption, which measures the amount of fuel consumed by the engine relative to its power output. Figure 7 shows the changes in specific brake fuel consumption with different D-series fuel mixtures.

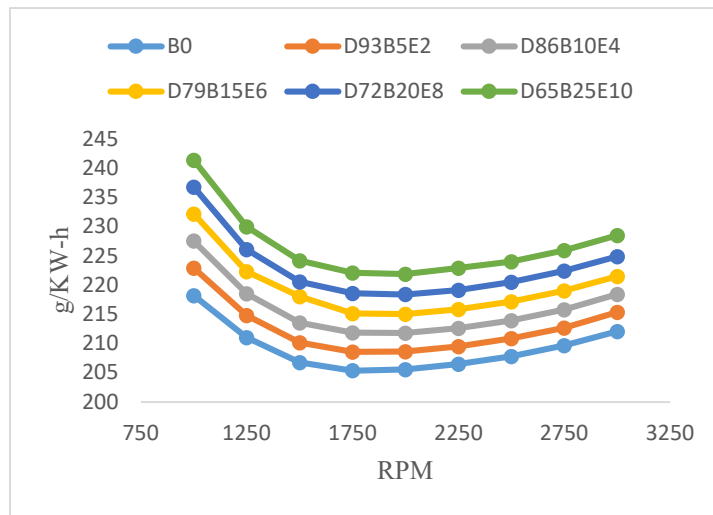


Figure 7. Analysis of changes in brake BSFC with different D series fuels

After examining some of the engine's performance parameters, we will now evaluate the emissions of the compression ignition internal combustion engine. These pollutants include carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides, unburned hydrocarbons, and soot.

Carbon dioxide is not a pollutant, but rather a greenhouse gas that is naturally present and necessary for life on Earth. However, the excessive production of carbon dioxide from fossil fuels has led to global warming, prompting efforts to reduce its emission.

In Figure 8, you can see the specific production of CO₂ gas in the engine with different D-series fuel mixtures. Despite the more complete combustion of the fuel, the amount of CO₂ production has decreased. Studies have shown that biodiesel produces less carbon dioxide than diesel 2, reducing the overall CO₂ emissions from the compression ignition engine (Haywood., 2018).

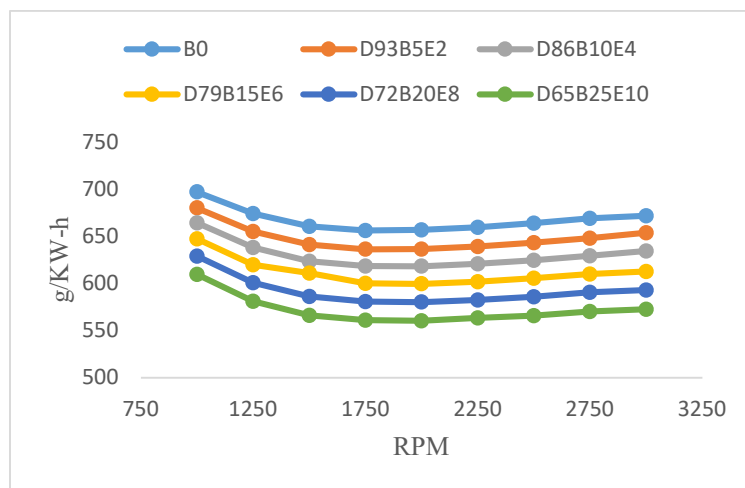


Figure 8. Changes in the amount of CO₂ gas production in the engine with different D series fuels

One of the pollutants produced by internal combustion engines is carbon monoxide (CO), which results from the incomplete combustion of fuel in the combustion chamber. The formation of this pollutant is generally low in compression ignition engines because these engines operate with a lean fuel mixture. However, some amount of CO is still produced. It is expected that with the increase of biodiesel and bioethanol in the fuel mixture, the production of this pollutant will decrease, as these two fuels contribute to more complete combustion in the engine. Figure 9 shows the changes in the specific production rate of carbon monoxide with different D-series fuel mixtures.

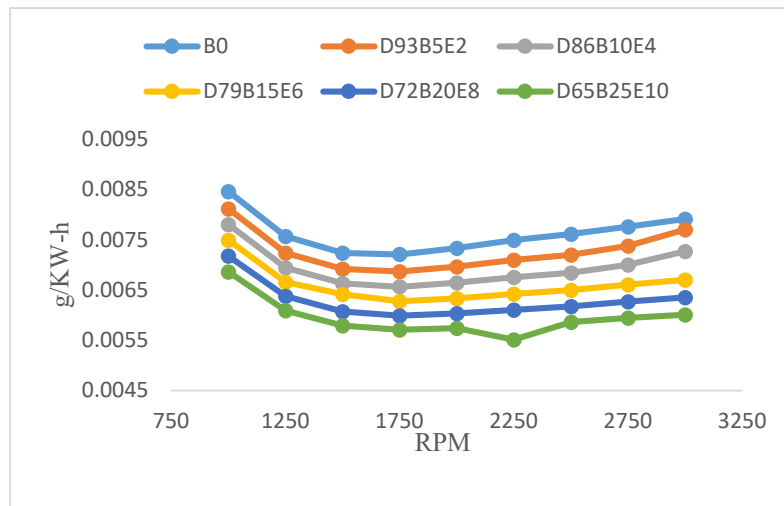


Figure 9. Changes in the amount of CO gas production in the engine with different D series fuels

Another pollutant produced by combustion engines is unburned hydrocarbons (HC). This occurs when the air-fuel mixture is rich, meaning that there are fuel molecules that do not burn inside the combustion chamber. Although compression ignition engines operate with a lean air-fuel mixture, small amounts of HC are still formed. This is due to the non-homogeneous mixing of fuel and air, which leads to the formation of CO and HC pollutants in certain parts of the combustion chamber, where the mixture of fuel and air is either too rich or too lean. Figure 10 illustrates the specific production rate of HC with different D-series fuel mixtures.

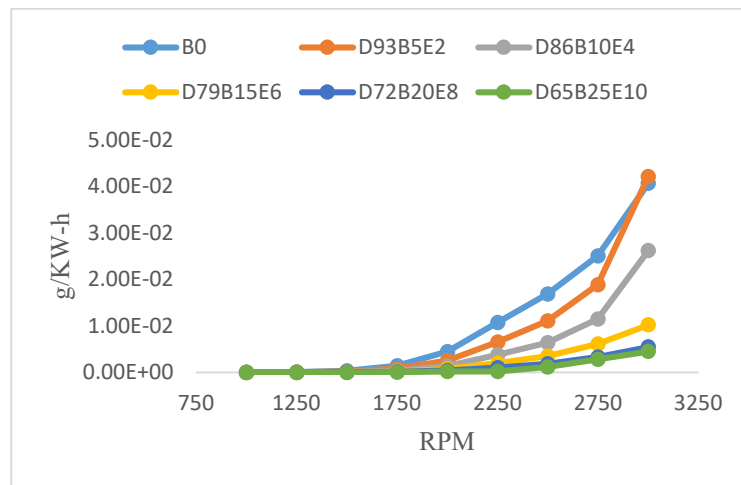


Figure 10. Changes in the amount of HC gas production in the engine with different D series fuels

As the proportion of biodiesel and bioethanol in the fuel mixture increases, the specific production rate of this pollutant decreases due to more complete combustion in the engine. Another pollutant produced by internal combustion engines is soot. In areas of the combustion chamber in compression ignition engines where the fuel-air mixture is very rich and combustion is incomplete, carbon atoms gather in the form of black spheres and are expelled from the cylinder. With the increase of biodiesel and bioethanol, more complete combustion occurs inside the cylinder, which reduces the production of soot. Figure 11 shows the changes in the specific production of soot with different D-series fuel ratios.

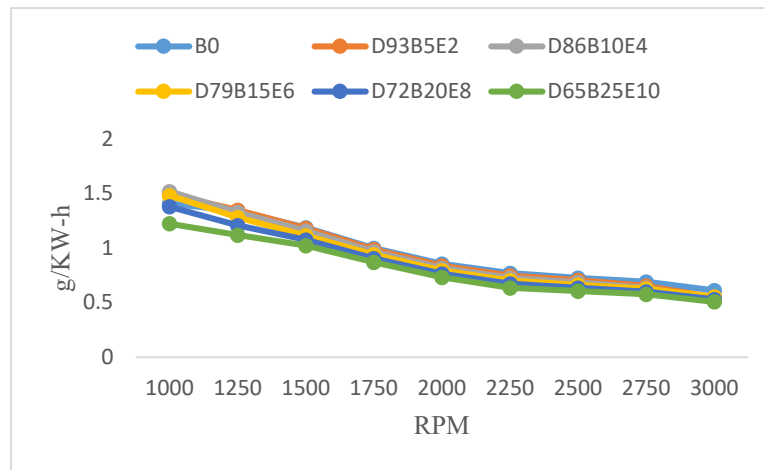


Figure 11. Changes in the amount of Soot gas production in the engine with different D series fuels

It is usually expected that soot emissions will decrease with increasing engine speed as the time for the fuel to burn in the combustion chamber decreases. This would normally result in incomplete combustion and higher soot emissions. However, in Figure 11, it can be seen that the specific production rate of this pollutant has decreased with the increase in speed. This phenomenon is due to the engine producing its highest power limit at high speeds, which reduces the pollutant production rate relative to the power output. Thus, not only does the absolute amount of soot decrease, but the ratio of soot production to power output also declines.

Another important pollutant from internal combustion engines is nitrogen oxides (NO_x). This pollutant is formed when nitrogen molecules in the air are exposed to the high temperatures within the combustion chamber, causing the nitrogen atoms to separate and react with oxygen, forming nitrogen oxides. Figure 12 shows the specific production rate of NO_x with different D-series fuel mixtures.

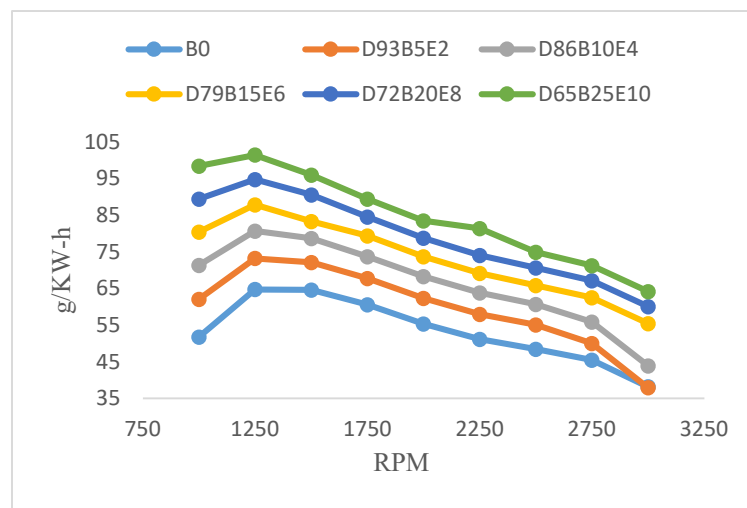


Figure 12. Changes in the amount of NO_x gas production in the engine with different D series fuels

As shown, NO_x pollutants increase with the addition of biodiesel and bioethanol fuels. The presence of oxygen atoms in biodiesel and the high fueling of the engine result in an oxygen-rich environment in the combustion chamber. This, coupled with the complete combustion of the fuel, leads to higher combustion chamber temperatures. These factors contribute to the increased production of NO_x pollutants in the engine.

Conclusion

The following results were obtained with the investigations carried out in this research:

- 1- FIC engine was modeled in Gt-power software with 3.09 accuracy.
- 2- By examining the sources of chemical and thermodynamic information, soybean methyl ester fuel (biodiesel) was introduced to the software.
- 3- By increasing the amount of biodiesel and bioethanol fuel, the power and braking torque of the engine decreased. And the special consumption of brake fuel increased.
- 4- By increasing the amount of biodiesel and bioethanol, CO₂, CO, HC, soot pollutants decreased and NO_x pollutant increased

References

- [1] Ghobadian B. Liquid biofuels potential and outlook in Iran. *J Renew Sust Energy Rev* 2012;16:4379–84.
- [2] Ghobadian B, Rahimi H, Khatamifar M. Experimental evaluation of engine performance using typical diesterol. In: *The international congress on biodiesel: the science and the technology*, Vienna, Austria. November, 5–8; 2007.
- [3] Ghobadian B, Rahimi H, Baratian I. *Ethanol fuel production and application technology*. 1st ed. Tehran, Iran: Aeene-Nama Publication; 2010 [in Persian].
- [4] Demirbas, A., 2008. "Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines". Springer.
- [5] Ghobadian B, Rahimi H. Biofuels: past, present and future perspective. In: *The 4th international Iran and Russia conference*, Shahrkord, Iran. September 8–10; 2004.
- [6] S.R. Hassan-beygi, V. Istan, B. Ghobadian, M. Aboonajmi, An experimental investigation of Perkins A63544 diesel engine performance using D-Series fuel. *Energy Conversion and Management*, 76 (2013) 356–361.
- [7] Zhu L, Chenung CS, Zhang WG, Huang ZH. Combustion, performance and emission characteristics of DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends. *Fuel* 2011;90:1743–50.
- [8] Aydin H, Ilkilic C. Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine. *Appl Therm Eng* 2010;30:1199–204.
- [9] Qi DH, Chen H, Geng YZH, Ren XCH. Performance and combustion characteristics of biodiesel–diesel–methanol blend fuelled engine. *Appl Energy* 2010;87:1679–86.
- [10] Rahimi H, Ghobadian B, Yusaf T, Najafi GH, Khatamifar M. Diesterol: an environment-friendly IC engine fuel. *Renew Energy* 2009;34:335–42.
- [11] Salek, F., Babaie, M., Naserian, M.M., Ahmadi. M.H. Power enhancement of a turbo-charged industrial diesel engine by using of a waste heat recovery system based on inverted Brayton and organic Rankine cycles, *Feul*, 2022, 322, 124036.
- [12] Niculae, L.N., Miron, L., Chiriac. R., On the possibility to simulate the operation of a SI engine using alternative gaseous fuels, *Energy Reports*, 2020, 6, 167-176.
- [13] Mehrabian, M., Suzani, A. Simulating a naturally aspirated engine and upgrading the engine's power by equipping it with a high-pressure system for change Application to marine gasoline engine. *The 12th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil*. 2022, Sapco Company, Tehran, Iran[in Persian].
- [14] Geng.L.,Xiao.H.,Cui.Y.,Gao.N.,Li.Q.,Chen.H.,Xie.Y., 2023.'' Numerical study of effect of post injection coupled with EGR on combustion and emission performances of CRDI engine fueled with biodiesel-ethanol blends'' *journal of traffic and transportation engineering*.2 December.
- [15]Doğan.B.,Ghanati.S.,Yesilyurt.M.,Yaman.H.,2024''Effects of compression ratio on the performance and emission''8 February.

- [16] Arciniegas.V.,Cardozo.S.,Arias.S.,Lopez.A.,Botero.M.,Londoño.F.,2024''Engine & vehicle modeling for fuel assessment under local driving conditions levels of a CI engine fueled with safflower oil methyl ester through an engine simulation approach''27June
- [17] Shen.H.Yang.F.Jiang.D.Lu.D.Jia.B.Liu.Q.Zhang.X., 2024.'' Parametric Investigation on the Influence of Turbocharger Performance Decay on the Performance and Emission'' Journal of Marine Science and Engineering 2 August Characteristics of a Marine Large Two-Stroke Dual Fuel Engine
- [18] Ismail.A.,Ng.B.,Chang.C.,Gan.D.,Lucchini.E.,2012.''Development of Thermophysical and Transport Properties for theCFD Simulations of In-Cylinder Biodiesel Spray Combustion''Energy&Fuels.13 July
- [19] GT-suit, 2016.Engine Performance Application Manual. 2016 Gamma Technologies. 601 Oakmont Lane, Suite 220 Westmont, IL 60559 USA.
- [20] Haywood, J, 2018. Internal Combustion Engines Fundamentals, Second Edition. Mecgraw hill education. Massachusetts, USA

THE DETERMINANT OF NATURAL RESOURCE RENTS IN BVAR FRAMEWORK**Adirek Vajrapatkul**

School of Economics, Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand

Boonta Wayupab

Replenishment and Demand Forecasting Department, Central Food Retail Company Limited, Thailand

Pinmanee Vajrapatkul

Computer Engineering Department, Srinakharinwirot University, Thailand

Abstract

This study investigates the factors influencing natural resource rents in Thailand, with a focus on Foreign Direct Investment (FDI), Inflation (INF), and Government Consumption Expenditure (GCE). The primary objective is to understand the dynamic relationships between these variables and their collective impact on natural resource rents using a Bayesian Vector Autoregression (BVAR) model. The results reveal that natural resource rents exhibit a self-correcting dynamic, with negative lag coefficients indicating their tendency to revert to equilibrium over time. In contrast, FDI and GCE demonstrate strong persistence, with positive autocorrelations indicating their long-term effects on resource rents. Variance decomposition highlights that Inflation and FDI are the main drivers of natural resource rents, while GCE plays a secondary role. The study concludes that maintaining macroeconomic stability, controlling inflation, and fostering foreign investment are crucial for managing resource wealth effectively.

Keywords: Total Natural Resources Rents, Foreign Direct Investment, Inflation, Government Consumption Expenditure, BVAR, Thailand

INTRODUCTION

Natural resource rent refers to the surplus value or profit generated from the extraction and use of natural resources after accounting for the costs involved in production, extraction, and transportation. It reflects the scarcity and finite nature of these resources, which can only be exploited to a certain extent before they are depleted or exhausted (Golombek & Hoel, 1990). This concept is critical in understanding the economic implications of resource exploitation, as it is inherently linked to the wealth of nations endowed with abundant natural resources. The rent derived from these resources can serve as a significant driver of economic growth and development. However, natural resource rent is not simply a source of revenue; it carries profound implications for a nation's economic structure, political dynamics, and governance. While it can be a major contributor to national wealth, the effective management of natural resource rents is crucial, as mismanagement or over-dependence can lead to negative consequences, such as environmental degradation, corruption, and social unrest.

Natural resource rent plays an important role in shaping the economic and political landscape of resource-rich countries. The revenue generated can significantly contribute to a nation's GDP and can be used to finance development projects, infrastructure, and social welfare programs. However, an over-reliance on these rents often brings unintended consequences, including environmental degradation (Danish et al., 2023) and stunted economic diversification (Alvarado et al., 2023). Furthermore, the competition for access to and control of natural resource rents, both within a country and at the international level, often exacerbates political instability and can even fuel conflicts (Omeje, 2016; Omeje, 2021). The dependence on natural resources for revenue can create an economic paradox, where countries blessed with abundant resources fail to translate these advantages into long-term prosperity due to institutional weaknesses, corruption, and rent-seeking behaviors. This phenomenon is often referred to as the "natural resource curse," where countries with abundant resources tend to suffer from slower growth, poor governance, and increased inequality (Gedikli, 2020). Understanding the factors that determine natural resource rent is thus vital for policymakers who wish to harness its potential benefits while mitigating its associated risks.

The importance of identifying and analyzing the factors that determine natural resource rent cannot be overstated. Such knowledge helps in designing policies that balance economic growth with environmental sustainability. The effects of natural resource rent are not uniform across all countries and regions, as the impact is often mediated by factors such as institutional quality, governance, and external market conditions. For instance, strong institutions can help mitigate the adverse effects of resource dependence, reducing the risk of conflicts and promoting financial development (Arif et al., 2021; Faheem et al., 2021). Furthermore, understanding these factors can help countries transform their natural resource dependence into a blessing rather than a curse, particularly through strategies aimed at economic diversification, technological innovation, and sustainable resource management (Sinha & Sengupta, 2019). As natural resource rent can also affect other sectors such as industrial production (Aprigliano, 2020) and economic stability (Bragoudakis & Krompas, 2023), the multifaceted role of natural resource rents in national development highlights the need for effective policy management to optimize their potential benefits while minimizing negative outcomes such as environmental harm, inflation, and socio-political tensions.

Scholars have investigated the factors affecting natural resource rent and its broader implications for economic development. Researchers have employed diverse methodologies to understand these dynamics. Zhang and Cui (2023) conducted an analysis of the asymmetric impact of Fintech, business regulations, and urbanization on natural resource rents in G10 countries, utilizing the method of moment quantile regression (MMQR). They found that Fintech reduces mineral resource rent, business regulations drive resource consumption, and urbanization decreases reliance on resources.

Despite some investigations, several gaps remain in understanding the precise determinants of natural resource rent and the best strategies for managing its associated risks. For instance, while some of the existing research focuses on the natural resource rents in specific national contexts, there is a need for more generalized frameworks that can be applied across various regions. As such, a more comprehensive approach is required, one that incorporates a broad range of variables to fully understand the complexities surrounding natural resource rents. In addition, while previous studies often focus on isolated factors without considering their interplay. This study contributes to the field by utilizing a Bayesian Vector Autoregression (BVAR) model, which incorporates multiple variables and lags to analyze the dynamic relationships between natural resource rent and various economic indicators. The remaining sections of this paper are organized as follows. Section 2 explores the concepts related to this research. Section 3 outlines the research methodology. Finally, the results of the analysis and discussions will be presented.

LITERATURE REVIEW

This section examines key concepts and empirical studies related to natural resource rents which provide the foundation for understanding the complex dynamics of resource wealth.

Natural Resource Curse: This concept also known as the "resource curse" or "paradox of plenty," refers to the phenomenon where countries rich in natural resources often experience slower economic growth, less democracy, and lower levels of economic development compared to countries with fewer natural resources (Langarudi & Radzicki, 2021). This paradox challenges the intuitive notion that natural resource abundance should be a blessing for economic growth. The concept of the resource curse is not universally applicable or inevitable. Some studies suggest that the curse's existence is conditional and its effects on growth are non-monotonic (Szalai, 2018). Interestingly, research has shown that curses and blessings can co-exist and impact different social groups in diverse ways (Obeng-Odoom, 2012). The curse is often associated with over-dependence on natural resource-oriented industries, which can lead to negative effects on medium and long-term economic growth (Wu et al., 2018). Several mechanisms contribute to the resource curse, including the Dutch disease effect, which hampers manufacturing development; the crowding-out effect on human capital, technology innovation, and foreign investment; and the weakening of institutions through increased government intervention (Mulwa, 2017; Wu et al., 2018). However, the severity of the curse can be mitigated by factors such as less restrictive trade policies, good institutions, and conducive business regulations (Arezki & Ploeg, 2010; Tang et al., 2022). Understanding these nuances is crucial for developing effective policies to transform the resource curse into a resource blessing, particularly in developing countries (Gedikli, 2020).

Dutch Disease: This concept is an economic phenomenon that occurs when a country experiences a sudden influx of wealth from natural resources, leading to adverse effects on other sectors of the economy (Kojo, 2015). It is often associated with resource-rich countries and is characterized by several key symptoms

including, real exchange rate appreciation, Slower manufacturing growth, Faster service sector growth, and Higher overall wages (Oomes & Kalcheva, 2007). The term "Dutch Disease" is frequently used in the resource curse literature to explain poor economic performance in many resource-rich countries (Pegg, 2009). However, it's important to note that Dutch Disease is not necessarily a "disease" that always causes adverse impacts on the economy, and it should not be conflated with the broader concept of the "resource curse" (Kojo, 2015). However, the theoretical predictions and empirical evidence supporting Dutch Disease are not as clear-cut as commonly believed. Some studies challenge the empirical relevance of Dutch Disease effects in resource-rich economies (Leonov & Volchkova, 2013). Additionally, recent research has shown that booming resource sectors can have substantial productivity spillovers on non-resource sectors, which were not captured in previous analyses (Bjrrnland & Thorsrud, 2013). While Dutch Disease remains a significant concern for resource-rich economies, its effects and implications are more nuanced than initially thought. The diagnosis of Dutch Disease requires careful consideration of various factors, including fiscal policies, foreign borrowing, exchange rate management, and investment strategies (Usui, 1997). As demonstrated by countries like Indonesia, proper macroeconomic management and strategic use of resource revenues can help mitigate the potential negative effects of Dutch Disease.

In empirical studies, it found that natural resource rents are influenced by various factors. Institutional quality is another crucial factor affecting natural resource rents. Arif et al. (2021) shows that better institutional quality, characterized by high bureaucratic quality, rule of law, and low corruption in government institutions, can mitigate the negative impact of natural resource rent on internal conflicts. This implies that strong institutions can help countries better manage their natural resource rents. Financial development plays a significant role in affecting natural resource rents. Adabor (2023) demonstrates that financial development has a positive and significant effect on gas resource rent in Ghana. Specifically, net domestic credit per GDP and monetary sector credit to private sector per GDP positively impact gas resource rent. Economic development and trade openness are also crucial factors affecting natural resource rents. Guo et al. (2023) emphasizes the importance of GDP and international trade patterns in shaping natural resource rents within the Regional Comprehensive Economic Partnership (RCEP) trade bloc. Additionally, geopolitical risk and energy efficiency are identified as key variables influencing natural resource extraction and rents.

METHODOLOGY

Bayesian Vector Autoregression (BVAR) is a statistical model used for multivariate time series analysis that combines vector autoregression (VAR) with Bayesian methods. It addresses the issue of dense parameterization in traditional VAR models by imposing shrinkage on model coefficients through informative priors, thereby reducing parameter uncertainty (Kuschnig & Vashold, 2021). BVAR models, particularly those using the Minnesota prior, have been successful in providing better forecasting performance for multivariate time series (Kim & Baek, 2023). BVAR models have diverse applications across various fields. In economics, they are used for forecasting macroeconomic indicators such as GDP (Bragoudakis & Krompas, 2023) and industrial production (Aprigliano, 2020). BVAR models have also been applied to analyze supply chain disruptions and their impact on equity returns (Ginn, 2024), as well as to study the effects of U.S. trade policy uncertainty on China's economy (Yan et al., 2022). In finance, BVAR models have been employed to simulate and predict Bitcoin prices, offering insights into the cryptocurrency market mechanics (Ibrahim et al., 2020). A standard BVAR model can be written by:

$$Y_t = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \dots + A_p Y_{t-p} + u_t$$

where Y_t is a vector of endogenous variables at time t , which includes TNR = natural resource rents, FDI = Foreign Direct Investment, INF = Inflation, and GCE = Government Consumption Expenditure. A_1, A_2, \dots, A_p are matrices of coefficients to be estimated. u_t is the vector of error terms, which follows a normal distribution $u_t \sim N(0, \Sigma)$, with Σ being the variance-covariance matrix of residuals.

The BVAR methodology introduces prior distributions to these parameters to mitigate overfitting and reduce uncertainty in the coefficient estimates. The priors are incorporated into the model estimation through Bayesian inference, and posterior distributions of the parameters are derived using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) techniques. This approach allows the inclusion of prior beliefs about the structure of the model, which is particularly useful when the time-series data is nonstationary or exhibits over-parameterization issues. The data, sourced from the World Bank database, spans from 1972 to 2020 and is used to estimate this model.

RESULT

This section reveals the dynamics of natural resource rents in Thailand, focusing on the roles of Foreign Direct Investment (FDI), Inflation (INF), and Government Consumption Expenditure (GCE). Table 1 provides an overview of the key variables. For Natural Resource Rents (TNR), the mean is 1.7468, with a standard deviation of 0.7880, and values range from 0.5462 to 3.7169. Foreign Direct Investment (FDI) has an average value of approximately 3.79 billion, with a standard deviation of 4.41 billion, spanning from -4.85 billion to 15.90 billion. Inflation (INF) exhibits a mean of 4.57% and a standard deviation of 4.18%, fluctuating between -2.58% and 20.34%. Government Consumption Expenditure (GCE) averages 26.1 billion, with a standard deviation of 27.2 billion, ranging from 0.89 billion to 89.1 billion. Figure 1 shows Correlation matrix and Figure 2 presents Time Series of variables

Table 2 reveals the relationships between these variables. TNR and FDI are moderately positively correlated (0.4878), with a p-value of 0.0004, suggesting a significant relationship. TNR and INF show a weak positive correlation (0.0624), but the high p-value of 0.6700 indicates no significant association. TNR and GCE exhibit a moderate positive correlation (0.4038), significant at the 0.0040 level. FDI and INF have a moderate negative correlation of -0.3193, significant at 0.0253. FDI and GCE are strongly positively correlated (0.5751), significant at the 0.0003 level. INF and GCE are negatively correlated (-0.4996), with a highly significant p-value of 0.0003.

The model summary in Table 3 provides key statistics related to the Bayesian estimation process. The MCMC (Markov Chain Monte Carlo) algorithm ran for 12,500 iterations, including a burn-in period of 2,500 iterations. The sample size for the analysis was 10,000, based on 47 observations. The MCMC acceptance rate was perfect at 1.0000, meaning all proposed samples were accepted. The model's efficiency, reported with a minimum value of 0.9550, an average of 0.9949, and a maximum of 1.0000, reflects high sampling efficiency.

Table 4 presents the coefficients, standard deviations, and credible intervals for the lagged variables of TNR, FDI, INF, and GCE. For TNR, the first lag (TNR L1) has a positive coefficient of 0.9284 with a standard deviation of 0.0675, and a credible interval ranging from 0.7949 to 1.0600. The second lag (TNR L2) shows a negligible effect (-0.0017) with a wide confidence interval. The lags of FDI have minimal effects on TNR, with the first lag (FDI L1) near zero (8.140E-12), and similarly, FDI L2 has a very small coefficient (9.140E-13). For INF, the first lag (INF L1) has a slight negative effect on TNR (-0.0132), while the second lag (INF L2) shows an even smaller impact (-0.0017). The first lag of GCE (GCE L1) shows a very small positive coefficient (2.740E-12), and the second lag (GCE L2) indicates a negligible effect.

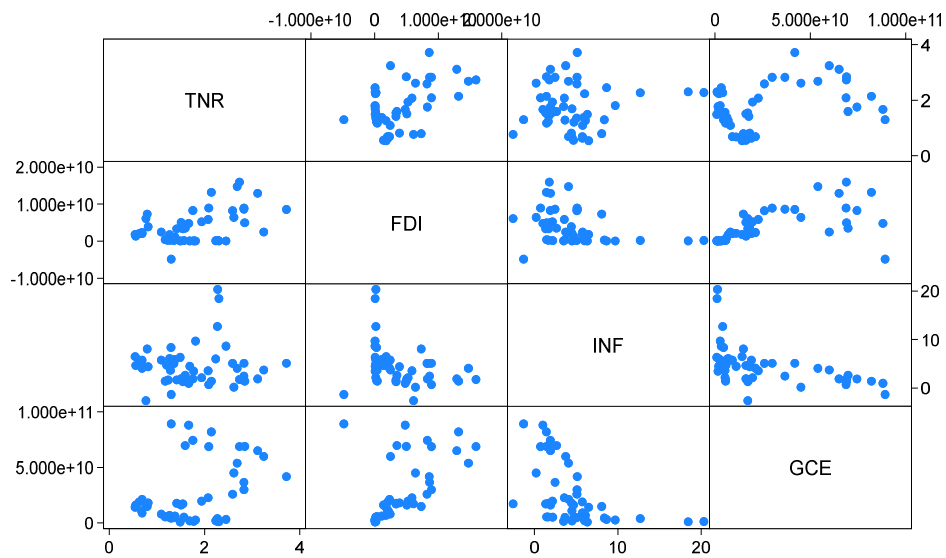
Finally, Table 6 presents the variance decomposition. The IRFs for FDI show a small positive response at step 1 (8.90E-12), with subsequent values gradually increasing. The credible intervals for these IRFs remain narrow, suggesting a stable but small effect. The IRFs for INF start negative (-1.79E-02) at step 1 and become more negative in later steps, reaching -4.25E-02 at step 7. The widening credible intervals in later steps indicate increased uncertainty in the effect size. For GCE, the IRFs remain near zero, indicating minimal change over time, with stable confidence intervals. As the steps increase, the effects of INF become more pronounced and negative, while the effects of GCE remain minimal, reflecting limited influence in the system.

Table 1 Descriptive statistics

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
TNR	49	1.7468E+00	7.8802E-01	5.4621E-01	3.7169E+00
FDI	49	3.7900E+09	4.4100E+09	-4.8500E+09	1.5900E+10
INF	49	4.5749E+00	4.1767E+00	-2.5770E+00	2.0335E+01
GCE	49	2.6100E+10	2.7200E+10	8.9300E+08	8.9100E+10

Table 2 Correlation matrix

	TNR	FDI	INF	GCE
TNR	1.0000			
FDI	0.4878 (0.0004)	1.0000		
INF	0.0624 (0.6700)	-0.3193 (0.0253)	1.0000	
GCE	0.4038 (0.0040)	0.5751 (0.0003)	-0.4996 (0.0003)	1.0000

**Figure 1** Correlation matrix

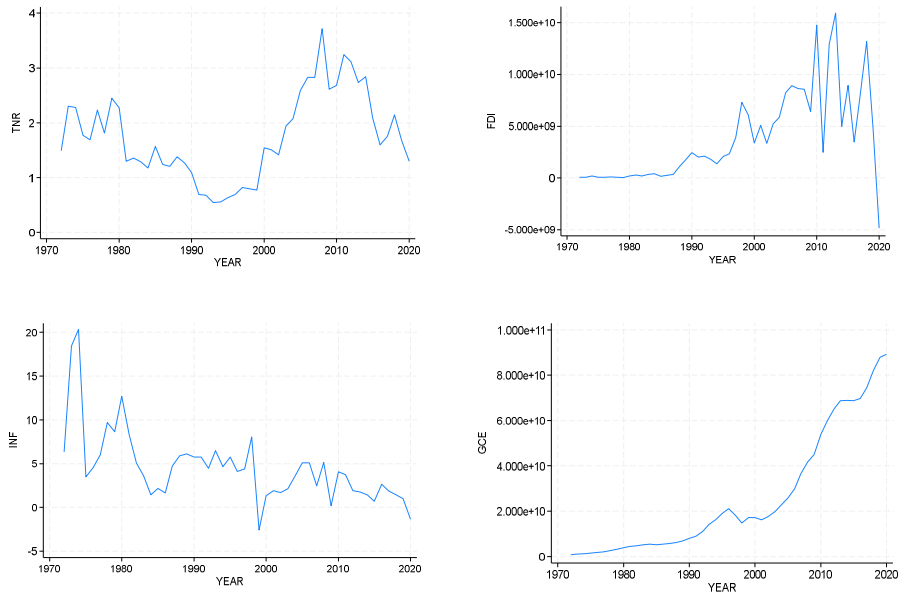


Figure 2 Time Series of variables

Table 3 Model summary

Statistic	Value
MCMC iterations	12,500.0000
Burn-in	2,500.0000
MCMC sample size	10,000.0000
Acceptance rate	1.0000
Efficiency (min)	0.9550
Efficiency (avg)	0.9949
Efficiency (max)	1.0000

Table 4 BVAR model estimation

Variable	Mean	Std. Dev.	MCSE	Median	Lower Bound	Upper Bound
TNR						
TNR L1.	9.284E-01	6.748E-02	6.750E-04	9.285E-01	7.949E-01	1.060E+00
TNR L2.	-1.673E-03	4.638E-02	4.640E-04	-1.954E-03	-9.230E-02	8.964E-02
FDI L1.	8.140E-12	9.680E-12	9.700E-14	8.200E-12	-1.110E-11	2.700E-11
FDI L2.	9.140E-13	5.360E-12	5.300E-14	9.250E-13	-9.710E-12	1.150E-11
INF L1.	-1.321E-02	1.025E-02	1.030E-04	-1.317E-02	-3.329E-02	6.586E-03
INF L2.	-1.706E-03	6.028E-03	6.000E-05	-1.739E-03	-1.357E-02	1.016E-02
GCE L1.	2.740E-12	8.850E-12	8.800E-14	2.880E-12	-1.490E-11	1.160E-11
GCE L2.	-6.300E-12	8.990E-12	9.000E-14	-6.300E-12	-2.380E-11	1.150E-11
cons	2.184E-01	1.359E-01	1.359E-03	2.188E-01	-5.196E-02	4.842E-01
FDI						
TNR L1.	4.280E+08	6.690E+08	6.700E+06	4.310E+08	-9.010E+08	1.750E+09
TNR L2.	3.940E+07	4.540E+08	4.500E+06	4.270E+07	-8.660E+08	9.150E+08
FDI L1.	8.494E-01	9.541E-02	9.540E-04	8.492E-01	6.613E-01	1.035E+00
FDI L2.	7.831E-03	5.331E-02	5.390E-04	7.874E-03	-9.590E-02	1.144E-01
INF L1.	-4.070E+07	1.010E+08	1.000E+06	-4.000E+07	-2.390E+08	1.580E+08
INF L2.	3.687E+06	6.030E+07	6.028E+05	3.446E+06	-1.150E+08	1.220E+08
GCE L1.	-5.614E-02	8.832E-02	8.930E-04	-5.680E-02	-2.267E-01	1.871E-01
GCE L2.	3.538E-02	8.978E-02	9.130E-04	3.514E-02	-1.429E-01	2.111E-01
cons	4.110E+08	1.350E+09	1.400E+07	4.140E+08	-2.250E+09	3.050E+09

Variable	Mean	Std. Dev.	MCSE	Median	Lower Bound	Upper Bound
INF						
TNR L1.	1.718E-02	5.644E-01	5.644E-03	1.464E-02	-1.092E+00	1.135E+00
TNR L2.	-5.045E-02	3.828E-01	3.828E-03	-4.934E-02	-7.915E-01	6.921E-01
FDI L1.	-1.010E-11	8.220E-11	8.200E-13	-1.170E-11	-1.700E-10	1.500E-10
FDI L2.	-5.270E-12	4.480E-11	4.500E-13	-4.720E-12	-9.370E-11	8.150E-11
INF L1.	7.603E-01	8.492E-02	8.490E-04	7.605E-01	5.923E-01	9.249E-01
INF L2.	-3.753E-02	5.085E-02	5.150E-04	-3.699E-02	-1.388E-01	6.269E-02
GCE L1.	7.180E-13	7.400E-11	7.400E-13	5.850E-13	-1.430E-10	1.450E-10
GCE L2.	-1.690E-11	7.530E-11	7.500E-13	-1.690E-11	-1.650E-10	1.330E-10
cons	1.371E+00	1.132E+00	1.152E-02	1.385E+00	-8.903E-01	3.594E+00
GCE						
TNR L1.	3.920E+08	3.680E+08	3.700E+06	3.860E+08	-3.260E+08	1.130E+09
TNR L2.	1.070E+08	2.480E+08	2.500E+06	1.070E+08	-3.830E+08	5.890E+08
FDI L1.	3.932E-02	5.297E-02	5.420E-04	3.960E-02	-6.425E-02	1.423E-01
FDI L2.	-1.644E-03	2.898E-02	2.840E-04	-1.413E-03	-5.867E-02	5.501E-02
INF L1.	-4.634E+00	5.520E+07	5.486E+05	-4.159E+00	-1.140E+08	1.030E+08
INF L2.	5.572E+00	3.290E+07	3.254E+05	1.656E+05	-6.290E+07	6.590E+07
GCE L1.	1.077E+00	4.746E-02	4.750E-04	1.077E+00	-9.829E-01	1.717E+00
GCE L2.	-4.322E-02	4.826E-02	4.830E-04	-4.381E-02	-1.378E+00	5.173E-02
cons	-5.960E+07	7.410E+08	7.200E+06	-5.600E+07	-1.550E+09	1.360E+09
Sigma_1_1	1.496E-01	3.141E-02	3.140E-04	1.455E-01	9.985E-02	2.208E-01
Sigma_2_1	7.090E+07	2.160E+08	2.100E+06	6.990E+07	-3.580E+08	5.110E+08
Sigma_3_1	3.638E-01	1.934E-01	1.934E-03	3.484E-01	2.465E-02	7.911E-01
Sigma_4_1	2.140E+08	1.230E+08	1.200E+06	2.050E+08	-5.610E+00	4.800E+08
Sigma_2_2	1.480E+19	3.110E+18	1.300E+16	1.440E+19	9.960E+18	1.290E+19
Sigma_3_2	1.190E+09	1.860E+09	1.900E+07	1.110E+09	-2.380E+09	5.090E+09
Sigma_4_2	2.180E+18	1.230E+18	1.200E+16	2.090E+18	8.300E+15	4.920E+18
Sigma_3_3	1.062E+01	2.238E+00	2.238E-02	1.034E+01	7.129E+00	1.583E+01
Sigma_4_3	-6.730E+07	1.000E+07	1.000E+07	-5.920E+07	-2.070E+09	9.110E+09
Sigma_4_4	4.410E+18	9.290E+17	9.300E+15	4.290E+18	2.930E+18	6.570E+18

Table 5 stability

Eigenvalue Modulus	Mean	Std. Dev.	MCSE	Median	95% Cred. Interval Lower	95% Cred. Interval Upper
1	1.0370	0.0308	0.0003	1.0369	0.9786	1.0996
2	0.9838	0.0654	0.0007	0.9986	0.8410	1.0802
3	0.8327	0.0918	0.0009	0.8361	0.6457	0.9964
4	0.6618	0.1276	0.0013	0.6787	0.3666	0.8672
5	0.1478	0.0778	0.0008	- 0.1259	0.0633	0.3811
6	0.0938	0.0344	0.0003	0.0897	- 0.0407	0.1725
7	0.0630	0.0263	0.0003	0.0611	- 0.0181	0.1186
8	0.0358	0.0236	0.0002	0.0328	- 0.0017	0.0878

Pr(eigenvalues lie inside the unit circle) = 0.1020

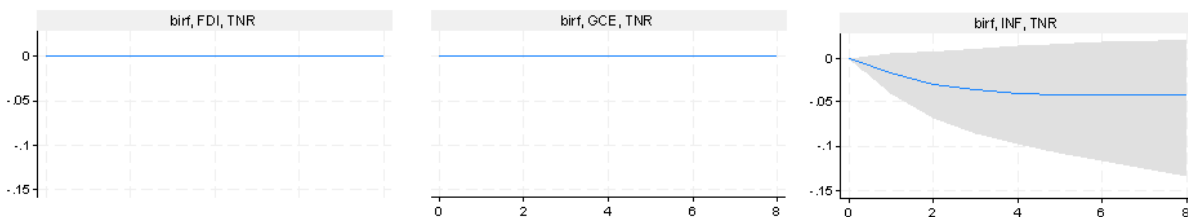


Figure 3 Impulse response analysis

Table 6 Variance decomposition

Step	FDI to TNR	INF to TNR	GCE to TNR
1	8.90E-12	-1.79E-02	3.10E-12
2	1.70E-11	-3.02E-02	-5.80E-13
3	2.30E-11	-3.68E-02	-5.80E-13
4	2.70E-11	-4.02E-02	-9.70E-12
5	3.10E-11	-4.18E-02	-1.40E-11
6	3.40E-11	-4.24E-02	-1.80E-11
7	3.60E-11	-4.25E-02	-2.20E-11
8	3.80E-11	-4.23E-02	-2.70E-11

DISCUSSION

The analysis reveals that natural resource rents exhibit a self-correcting dynamic, with negative coefficients for their lag terms, suggesting that resource rents tend to revert to their long-term equilibrium over time. In contrast, FDI and GCE demonstrate strong persistence, with positive autocorrelations, meaning that both variables continue to influence natural resource rents over extended periods. The variance decomposition further highlights that changes in natural resource rents are predominantly driven by Inflation and Foreign Direct Investment, with GCE playing a comparatively minor role.

The results align with the Natural Resource Curse theory, which suggests that while resource wealth can provide substantial income, it often fails to translate into sustainable economic growth. As the study shows, inflation and foreign investment are key drivers of natural resource rents, but these rents remain subject to self-correction, highlighting the volatility and instability often associated with resource dependence. The theory of the Natural Resource Curse proposes that the exploitation of natural resources can exacerbate issues like economic instability, rent-seeking behaviors, and social conflicts (Arezki & Ploeg, 2010; Gedikli, 2020). This study's finding that inflation plays a major role in shaping resource rents supports this view, as inflation can destabilize the value of rents and contribute to the negative economic outcomes observed in resource-rich countries, particularly when accompanied by weak institutions. Moreover, the results also underline how foreign direct investment, often seen as a positive economic force, is intricately linked to natural resource rents, suggesting that external capital inflows can either stabilize or destabilize the economy depending on how they are managed. This dynamic resonates with the Dutch Disease concept, where an influx of foreign investment related to resource extraction can lead to the appreciation of the domestic currency, harming other sectors such as manufacturing (Kojo, 2015; Oomes & Kalcheva, 2007). While this study does not directly examine the Dutch Disease, the persistence of FDI in influencing resource rents supports the broader concept that external factors related to resource wealth can have long-term economic effects.

In addition, the study highlights the role of institutional quality in managing natural resource rents, aligning with the literature that emphasizes the importance of governance in mitigating the adverse effects of resource dependence. Strong institutions are believed to help countries avoid the pitfalls of the resource curse by promoting transparency, reducing corruption, and fostering economic diversification (Arif et al., 2021; Faheem et al., 2021). The persistence of government consumption expenditure (GCE) in the model suggests that fiscal policy, influenced by institutional quality, plays a critical role in shaping economic outcomes related to natural resource rents. The relatively minor role of GCE in driving resource rents, however, suggests that while government spending is important, its impact is secondary to inflation and foreign investment, which are more immediately influential. This finding underscores the argument that institutional quality, through effective management and governance, is crucial for ensuring that resource rents contribute to long-term development rather than exacerbating economic instability.

Furthermore, the results from variance decomposition, which show that inflation and foreign investment are the dominant factors driving natural resource rents, suggest that macroeconomic stability and foreign capital flows are essential considerations for managing resource wealth. The study's focus on inflation as a key driver also reflects the broader literature that identifies inflationary pressures as a significant risk for resource-rich economies, often contributing to economic volatility and eroding the value of resource rents (Danish et al., 2023).

POLICY IMPLEMENTATION

The results of this study underline the critical role of inflation and foreign direct investment (FDI) in driving natural resource rents, while highlighting the relatively minor influence of government consumption expenditure (GCE). Policymakers should focus on maintaining macroeconomic stability, particularly controlling inflation, as it directly impacts the value of natural resource rents. Tightening inflation control mechanisms and adopting sound fiscal policies can mitigate the volatility often associated with resource rents. Furthermore, the strong persistence of FDI suggests that attracting foreign investment is essential for sustaining economic growth, but this must be managed carefully to avoid the potential risks of Dutch Disease. Effective governance and transparent institutions are key to ensuring that FDI and resource wealth are leveraged for long-term development rather than fueling short-term instability. Finally, although government spending plays a secondary role, fiscal policies should focus on strategic diversification to reduce over-reliance on natural resources.

FUTURE RESEARCH

Future research should explore the interaction between institutional quality and natural resource rents in greater depth, particularly how governance frameworks can mitigate the negative impacts of resource dependence. Additionally, a comparative analysis of different resource-rich countries could help identify context-specific factors that influence the effectiveness of policies aimed at managing natural resource wealth. Further studies should also examine the long-term effects of foreign direct investment (FDI) on economic diversification, especially in emerging economies.

CONCLUSION

Natural resource rent, defined as the surplus value derived from resource extraction after accounting for production and transportation costs, plays a significant role in the economic development of resource-rich countries. However, over-dependence on such rents can lead to economic instability, environmental degradation, and insufficient diversification. This study seeks to understand the dynamic relationships between these key variables, particularly investigating the factors influencing natural resource rents in Thailand, focusing on the roles of Foreign Direct Investment (FDI), Inflation (INF), and Government Consumption Expenditure (GCE) using a Bayesian Vector Autoregression (BVAR) model, which allows for the estimation of dynamic relationships between multiple variables and accounts for their lags, providing a more nuanced understanding of their interdependencies. Data collected for the study came from Thailand. The results of the analysis reveal that natural resource rents exhibit a self-correcting dynamic, with significant negative coefficients in their lag terms, indicating that resource rents tend to revert to their equilibrium over time. Conversely, FDI and GCE demonstrate strong persistence, with positive autocorrelations, suggesting that these factors have long-term effects on resource rents. Variance decomposition further identifies Inflation and FDI as the primary drivers of natural resource rents, with GCE playing a less significant role. From a policy perspective, the study's findings emphasize the need for effective inflation control and fiscal policies to maintain macroeconomic stability. Since inflation and FDI are significant drivers of resource rents, maintaining a stable economic environment and attracting foreign investment should be central to government policy.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by the School of Economics, Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand. This research is also supported by the computer engineering department, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok, Thailand. This research also supports by Central Food Retail Company Limited, Replenishment and Demand Forecasting Department, Thailand.

REFERENCES

- Arezki, R., & Van Der Ploeg, F. (2010). Trade policies, institutions and the natural resource curse. *Applied Economics Letters*, 17(15), 1443–1451. <https://doi.org/10.1080/13504850903035881>
- Adabor, O. (2023). The effect of financial development on natural gas resource rent in Ghana. *Resources Policy*, 83, 103620. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103620>
- Alvarado, R., Murshed, M., Cifuentes-Faura, J., Işık, C., Razib Hossain, M., & Tillaguango, B. (2023). Nexuses between rent of natural resources, economic complexity, and technological innovation: The roles of GDP, human capital, and civil liberties. *Resources Policy*, 85, 103637. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103637>
- Aprigliano, V. (2020). A large Bayesian VAR with a block-specific shrinkage: A forecasting application for Italian industrial production. *Journal of Forecasting*, 39(8), 1291–1304. <https://doi.org/10.1002/for.2687>
- Arif, U., Usman, M., & Khan, F. N. (2021). Natural resource rents and internal conflict: The role of institutional quality. *The Singapore Economic Review*, 1–21. <https://doi.org/10.1142/s0217590821500430>
- Björnland, H. C., & Thorsrud, L. A. (2013). Boom or gloom? Examining the Dutch disease in two-speed economies. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2602420>
- Bragoudakis, Z., & Krompas, I. (2023). Greek GDP forecasting using Bayesian multivariate models. *Bank of Greece*. <https://doi.org/10.52903/wp2023321>
- Faheem, M., Hussain, S., & Chaudhry, I. S. (2021). Natural resources, institutional quality and financial development in GCC member countries: Visiting ‘resource curse hypothesis’ by DCCE estimation. *Review of Economics and Development Studies*, 7(2), 131–145. <https://doi.org/10.47067/reads.v7i2.343>
- Gedikli, A. (2020). An investigation of the reasons for the natural resource curse: Selected country cases. *Business and Economics Research Journal*, 11(1), xx. <https://doi.org/10.20409/berj.2019.230>
- Ginn, W. (2024). Global supply chain disruptions and financial conditions. *Economics Letters*, 239, 111739. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2024.111739>
- Golombek, R., & Hoel, M. (1990). The resource rent for Norwegian natural gas (pp. 153–169). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3088-2_8
- Guo, Y., Zheng, H., Zeng, Y., Fan, W., Albahouth, B., & Bhuiyan, R. A. (2023). Natural resources extraction of RCEP trade bloc: Examining geopolitical risk and economic situation. *Resources Policy*, 86, 104227. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104227>
- Ibrahim, A., Huang, E., Li, M., Kashef, R., & Valencia, E. (2020). Bitcoin network mechanics: Forecasting the BTC closing price using vector auto-regression models based on endogenous and exogenous feature variables. *Journal of Risk and Financial Management*, 13(9), 189. <https://doi.org/10.3390/jrfm13090189>
- Kojo, N. C. (2015). Demystifying Dutch disease. *Journal of International Commerce, Economics and Policy*, 06(02), 1550010. <https://doi.org/10.1142/s1793993315500106>
- Leonov, M., & Volchkova, N. (2013). Searching for Dutch disease: Natural resources and industrial growth. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2241293>
- Langarudi, S. P., & Radzicki, M. J. (2021). Blessing or burden? Another look at the natural resource curse (pp. 311–346). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67190-7_12
- Mulwa, R. (2017). Natural resource curse and its causation channels in Africa. *African Journal of Economic and Sustainable Development*, 6(4), 244. <https://doi.org/10.1504/ajesd.2017.10016176>
- Omeje, K. (2016). Natural resource rent and stakeholder politics in Africa: Towards a new conceptualisation. *Commonwealth & Comparative Politics*, 54(1), 92–114. <https://doi.org/10.1080/14662043.2015.1126887>
- Omeje, K. (2021). Natural resources and rentier capitalism (pp. 85–116). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75170-8_4
- Omes, N., & Kalcheva, K. (2007). Diagnosing Dutch disease: Does Russia have the symptoms? *SSRN Electronic Journal*, 07(102). <https://doi.org/10.2139/ssrn.1001659>

- Pegg, S. (2009). Is there a Dutch disease in Botswana? *Resources Policy*, 35(1), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.07.003>
- Szalai, L. (2018). A review on the resource curse. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, 26(2), 179–189. <https://doi.org/10.3311/ppso.10021>
- Tang, C., Irfan, M., Razzaq, A., & Dagar, V. (2022). Natural resources and financial development: Role of business regulations in testing the resource-curse hypothesis in ASEAN countries. *Resources Policy*, 76, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102612>
- Wu, S., Li, L., & Li, S. (2018). Natural resource abundance, natural resource-oriented industry dependence, and economic growth: Evidence from the provincial level in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.012>
- Yan, H., Xiong, S., Deng, Q., & Xiao, W. (2022). Analysis of the impact of U.S. trade policy uncertainty on China based on Bayesian VAR model. *Journal of Mathematics*, 2022(1), 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/7124997>
- Zhang, Y., & Cui, X. (2023). Fintech, business regulations, and urbanization: Shaping the landscape of natural resource rent in G10 countries. *Resources Policy*, 89, 104551. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104551>

DYNAMIC INTERRELATIONSHIPS AMONG CRUDE OIL, NATURAL GAS, GOLD, AND OIL PRICES IN THAILAND: A BAYESIAN VECTOR AUTOREGRESSIVE APPROACH**Adirek Vajrapatkul**

School of Economics, Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand

Boonta Wayupab

Replenishment and Demand Forecasting Department, Central Food Retail Company Limited, Thailand

Pinmanee Vajrapatkul

Computer Engineering Department, Srinakharinwirot University, Thailand

Abstract

This study examines the dynamic interrelationships among the prices of copper, oil, natural gas, and gold. The primary objective is to understand the transmission mechanisms between these markets. This study employed a Bayesian Vector Autoregressive (BVAR) model, which allows for the analysis of the complex interdependencies among multiple time series data. The results show significant bidirectional causality between oil and natural gas prices, with oil prices having the most substantial influence on the prices of copper and gold. These findings underscore the critical role of energy markets in shaping broader commodity price trends. The analysis also reveals that price shocks in one sector tend to have cascading effects on related sectors, indicating the interconnectedness of commodity markets. The study highlights the need for policymakers to account for these interdependencies when designing economic strategies to mitigate the effects of price volatility.

Keywords: Crude Oil Prices, Natural Gas Prices, Gold Prices, and Oil Prices, Bayesian VAR**INTRODUCTION**

Crude oil is a naturally occurring, complex mixture of hydrocarbons and organic compounds that is found in geological formations beneath the Earth's surface (Cheng et al., 2012; Gad, 2014). It is primarily composed of various structural classes such as alkanes, aromatics, heterocyclic polar compounds, and asphaltenes (Uraizee et al., 1997). The properties and composition of crude oil can vary greatly depending on the geological conditions and biological materials from which it was formed over millions of years (Morgan & Watkinson, 1994). As the primary energy source for much of the world, crude oil holds immense economic value, and its derivatives fuel various industries, including transportation, energy production, and manufacturing. The term "petroleum" itself, derived from the Latin words meaning "rock oil," reflects its long-standing importance in human history (Groysman, 2014). Due to its complexity, understanding crude oil's composition and behavior is a challenging area of research for analytical chemists (Cheng et al., 2012). Moreover, crude oil's role extends beyond its industrial uses, influencing global trade patterns and economic stability, particularly as it is highly susceptible to shifts in market dynamics, geopolitical developments, and financial crises (Zhang et al., 2018).

The importance of crude oil is multifaceted. As a vital energy resource, crude oil plays a significant role in the global economy, accounting for 2.5% of global GDP (Giridhar et al., 2016). It directly affects a variety of sectors, from transportation to chemicals, plastics, and fertilizers (Giridhar et al., 2016). Crude oil's impact on industrial applications cannot be overstated, as it is a key raw material for many industries, including plastics, chemicals, and pharmaceuticals (Giridhar et al., 2016; Simanzhenkov & Idem, 2003). The oil industry not only shapes economic activity but also influences geopolitical relations, as global trade patterns of crude oil are closely linked to political stability, power dynamics, and international policies (Simanzhenkov & Idem, 2003; Zhang et al., 2018). In addition to its economic and industrial significance, crude oil plays a pivotal role in scientific and technological advancements, with studies on ultra-deep crude oils becoming critical for petroleum exploration (Cheng et al., 2024). Its diverse uses and far-reaching implications make crude oil an indispensable resource that continues to shape both economic and geopolitical landscapes globally.

Understanding the factors that determine crude oil prices is crucial for better forecasting, risk management, and economic planning. The determinants of crude oil prices are intricate and multifactorial, with supply and demand dynamics, geopolitical events, speculation, and economic conditions all playing important roles in influencing price fluctuations. Analyzing these factors is essential for developing more accurate forecasting models and ensuring informed decision-making in industries related to crude oil (Hamilton, 2009). For instance, research on oil price volatility using stochastic models has demonstrated the significant role of speculative activities, inventory levels, and market expectations in shaping price movements (Du et al., 2011). Additionally, studies have shown that changes in crude oil prices affect petroleum product prices in a nonlinear and asymmetric manner. While sustained decreases in crude oil prices influence the U.S. economy differently than sustained increases, much of this asymmetry is attributed to the adjustments within the energy sector (Huntington, 1998). Moreover, the impact of crude oil price changes on petroleum product prices varies across different price ranges, with significant asymmetries observed at lower quantiles of crude oil price fluctuations (Pal & Mitra, 2015). This highlights the complex relationship between crude oil and petroleum product prices and the need for a deeper understanding of these dynamics to improve forecasting and market predictions.

Several scholars have explored the factors influencing crude oil prices using diverse methodologies. For example, Wang et al. (2007) employed a hybrid approach combining rough set theory and wavelet neural networks to analyze crude oil price determinants, using text mining and wavelet neural networks to identify key factors. Bayesian methods have also gained prominence, with Zhang et al. (2015) utilizing a dynamic Bayesian structural time series model (DBSTS) to investigate oil price movements. Their model integrated Google Trends data to examine the impact of search data on crude oil prices, and the spike-and-slab method for factor selection was employed in combination with Bayesian model averaging (BMA) for price prediction. Furthermore, machine learning techniques such as the AGESL framework have been used to predict crude oil prices by integrating sentiment analysis with historical price data (Liu & Huang, 2021). These methods represent the ongoing evolution of forecasting techniques in response to the increasing complexity of the crude oil market, which demands more advanced and precise models for predicting price changes.

This research is motivated by the need to address existing gaps in understanding the dynamic interrelationships among crude oil, natural gas, gold, and copper prices. While significant studies have investigated the relationships between crude oil price and some variables, many challenges remain. Most existing research overlooks the interaction between gold prices and the energy market, despite gold being considered a safe-haven asset in times of market uncertainty. This research aims to fill these gaps by employing a Bayesian Vector Autoregressive (BVAR) model to examine the dynamic relationships among crude oil, natural gas, copper, and gold prices, focusing on their joint influence on crude oil prices. These contributions not only offer new insights into the interconnectedness of these markets but also provide a more nuanced understanding of how fluctuations in these markets can affect crude oil price dynamics. The remaining sections of this paper are structured as follows. Section 2 presents the literature review, which discusses previous research on crude oil. Section 3 outlines the methodology, including the data collection process, the construction of the BVAR model. Section 4 reports the results of the model estimation, providing detailed analysis of the coefficients, impulse response functions, and variance decomposition. Section 5 discusses the findings. Section 6 suggest for policy implementation.

LITERATURE REVIEW

This section highlights some concepts and previous studies to provide a foundation for analyzing dependencies between variables with in this study.

Volatility Spillover Effects in Financial Markets: Volatility spillover effects in financial markets refer to the transmission of volatility from one market to another, often across different asset classes or geographical regions. This phenomenon occurs when fluctuations in one market influence the volatility of other markets, creating interconnected risk dynamics (Hamid et al., 2020; Lee, 2005). Studies have shown significant volatility spillover effects between various financial markets, including stock markets, foreign exchange markets, and commodity markets. For instance, research has demonstrated bidirectional volatility spillovers between RMB foreign exchange markets and stock markets in China and Japan (Qin et al., 2018). Similarly, volatility transmission has been observed between crude oil markets and financial markets in China, with asymmetric effects noted between long-term and short-term volatilities (Wang & Li, 2021). However, the intensity of volatility spillover effects can vary depending on market conditions and global events. The 1997

Asian financial crisis, for example, dramatically increased volatility spillover effects among Asian stock markets (Lee, 2005). Similarly, the 2007-2008 global financial crisis and the 2009 European debt crisis led to pronounced volatility spillovers in emerging markets (Liow, 2015). These findings highlight the importance of considering external shocks and market regimes when analyzing volatility spillover effects. Volatility spillover effects play a crucial role in understanding the interconnectedness of global financial markets. They have significant implications for risk management, portfolio diversification, and policy-making. As demonstrated by various studies, these effects can be asymmetric, time-varying, and influenced by market conditions and global events (Jiang & Marsh, 2020; Xiong & Han, 2015; Yip et al., 2020). Understanding these dynamics is essential for investors, policymakers, and researchers in navigating the complex landscape of global financial markets.

Asymmetric Effects of Crude Oil Price Changes: Asymmetric effects of crude oil price changes refer to the phenomenon where increases and decreases in oil prices have disproportionate impacts on various economic indicators. This asymmetry is observed in multiple aspects of the economy, including economic output, inflation, exchange rates, and stock markets (Baek & Choi, 2020; Baek et al., 2020; Belloumi et al., 2023; Haliloglu & Berument, 2021; Huntington, 1998; Jiang & Liu, 2021). In terms of economic output, studies have shown that oil price increases tend to have a more significant impact on growth than price decreases. For instance, in Saudi Arabia, increases in crude oil prices result in higher output growth in the long run, while decreases do not affect output growth in either the short or long run (Belloumi et al., 2023). Similarly, in China, oil price fluctuations have asymmetric effects on growth across provinces in both the short and long run (Baek et al., 2020). However, the asymmetric effects are not limited to oil-exporting countries. In the United States, a significant part of the observed asymmetry is due to adjustments within the energy sector rather than the broader economy (Huntington, 1998). Furthermore, the asymmetric impact extends to exchange rates, with some countries experiencing more responsive currency movements to rising oil prices than to declining prices (Baek & Choi, 2020). The asymmetric effects of crude oil price changes are a complex phenomenon with far-reaching implications for various aspects of the economy. These effects can vary across countries, sectors, and time horizons, highlighting the need for nuanced policy responses to oil price fluctuations. Understanding these asymmetries is crucial for policymakers, investors, and economists in developing effective strategies to manage the impact of oil price volatility on economic stability and growth (Constantinos et al., 2018; Hassan, 2011; Olayungbo & Ojeyinka, 2021).

In empirical studies, the relationship between copper, natural gas, gold, and crude oil prices is complex and interconnected, with various factors influencing their dynamics. Crude oil prices often drive natural gas prices, exhibiting a long-term coupling and short-term decoupling behavior (Gatfaoui, 2016). However, the relationship between these commodities is not always stable and can change over time. A long-run relationship has been found between crude oil and copper prices, as well as between crude oil and maize prices (Kaulu, 2021). The connection between natural gas and crude oil prices is indirect, acting through competition at the margin between natural gas and residual fuel oil (Hartley et al., 2008).

While crude oil and natural gas prices tend to be related, a globally integrated natural gas market comparable to the global oil market has not evolved. The European natural gas market exhibits the strongest levels of integration, while the North American market shows the weakest (Erdős & Ormos, 2012). Gold prices and crude oil prices have been found to positively influence each other in the short term (Wang & Chueh, 2012). Additionally, the EUR/USD exchange rate has been shown to have a unidirectional causal relationship with oil prices, while gold prices also exhibit a unidirectional causal relationship with crude oil prices (Houcine et al., 2020).

Crude oil prices are influenced by a complex interplay of various factors, with supply and demand being the most significant determinants of oil price volatility over the long term (Zhao, 2022). In addition to these fundamental factors, macroeconomic indicators, geopolitical events, and financial market dynamics also play crucial roles in shaping price fluctuations (Dey et al., 2019; Zhao, 2022). Over the years, several innovative approaches have been employed to analyze and predict crude oil prices. For instance, Xu et al. (2007) developed a hybrid approach combining rough set theory and wavelet neural networks to identify and measure the importance of various factors affecting oil prices. This method allowed for a more comprehensive understanding of the key drivers of oil price movements. Similarly, Dey et al. (2019) utilized a nonstationary extreme value approach, incorporating factors such as world oil demand, supply, the dollar index, oil consumption, and geopolitical events to model crude oil prices. Their work highlighted the intricate relationship between these factors and oil price volatility. While alternative energy sources can influence oil

price fluctuations, their impact remains relatively minor compared to the more traditional factors such as supply and demand dynamics, as well as macroeconomic and geopolitical influences (Zhao, 2022). Recent studies have also explored the role of unconventional data sources, such as Google Trends, in forecasting oil price changes. For example, Lu et al. (2020) demonstrated that search data can serve as a valuable indicator of oil price fluctuations, offering a novel perspective on the predictors of oil price movements. Moreover, the COVID-19 pandemic and geopolitical conflicts, such as ongoing wars and trade tensions, have further contributed to significant price fluctuations, underscoring the vulnerability of oil markets to global crises (Aldabagh et al., 2023). In addition to these well-established factors, the influence of financial market indicators and investor sentiment has gained attention in recent years. Studies by Le et al. (2022) and Zhao et al. (2023) reveal that the effects of factors such as oil production, inventories, and financial market indicators on oil price volatility are not static but exhibit time-varying characteristics. During periods of economic recessions and crises, such as the COVID-19 pandemic, these factors have been shown to have more extreme effects on oil prices. Furthermore, online investor sentiment has been found to strengthen the correlation between oil price changes and external events, particularly during times of market stress. Zhao et al. (2023) suggest that the growing influence of investor sentiment, especially in extreme market conditions, highlights the importance of financial market dynamics in understanding and predicting oil price volatility. While the factors influencing crude oil prices are diverse and interconnected, the impact of these factors can vary over time, particularly under conditions of market instability and economic crises. This evolving understanding underscores the need for comprehensive models that can account for both traditional and unconventional determinants of oil price movements.

METHODOLOGY

Bayesian Vector Autoregressive (BVAR) models are advanced statistical tools used for forecasting and analyzing complex dynamics between multiple time series variables, particularly in macroeconomics. These models combine the traditional Vector Autoregressive (VAR) approach with Bayesian statistical methods (Huber & Rossini, 2022; Lidiema et al., 2018). BVAR models treat model parameters as random variables and assign prior probabilities to them, which helps overcome limitations of standard VAR models, such as overfitting and reduced degrees of freedom in cases with short time series data (Lidiema et al., 2018; Ma et al., 2021). This Bayesian approach allows for the incorporation of prior information or beliefs about the relationships between variables, which can improve forecast accuracy and model performance (Dua & Ray, 1995; Seung & Ahn, 2010). A standard BVAR model can be written as:

$$Y_t = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \dots + A_p Y_{t-p} + u_t$$

where Y_t is a vector of endogenous variables at time t , which includes Copper Prices (COP), Natural Gas Prices (GAS), Gold Prices (GOL), and Crude Oil Prices (OIL). A_1, A_2, \dots, A_p are matrices of coefficients to be estimated. u_t is the vector of error terms, which follows a normal distribution $u_t \sim N(0, \Sigma)$, with Σ being the variance-covariance matrix of residuals.

The BVAR methodology introduces prior distributions to these parameters to mitigate overfitting and reduce uncertainty in the coefficient estimates. The priors are incorporated into the model estimation through Bayesian inference, and posterior distributions of the parameters are derived using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) techniques. This approach allows the inclusion of prior beliefs about the structure of the model, which is particularly useful when the time-series data is nonstationary or exhibits over-parameterization issues. The data, sourced from the yahoo database, spans from daily data between 09/26/2019 to 09/25/2024 and is used to estimate this model.

RESULT

This section begins by examining the descriptive statistics for key economic variables, i.e., Copper Prices (COP), Oil Prices (OIL), Gold Prices (GOL), and Natural Gas Prices (GAS).

According to Table 1, COP has a mean of 3.7433 with a standard deviation of 0.6715, and its values range from 2.1010 to 5.1060. OIL has a mean of 70.2564 and a standard deviation of 20.4455, with a price range from -37.6300 to 123.7000. GOL has a mean of 1,885.6390, a standard deviation of 229.0209, and a range of 1,452.1000 to 2,684.7000. GAS, on the other hand, has a mean of 3.4628, a standard deviation of 1.8667, and a price range from 1.4820 to 9.6800. These initial statistics provide a foundational understanding of the data's variability and central tendencies. Figure 1 shows Correlation matrix and Figure 2 presents Time Series of variables.

The relationships between these variables are explored in Table 2, which reveals several notable correlations. COP shows a moderate positive correlation with OIL (0.7034), GOL (0.5272), and GAS (0.3013). OIL exhibits a strong positive correlation with COP (0.7034) and a moderate positive correlation with GAS (0.6266), though it has a weaker correlation with GOL (0.2686). GOL, in turn, demonstrates a positive correlation with COP (0.5272) but an inverse relationship with GAS (-0.2150). GAS has a moderate positive correlation with OIL (0.6266) and a negative correlation with GOL (-0.2150), indicating a complex interplay among the variables.

Table 3 presents the details of the Bayesian Vector Autoregressive (BVAR) model estimation, which was based on a total of 12,500 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) iterations, with a burn-in period of 2,500 iterations. The final sample size for the MCMC was 10,000, and the dataset consisted of 1,256 observations. The model achieved an acceptance rate of 100%, meaning that all proposed parameter values were accepted during the MCMC process. Efficiency metrics were also reported, with the minimum efficiency at 0.9644, the average efficiency at 0.9973, and the maximum efficiency at 1.0000, demonstrating the model's high computational performance and accuracy.

In Table 4, the BVAR model estimation results are detailed for the key variables. For COP, the first lag (COP L1) has a coefficient of 0.9828 with a small standard deviation (0.0245), indicating a strong and stable relationship with its own past values. The second lag (COP L2) has a smaller effect (0.0145), with a wider confidence interval, suggesting weaker predictability from earlier lags. For OIL, the first lag (OIL L1) shows a strong and statistically significant relationship with its past values, with a coefficient of 0.8142 and a small standard deviation (0.0241). The second lag (OIL L2) also proves significant with a coefficient of 0.1592, and its credible intervals do not overlap with zero, confirming its robustness. For GOL, the coefficients for both lags (GOL L1 and GOL L2) are smaller in magnitude, with the first lag showing a coefficient of 0.0001 and the second lag exhibiting a negative relationship (-0.0001). The wider confidence interval for GOL L2 suggests more uncertainty in its influence. In the case of GAS, the first lag (GAS L1) has a positive coefficient (0.0046), but with a relatively high standard deviation (0.0067), reflecting the variability in its influence. The second lag (GAS L2) shows a negative coefficient (-0.0043), though the confidence interval includes zero, indicating less certainty about this effect. Table 5 shows stability analysis.

Table 6 provides the results of the variance decomposition, which quantifies the contribution of COP, GOL, and GAS to explaining the variance in OIL over eight periods. The contribution of COP to explaining the variance in OIL increases over time, starting at 1.9615% in the first period and reaching 5.0438% by the eighth period, emphasizing the growing influence of COP on OIL. Conversely, GOL has a minimal and constant impact on OIL, with its contribution remaining close to zero throughout the periods, as evidenced by values such as 0.0055% in the first period and 0.0008% in the eighth period. This suggests that, in this model, Gold Prices do not significantly explain variations in Oil Prices. GAS, however, exhibits a steadily increasing impact on OIL, with its contribution growing from 0.6571% in the first period to 1.0056% by the eighth period. While Gas Prices have a smaller influence than COP, their impact on OIL becomes more prominent over time. The variance decomposition analysis highlights that COP has the largest and growing influence on explaining the variance in OIL, underscoring the importance of Crude Oil Prices in forecasting Oil Prices. Although Gas Prices also play an increasingly significant role, their contribution remains smaller compared to COP. Gold Prices, however, have a negligible effect on Oil Price fluctuations in this model. This reinforces the finding that the energy market is sensitive to changes in Crude Oil and Gas Prices, whereas Gold Prices have minimal explanatory power.

Table 1 Descriptive statistics

Variable	Mean	Std. dev.	Min	Max
COP	3.7433	0.6715	2.1010	5.1060
OIL	70.2564	20.4455	- 37.6300	123.7000
GOL	1,885.6390	229.0209	1,452.1000	2,684.7000
GAS	3.4628	1.8667	1.4820	9.6800

Table 2 Correlation matrix

	COP	OIL	GOL	GAS
COP	1.0000	0.7034	0.5272	0.3013
OIL	0.7034	1.0000	0.2686	0.6266
GOL	0.5272	0.2686	1.0000	- 0.2150
GAS	0.3013	0.6266	- 0.2150	1.0000

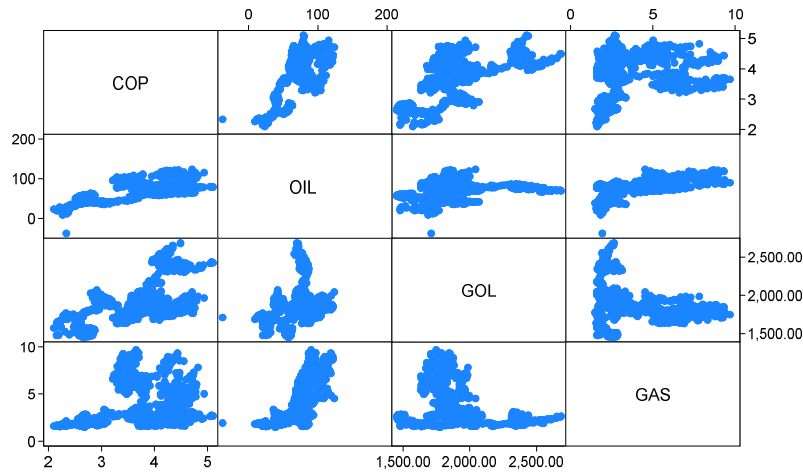


Figure 1 Correlation matrix

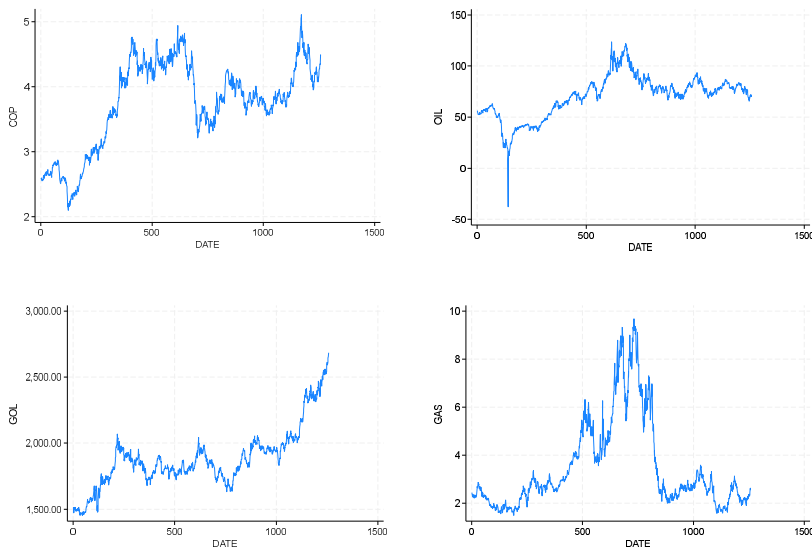


Figure 2 Time Series of variables

Table 3 Model summary

Metric	Value
MCMC iterations	12,500.0000
Burn-in	2,500.0000
MCMC sample size	10,000.0000
Number of obs	1,256.0000
Acceptance rate	1.0000
Efficiency (min)	0.9644
Efficiency (avg)	0.9973
Efficiency (max)	1.0000

Table 4 BVAR model estimation

Variable	Mean	Std. Dev.	MCSE	Median	95% Cred. Interval (Lower)	95% Cred. Interval (Upper)
COP						
COP L1	9.8280E-01	2.4516E-02	2.4000E-04	9.8246E-01	9.3460E-01	1.0310E+00
COP L2	1.4499E-02	2.4566E-02	2.4300E-04	1.4876E-02	-3.3112E-02	6.3038E-02
OIL L1	5.0520E-04	5.0030E-04	4.9000E-06	5.0280E-04	-4.6740E-04	1.4746E-03
OIL L2	-6.5750E-04	4.9520E-04	4.9000E-06	-6.5610E-04	-1.6310E-03	3.0150E-04
GOL L1	1.1540E-04	7.2200E-05	7.2000E-07	1.1610E-04	-2.8000E-05	2.5580E-04
GOL L2	-1.0770E-04	7.2200E-05	7.2000E-07	-1.0800E-04	-2.4950E-04	3.5600E-05
GAS L1	4.5902E-03	6.6645E-03	6.7000E-05	4.5886E-03	-8.4599E-03	1.7567E-02
GAS L2	-4.2704E-03	6.6691E-03	6.7000E-05	-4.2154E-03	-1.7158E-02	8.8621E-03
_cons	6.6330E-03	1.5073E-02	1.5100E-04	6.6711E-03	-2.2769E-02	3.6577E-02
OIL						
COP L1	1.3300E+00	1.1825E+00	1.1825E-02	1.3245E+00	-9.7400E-01	3.6175E+00
COP L2	1.1819E+00	1.1818E+00	1.1819E-02	-7.5441E-01	-3.0460E+00	1.5408E+00
OIL L1	8.1421E-01	2.4051E-02	2.4100E-04	8.1379E-01	7.6741E-01	8.6147E-01
OIL L2	1.5924E-01	2.3814E-02	2.3800E-04	1.5919E-01	1.1274E-01	2.0597E-01
GOL L1	5.5915E-03	3.4529E-03	3.5000E-05	5.6241E-03	-1.0941E-03	1.2330E-02
GOL L2	-5.7686E-03	3.4615E-03	3.5000E-05	-5.7848E-03	-1.2548E-02	1.0108E-03
GAS L1	5.3302E-01	3.1665E-01	3.1710E-03	5.3575E-01	-1.0155E-01	1.1566E+00
GAS L2	-4.2710E-01	3.1579E-01	3.1240E-03	-4.2795E-01	-1.0447E+00	1.9719E-01
_cons	-3.1089E-01	7.1557E-01	7.1560E-03	-3.2297E-01	-1.7281E+00	1.1019E+00
GOL						
COP L1	-5.2111E+00	8.3652E+00	8.3652E-02	-5.2160E+00	-2.1277E+01	1.1248E+01
COP L2	4.6732E+00	8.3704E+00	8.3704E-02	4.7000E+00	-1.1820E+01	2.1010E+01
OIL L1	5.0233E-01	1.7186E-01	1.6850E-03	5.0428E-01	-1.6112E-01	8.3972E-01
OIL L2	-4.5885E-01	1.7075E-01	1.6770E-03	-4.5951E-01	-7.9430E-01	-1.2716E-01
GOL L1	9.6875E-01	2.4591E-02	2.4600E-04	9.6863E-01	9.2112E-01	1.0173E+00
GOL L2	3.0134E-02	2.4604E-02	2.4600E-04	3.0265E-02	-1.7896E-02	7.7916E-02
GAS L1	-1.1299E+00	2.2433E+00	2.2433E-02	-1.1335E+00	-5.4633E+00	3.2682E+00
GAS L2	3.5042E-01	2.2361E+00	2.2361E-02	3.6182E-01	-4.0221E+00	4.7468E+00
_cons	4.7351E+00	5.1123E+00	5.1123E-02	4.6956E+00	-5.0629E+00	1.4877E+01
GAS						
COP L1	9.8988E-02	8.9255E-02	8.9300E-04	9.8329E-02	-7.7967E-02	2.7300E-01
COP L2	-9.0723E-02	8.9357E-02	8.9400E-04	-9.0363E-02	-2.6491E-01	8.7374E-02

Variable	Mean	Std. Dev.	MCSE	Median	95% Cred. Interval (Lower)	95% Cred. Interval (Upper)
OIL L1	2.5162E-03	1.8131E-03	1.8000E-05	2.5095E-03	-1.0642E-03	6.0464E-03
OIL L2	-2.0839E-03	1.8027E-03	1.8000E-05	-2.0688E-03	-5.6783E-03	1.4483E-03
GOL L1	-3.1460E-04	2.6390E-04	2.6000E-06	-3.1250E-04	-8.3030E-04	1.9690E-04
GOL L2	2.9140E-04	2.6390E-04	2.6000E-06	2.8950E-04	-2.2410E-04	8.0700E-04
GAS L1	9.0841E-01	2.3770E-02	2.4000E-04	9.0856E-01	8.6199E-01	9.5440E-01
GAS L2	8.1520E-02	2.3774E-02	2.4000E-04	8.1502E-02	3.5157E-02	1.2828E-01
_cons	1.7681E-02	5.5122E-02	5.5100E-04	1.7767E-02	-8.7700E-02	1.2602E-01

Table 5 stability

Eigenvalue Index	Mean	Std. Dev.	MCSE	Median	95% Cred. Interval (Lower)	95% Cred. Interval (Upper)
1	9.9994E-01	2.5795E-03	2.6000E-05	9.9983E-01	9.9518E-01	1.0051E+00
2	9.9570E-01	2.8872E-03	2.9000E-05	9.9587E-01	9.8984E-01	1.0008E+00
3	9.9023E-01	4.3731E-03	4.4000E-05	9.9074E-01	9.8107E-01	9.9727E-01
4	9.7904E-01	6.8396E-03	6.8000E-05	9.7936E-01	9.6514E-01	9.9075E-01
5	1.9263E-01	2.5205E-02	2.5200E-04	1.9318E-01	1.4220E-01	2.3951E-01
6	8.0063E-02	2.4148E-02	2.4100E-04	7.7859E-02	3.9412E-02	1.3211E-01
7	4.3404E-02	1.9182E-02	1.9200E-04	4.1547E-02	1.1571E-02	8.4094E-02
8	2.4382E-02	1.5579E-02	1.5600E-04	2.2660E-02	1.2591E-03	5.8205E-02

Pr(eigenvalues lie inside the unit circle) = 0.5230

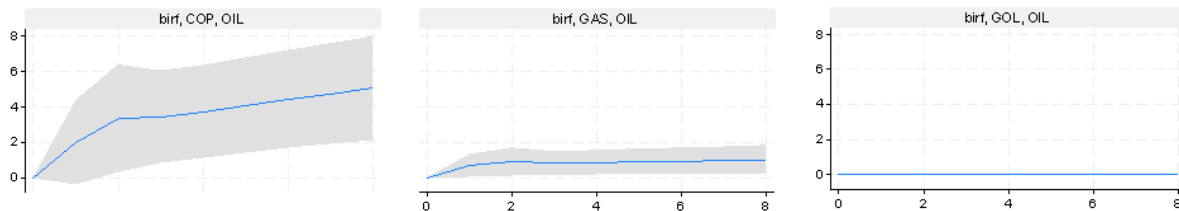


Figure 3 Impulse response analysis

Table 6 Variance decomposition

Step	COP to OIL	GOL to OIL	GAS to OIL
1	1.9615	0.0055	0.6571
2	3.3068	- 0.0014	0.8800
3	3.3762	- 0.0015	0.8058
4	3.6723	0.0015	0.8505
5	4.0532	0.0013	0.8984
6	4.3903	0.0011	0.9337
7	4.7188	0.0010	0.9699
8	5.0438	0.0008	1.0056

DISCUSSION

The findings from Table 1 and Table 2 establish that COP has a strong positive correlation with both OIL and GOL, while GAS shows a moderate correlation with OIL and a negative correlation with GOL. This supports previous studies that highlight the complex, interconnected nature of commodity markets, particularly between crude oil, natural gas, and other asset classes such as gold (Gatfaoui, 2016; Wang & Chueh, 2012). The correlations observed in the results reflect the dual nature of these relationships, i.e., while some variables, such as COP and OIL, exhibit strong interconnections, others, such as GOL and GAS, show a more nuanced relationship.

The BVAR model estimation results, as presented in Table 4, offer further insights into the dynamics between the variables. Specifically, the strong relationship between the first lag of COP (COP L1) and OIL, with a coefficient of 0.9828, emphasizes the dominant role of COP in explaining future OIL prices. Furthermore, the volatility spillovers from GAS are observed in the results, with the first lag of GAS (GAS L1) having a positive coefficient, although with substantial variability, while the second lag (GAS L2) shows a negative but less certain impact. This finding is consistent with studies that explore volatility spillover effects in financial markets, particularly in the context of energy markets where natural gas and oil prices exhibit interdependencies, although these relationships can fluctuate based on market conditions (Wang & Li, 2021; Qin et al., 2018).

The variance decomposition analysis in Table 6 shows that COP contributes progressively more to explaining the variance in OIL over time. In contrast, the contribution of GOL remains minimal throughout the eight periods, and the contribution of GAS increases steadily but remains smaller compared to COP. The minimal impact of GOL on OIL in this study aligns with the literature that suggests gold prices have a weak and inconsistent relationship with oil prices, reinforcing the idea that gold, while a safe-haven asset in times of economic uncertainty, does not significantly affect oil price dynamics in comparison to the energy market (Wang & Chueh, 2012).

POLICY IMPLEMENTATION

Policymakers in Thailand should consider diversifying their energy sources and economic strategies to mitigate the adverse effects of price fluctuations in commodities like oil and natural gas. Moreover, the tight interdependence between commodity markets suggests that change in one sector may have significant spillover effects on others. It is crucial for Thai policymakers to adopt proactive, data-driven policies that account for these interconnected relationships.

FUTURE RESEARCH

Future research should explore the impact of renewable energy sources on the pricing dynamics of traditional commodities like oil and natural gas. Additionally, investigation into the role of financial markets and speculative behaviors in commodity price fluctuations would also enhance forecasting models.

CONCLUSION

This study examined the dynamic interrelationships between copper, oil, natural gas, and gold prices. The research utilized a Bayesian Vector Autoregressive (BVAR) approach to capture the complex interactions among these commodities. The data used in the analysis were sourced from historical price series of copper, oil, natural gas, and gold. The results of the analysis reveal significant interdependencies between the prices of these commodities, with oil and natural gas prices exhibiting the most pronounced influence on the prices of copper and gold. Policymakers must consider the interlinked nature of global commodity markets when designing strategies to stabilize domestic prices and minimize economic volatility. Diversification of energy sources and the promotion of energy independence are critical to reducing the country's vulnerability to external price shocks.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by the School of Economics, Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand. This research is also supported by the computer engineering department, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok, Thailand. This research also support by Central Food Retail Company Limited, Replenishment and Demand Forecasting Department, Thailand.

REFERENCES

- Adeniyi, E. A., Misra, S., Sharma, M. M., Awotunde, J. B., Oluranti, J., & Gbadamosi, B. (2022). Crude oil price prediction using particle swarm optimization and classification algorithms. *Springer*, 1384–1394. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96308-8_128
- Aldabagh, H., Zheng, X., & Mukkamala, R. (2023). A hybrid deep learning approach for crude oil price prediction. *Journal of Risk and Financial Management*, 16(12), 503. <https://doi.org/10.3390/jrfm16120503>
- Baek, J., & Choi, Y. J. (2020). Do fluctuations in crude oil prices have symmetric or asymmetric effects on the real exchange rate? Empirical evidence from Indonesia. *The World Economy*, 44(1), 312–325. <https://doi.org/10.1111/twec.12987>
- Baek, J., Lu, G., & Nam, S. (2020). On the asymmetric effects of changes in crude oil prices on economic growth: New evidence from China's 31 provinces. *Australian Economic Papers*, 60(2), 328–360. <https://doi.org/10.1111/1467-8454.12207>
- Belloumi, M., Aljazeera, A., & Alshehry, A. (2023). Study of the impact of crude oil prices on economic output and inflation in Saudi Arabia. *Resources Policy*, 86, 104179. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104179>
- Cheng, C.-N., Shie, J., Lai, J.-H., Huang, M.-Z., & Oung, J.-N. (2012). Analysis of polar components in crude oil by ambient mass spectrometry. *Institute for New Technologies*. <https://doi.org/10.5772/36261>
- Cheng, P., Yu, S., Ren, Y., & Tian, H. (2024). Identification of complex crude oil categories in ultra-deep petroleum systems based on a new fluorescence analysis method: An example from the southwestern Tabei Uplift, Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 165, 106888. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106888>
- Constantinos, K., Nikolaos, S., Eleni, Z., & Bantis, D. (2018). Greenhouse gas emissions–crude oil prices: An empirical investigation in a nonlinear framework. *Environment, Development and Sustainability*, 21(6), 2835–2856. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0163-6>
- Dey, A. K., Edwards, A., & Das, K. P. (2019). Determinants of high crude oil price: A nonstationary extreme value approach. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 14(1). <https://doi.org/10.1007/s42519-019-0070-7>
- Du, X., Yu, C. L., & Hayes, D. J. (2011). Speculation and volatility spillover in the crude oil and agricultural commodity markets: A Bayesian analysis. *Energy Economics*, 33(3), 497–503. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.12.015>
- Dua, P., & Ray, S. C. (1995). A BVAR model for the Connecticut economy. *Journal of Forecasting*, 14(3), 167–180. <https://doi.org/10.1002/for.3980140303>
- Erdős, P., & Ormos, M. (2012). Natural gas prices on three continents. *Energies*, 5(10), 4040–4056. <https://doi.org/10.3390/en5104040>
- Fan, L., Pan, S., Li, Z., & Li, H. (2016). An ICA-based support vector regression scheme for forecasting crude oil prices. *Technological Forecasting and Social Change*, 112, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.04.027>
- Gad, S. C. (2014). Petroleum hydrocarbons. In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 838–840). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.00899-x>
- Gatfaoui, H. (2016). Capturing long-term coupling and short-term decoupling crude oil and natural gas prices. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2872780>

- Giridhar, B. S., Seth, D., & Krishnaswami, S. (2016). Impact of crude oil price changes on select Indian industries. *International Journal of Social Sciences and Management*, 3(2), 87–92. <https://doi.org/10.3126/ijssm.v3i2.14622>
- Groysman, A. (2014). History of crude oil and petroleum products. In *Springer Netherlands* (pp. 221–226). https://doi.org/10.1007/978-94-007-7884-9_10
- Haliloglu, E. Y., & Berument, M. H. (2021). The asymmetric effects of crude oil prices and exchange rates on diesel prices for 27 European countries. *Global Business Review*, 097215092199903. <https://doi.org/10.1177/0972150921999035>
- Hamilton, J. D. (2009). Understanding crude oil prices. *The Energy Journal*, 30(2), 179–206. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-vol30-no2-9>
- Hamid, K., Saeed, M. Y., & Ghafoor, M. M. (2020). Emerging markets and volatility spillover effects: Empirical evidence from regional emerging economies of Pakistan, China, India, and Bangladesh. *Global Economics Review*, 5(1), 102–116. [https://doi.org/10.31703/ger.2020\(v-i\).09](https://doi.org/10.31703/ger.2020(v-i).09)
- Hartley, P. R., Rosthal, J. E., & Medlock, K. B. (2008). The relationship of natural gas to oil prices. *The Energy Journal*, 29(3), 47–66. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-vol29-no3-3>
- Hassan, S. A. (2011). Modeling asymmetric volatility in oil prices. *Journal of Applied Business Research (JABR)*, 27(3), 71. <https://doi.org/10.19030/jabr.v27i3.4214>
- Houcine, B., Hanane, A., Abdessalam, B., Youcef, H., & Zouheyr, G. (2020). The relationship between crude oil prices, EUR/USD exchange rate, and gold prices. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(5), 234–242. <https://doi.org/10.32479/ijeep.9523>
- Huber, F., & Rossini, L. (2022). Inference in Bayesian additive vector autoregressive tree models. *The Annals of Applied Statistics*, 16(1). <https://doi.org/10.1214/21-aos1488>
- Huntington, H. G. (1998). Crude oil prices and U.S. economic performance: Where does the asymmetry reside? *The Energy Journal*, 19(4), 107–132. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-vol19-no4-5>
- Jiang, J., & Marsh, T. L. (2020). Volatility spillover effects in the oil and financial market: Cross-hedging in the US oil market and the energy pipeline sector. *World Scientific* (pp. 267–299). https://doi.org/10.1142/9789813278387_0012
- Jiang, W., & Liu, Y. (2021). The asymmetric effect of crude oil prices on stock prices in major international financial markets. *The North American Journal of Economics and Finance*, 56, 101357. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2020.101357>
- Kaulu, B. (2021). Effects of crude oil prices on copper and maize prices. *Future Business Journal*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s43093-021-00100-w>
- Lee, S. J. (2005). Volatility spillover among stock markets in six Asian countries and the United States. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.838391>
- Le, T.-H., Boubaker, S., Bui, M. T., & Park, D. (2022). On the volatility of WTI crude oil prices: A time-varying approach with stochastic volatility. *Energy Economics*, 117, 106474. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106474>
- Liow, K. H. (2015). Conditional volatility spillover effects across emerging financial markets. *Asia-Pacific Journal of Financial Studies*, 44(2), 215–245. <https://doi.org/10.1111/ajfs.12087>
- Liu, J., & Huang, X. (2021). Forecasting crude oil price using event extraction. *IEEE Access*, 9, 149067–149076. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3124802>
- Lidiema, C., Waititu, A., & Ngunyi, A. (2018). Forecasting household credit in Kenya using Bayesian vector autoregressive (BVAR) model. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 6(1), 17–24. <https://doi.org/10.12691/ajams-6-1-4>
- Lu, J., Ding, J., Liu, C., & Jin, Y. (2018). Prediction of physical properties of crude oil based on ensemble random weights neural network. *IFAC PapersOnLine*, 51(18), 655–660. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.349>

- Lu, Q., Wang, S., Li, Y., & Chai, J. (2020). Crude oil price analysis and forecasting: A perspective of “new triangle.” *Energy Economics*, 87, 104721. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104721>
- Ma, J., Shang, Y., & Zhang, H. (2021). Application of Bayesian vector autoregressive model in regional economic forecast. *Complexity*, 2021, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/9985072>
- Morgan, P., & Watkinson, R. J. (1994). Biodegradation of components of petroleum. In *Springer Netherlands* (pp. 1–31). https://doi.org/10.1007/978-94-011-1687-9_1
- Olayungbo, D. O., & Ojeyinka, T. A. (2021). Crude oil prices pass-through to retail petroleum product prices in Nigeria: Evidence from hidden cointegration approach. *Economic Change and Restructuring*, 55(2), 951–972. <https://doi.org/10.1007/s10644-021-09336-6>
- Pal, D., & Mitra, S. K. (2015). Asymmetric impact of crude price on oil product pricing in the United States: An application of multiple threshold nonlinear autoregressive distributed lag model. *Economic Modelling*, 51, 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2015.08.026>
- Qin, F., Zhang, Z., & Zhang, J. (2018). RMB exchange rates and volatility spillover across financial markets in China and Japan. *Risks*, 6(4), 120. <https://doi.org/10.3390/risks6040120>
- Rochman, A., Zuhdi, A., & Amelia, R. (2022). Crude oil price forecasting using long short-term memory and support vector regression. *Ultimatics: Jurnal Teknik Informatika*, 14(2), 96–102. <https://doi.org/10.31937/ti.v14i2.2855>
- Seung, C. K., & Ahn, S. K. (2010). Forecasting industry employment for a resource-based economy using Bayesian vector autoregressive models. *Review of Regional Studies*, 40(2). <https://doi.org/10.52324/001c.8170>
- Simanzhenkov, V., & Idem, R. (2003). Crude oil chemistry. *CRC*. <https://doi.org/10.1201/9780203014042>
- Uraizee, F. A., Venosa, A. D., & Suidan, M. T. (1997). A model for diffusion-controlled bioavailability of crude oil components. *Biodegradation*, 8(5), 287–296. <https://doi.org/10.1023/a:1008293024768>
- Urrutia, J. D., Alair, A. R., Iglesias, S. A., Malvar, R. J., Baccay, E. B., Oliquino, A. B., & Gano, L. A. (2018). Forecasting petroleum product prices in the Philippines. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(20), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i20/123340>
- Wang, H., & Li, S. (2021). Asymmetric volatility spillovers between crude oil and China’s financial markets. *Energy*, 233, 121168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121168>
- Wang, Y. S., & Chueh, Y. L. (2012). Dynamic transmission effects between the interest rate, the US dollar, and gold and crude oil prices. *Economic Modelling*, 30, 792–798. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2012.09.052>
- Yip, P. S., Brooks, R., Do, H. X., & Nguyen, D. K. (2020). Dynamic volatility spillover effects between oil and agricultural products. *International Review of Financial Analysis*, 69, 101465. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2020.101465>
- Zhang, J. (2023). Crude oil price prediction based on multiple ensemble learning algorithms. *BCP Business & Management*, 38, 444–451. <https://doi.org/10.54691/bcpbm.v38i.3725>
- Zhang, K., Lan, H., & Xing, W. (2018). Global trade pattern of crude oil and petroleum products: Analysis based on complex network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 153(2), 022033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/2/022033>
- Zhao, J. (2022). Exploring the influence of the main factors on the crude oil price volatility: An analysis based on GARCH-MIDAS model with Lasso approach. *Resources Policy*, 79, 103031. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103031>
- Zhao, L.-T., Xing, Y.-Y., Zhao, Q.-R., & Chen, X.-H. (2023). Dynamic impacts of online investor sentiment on international crude oil prices. *Resources Policy*, 82, 103506. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103506>
- Zhao, L., Zhang, H., Wan, Y., Zhang, Z., & Cheng, L. (2015). A VAR-SVM model for crude oil price forecasting. *International Journal of Global Energy Issues*, 38(1/2/3), 126. <https://doi.org/10.1504/ijgei.2015.069485>

Zhou, W., Zhang, X., & Wang, J. (2007). A new hybrid approach for analysis of factors affecting crude oil price. In *Springer Berlin Heidelberg* (pp. 964–971). https://doi.org/10.1007/978-3-540-72588-6_154

EXPLORING THE INTERRELATIONSHIPS BETWEEN ECONOMIC INDICATORS AND NATURAL RESOURCE RENTS IN THAILAND: A TWO-STAGE LEAST SQUARES ANALYSIS**Adirek Vajrapatkul**

School of Economics, Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand

Boonta Wayupab

Replenishment and Demand Forecasting Department, Central Food Retail Company Limited, Thailand

Pinmanee Vajrapatkul

Computer Engineering Department, Srinakharinwirot University, Thailand

Abstract

This research explores the interrelationships between Gross Domestic Product (GDP), natural resource rents, and key economic indicators, including unemployment, gross capital formation, and tax revenue, within the context of Thailand. Motivated by gaps in the literature, which often fail to consider the simultaneous dependencies among these variables, the study aims to provide a comprehensive understanding of their dynamics and policy implications for sustainable economic growth. Using annual data from the World Bank for the period 1972–2020, the study employs the Two-Stage Least Squares (TSLS) methodology to address issues of endogeneity and simultaneity in the analysis. The results reveal that tax revenue significantly and positively impacts GDP, underscoring the importance of effective fiscal policies. Conversely, unemployment and gross capital formation negatively affect GDP and resource rents, highlighting structural inefficiencies. While natural resource rents exhibit an insignificant effect on GDP in standard regression models, the TSLS analysis demonstrates a significant positive relationship, suggesting that effective governance and institutional quality can transform resource rents into economic growth. These findings indicate the need for targeted policies that strengthen fiscal mechanisms, reform labor markets, optimize investment strategies to support sustainable growth.

Keywords: Natural Resource Rents, GDP Growth, Unemployment, Economic Indicators, Two-Stage Least Squares, Thailand.

INTRODUCTION

Gross Domestic Product (GDP) is one of the most significant indicators of a nation's economic performance and productivity, as it encapsulates the total economic output of a country. Its importance is highlighted by its widespread use in evaluating economic growth and comparing the economic performance of nations over time (Wyżnikiewicz, 2017). GDP not only reflects the size of an economy but also provides insights into productivity and resource utilization (Chamberlin, 2011). However, despite its prominence, GDP has certain limitations. Critics argue that it falls short in measuring welfare and social progress effectively, leading some researchers to propose alternative frameworks like the Gross Domestic Product of Welfare (GDPW) to better encompass societal development (Cheng & Cao, 2014).

The factors influencing GDP are diverse and vary across regions and time periods. Key economic factors such as trade openness, foreign direct investment (FDI), labor force participation, and monetary policy, including money supply and inflation, are closely linked to GDP growth (Gonzalez et al., 2022; Ayub & Shah, 2015). Additionally, macroeconomic variables like imports and exports positively contribute to GDP, whereas higher inflation rates exhibit a negative relationship (Hasan et al., 2022). In Pakistan, for instance, economic contributions have shifted from agriculture to non-agriculture sectors, while in Kosovo, post-COVID-19 economic growth has been significantly influenced by consumption, remittances, and exports, alongside an inverse relationship with imports and inflation (Syed & Shaikh, 2013; Spahiu & Spahiu, 2022). Furthermore, sector-specific investments, such as those in health care or entrepreneurial activities, have been found to influence GDP outcomes significantly (Mladenović et al., 2016; Harmina, 2016). These findings underscore

the complex and context-specific interplay of factors affecting GDP, necessitating a nuanced understanding of these determinants.

The relationship between natural resource rents and GDP is another critical area of economic analysis. While resource rents can enhance GDP in the short term, as seen in countries like Kuwait and Saudi Arabia, their long-term effects are often mixed. For example, Saudi Arabia has experienced positive long-term impacts on GDP and total factor productivity, whereas Kuwait has encountered declines in productivity, human capital, and institutional quality (Aljarallah & Angus, 2020; Aljarallah, 2021). These contrasting scenarios suggest that natural resources can either be a blessing or a curse, depending on the broader economic and institutional context. Factors such as income levels, institutional quality, and resource dependence significantly influence the nature of this relationship (Luo et al., 2022). High-income countries often exhibit a negative correlation between resource rents and economic growth due to environmental considerations, while middle- and low-income countries tend to show a positive relationship (Munemo, 2021). Furthermore, institutional factors such as governance, law and order, and corruption control play a pivotal role in mediating the effects of resource rents on economic growth (Epo & Faha, 2019).

Natural resource rents themselves are shaped by a multitude of economic, institutional, and environmental factors. Financial development, for example, can either exacerbate or mitigate the effects of resource rents, depending on the level of financial infrastructure and income in resource-rich economies (Hadj & Ghodbane, 2021). Trade openness, FDI inflows, and per capita income are positively associated with resource rents, while policies like carbon taxes or monetary controls can reduce them in the short term (Khan et al., 2019). Moreover, factors like green technology innovation and decentralization have been found to influence the relationship between natural resource rents and broader social and economic outcomes, including conflict mitigation and environmental sustainability (Farzanegan et al., 2013; Luqman, 2024). This intricate web of interactions emphasizes the need for effective resource management policies and institutional reforms to optimize the benefits of natural resource rents while minimizing their adverse effects.

This research is motivated by gaps in understanding the interplay between natural resource rents and GDP within the context of Thailand. While existing studies have explored the relationships between GDP and natural resource rents in various countries, the specific dynamics in resource-dependent economies like Thailand remain underexplored. There is a lack of comprehensive analysis that accounts for the simultaneous interdependencies between GDP, natural resource rents, and other economic indicators such as unemployment, gross capital formation, and tax revenue. Additionally, previous research has often focused on isolated effects rather than integrated models that capture these relationships' broader economic and policy implications. The unresolved question of how resource rents contribute to or hinder sustainable economic growth in Thailand, particularly in light of its unique economic structure and reliance on natural resources, forms the basis of this study's investigation.

This study addresses the identified research gaps by employing a Two-Stage Least Squares (TSLS) methodology, which effectively accounts for simultaneity and endogeneity in the relationships among economic indicators. By integrating variables namely GDP growth, natural resource rents, gross capital formation, tax revenue, and unemployment, the research provides a holistic understanding of these interconnected dynamics in Thailand from 1972 to 2020. The use of TSLS enables robust estimation of the causal effects between the variables, offering insights into their direct and indirect impacts on economic performance. This approach not only fills a critical methodological gap in the literature but also contributes to policy discussions by identifying actionable levers for fostering sustainable economic growth. The following sections of this paper are structured as follows. Section 2 explores the concepts related to this research. Section 3 outlines the research methodology. thereafter, the results of the analysis and discussions will be presented.

LITERATURE REVIEW

This section explores theoretical frameworks and empirical studies that examine the dynamics of GDP, natural resource rents, and economic indicators.

Natural Resource Curse Hypothesis: This hypothesis, also known as the "paradox of plenty," posits that countries with abundant natural resources tend to experience slower economic growth, less democracy, and lower levels of economic development compared to countries with fewer natural resources (Langarudi & Radzicki, 2021). This counterintuitive phenomenon has been widely discussed in empirical literature,

challenging the conventional wisdom that natural resource abundance should be a blessing for economic development. However, the validity of this hypothesis remains contested, with studies producing conflicting results. Some research supports the curse hypothesis, while others reject or partially accept it (Yilanci et al., 2022). For instance, a study on ASEAN countries validated the financial resource curse hypothesis, showing that natural resource rents negatively impact financial development (Tang et al., 2022). Conversely, another global study found that natural resources promote economic growth, invalidating the resource curse hypothesis. However, the same study noted that geopolitical risks could induce the curse (Syed et al., 2023). The Natural Resource Curse Hypothesis appears to depend on various factors, including institutional quality, fiscal decentralization, and geopolitical risks (Ahmad et al., 2023; Perez-Sebastian & Raveh, 2012; Perez-Sebastian & Raveh, 2015). The hypothesis underscores the importance of effective resource management, strong institutions, and diversified economies in harnessing the potential benefits of natural resource abundance while mitigating potential negative consequences.

Economic growth theory: It is a field of study that examines the factors and mechanisms driving long-term increases in a country's productive capacity and output. It encompasses various approaches and models that attempt to explain the process of economic development and the differences in growth rates across nations. The neoclassical growth theory, e.g., which has been the dominant perspective, focuses on factors such as capital accumulation, labor force growth, and technological progress (Fix, 2014). However, this theory has been challenged by alternative approaches that emphasize the role of energy consumption, economic distribution, institutional structures, and labor force composition in the growth process (Fix, 2014). Unified growth theory, proposed by Oded Galor, offers a fresh theoretical and methodological approach by incorporating the context of economic history and emphasizing an interdisciplinary perspective (Boehlke, 2019). This theory attempts to explain the transition from stagnation to sustained economic growth, considering factors such as technological progress, demographic transition, and human capital accumulation. Recent developments in growth theory highlight the importance of innovation, research intensity, and educational attainment as key drivers of economic growth (Fernald & Jones, 2014). Some studies suggest that these factors account for more than three-quarters of growth since 1950. Additionally, the role of emerging economies like China and India in sustaining global research efforts may contribute to continued rapid growth in the coming decades (Fernald & Jones, 2014). Economic growth theory is a diverse and evolving field that seeks to understand the complex dynamics of long-term economic development. While traditional models focus on capital and labor inputs, newer approaches incorporate factors such as innovation, institutions, energy consumption, and human capital. The ongoing research in this area continues to refine our understanding of the growth process and its implications for future economic prospects.

In the empirical study, it has demonstrated that Gross Domestic Product (GDP) is influenced by a variety of factors that vary across countries and contexts, highlighting the complexity of economic growth. In Kosovo, researchers identified remittances, net exports, FDI, and external debt as key contributors to GDP growth, with remittances emerging as the most significant factor in the post-COVID-19 recovery (Govori & Fejzullahu, 2020). Additionally, stock market dynamics were shown to influence GDP in certain contexts, underscoring the interconnectedness of financial and economic systems (Fedorova et al., 2020). Further research expanded the scope by examining the influence of geographical and environmental factors on GDP. For instance, in rural poverty-stricken areas, variables such as distance to main roads, the normalized differential vegetation index (NDVI), land use, average annual temperature, and elevation were found to satisfactorily account for GDP density changes (Wang & Peng, 2020). These findings were complemented by studies that utilized multidimensional data, including electricity consumption, climate, and human activities, to forecast GDP, thus integrating non-traditional factors into economic analysis (Wu et al., 2021). In Bangladesh, trade variables such as imports and exports showed a positive association with GDP, while inflation exhibited a negative impact (Hasan et al., 2022). studies emphasized economic factors such as trade openness, foreign direct investment (FDI), and labor force participation as significant determinants of GDP growth (Gonzalez et al., 2022). However, the role of inflation has been debated, as it was found to have an insignificant impact on GDP in the Philippines (Gonzalez et al., 2022). More recent studies have added nuance to the understanding of these relationships by exploring government expenditure, household consumption, and exports as significant contributors to GDP growth. For example, research in the Philippines demonstrated the importance of general government consumption expenditure, household and nonprofit institutions serving households (NPISHs) final consumption expenditure, and exports, while the relationship between FDI and GDP was not statistically significant (Lumabao & Rosales, 2023). Contradictions in the findings regarding FDI's impact, as seen in the

studies by Gonzalez et al. (2022) and Lumabao and Rosales (2023), further highlight the variability of economic factors across different contexts.

Natural resource rents are influenced by a complex interplay of factors, as evidenced by extensive research over time. Trade openness and foreign direct investment (FDI) inflows have been shown to enhance resource rents, especially in sectors such as forestry, minerals, and oil (Khan et al., 2019). studies focused on economic factors, highlighting the significant role of economic growth, trade openness, and per capita income in shaping resource rents, particularly in resource-rich countries (Aljarallah, 2021). Institutions characterized by effective law enforcement and corruption control positively mediate the relationship between resource rents and financial development (Hadj & Ghodbane, 2021). These institutional factors are particularly relevant in countries with weak governance systems, where resource rents can exacerbate inequalities and conflicts. However, the relationship between resource rents and economic growth is often bidirectional and asymmetric. For example, natural resource rents, including forest and mineral rents, can influence economic growth, while economic growth simultaneously impacts resource rents (Fu & Liu, 2022). Furthermore, advancements in technology and financial development have been shown to foster sustainable management of natural resources by enhancing efficiency and reducing environmental harm (Okolo et al., 2023). Recent analyses have also explored the geopolitical dimensions of natural resource rents. Geopolitical risks (GPR) have been shown to both influence and be influenced by resource rents. In Russia, for example, GDP growth and forest rents have been found to increase geopolitical risks, while oil, coal, and mineral rents tend to reduce them (Pan et al., 2023). This bidirectional relationship underscores the intricate connections between natural resources and global political stability. In recent years, research has expanded to examine the environmental and technological aspects of natural resource rents. Green technology innovation, for instance, has been found to play a significant role in reducing emissions, influencing resource extraction and utilization (Luqman, 2024).

METHODOLOGY

Two-Stage Least Squares (2SLS) is a widely used instrumental variables estimator in econometrics and other fields to address endogeneity issues in linear models. It is commonly employed to estimate parameters in systems of linear simultaneous equations and to solve problems of omitted-variables bias in single-equation estimation (Angrist & Imbens, 1995). The 2SLS method involves two stages: first, regressing the endogenous variable on the instruments, and second, using the predicted values from the first stage as regressors in the main equation. While 2SLS is a popular method, it has some limitations. The estimator can suffer from bias, especially when the instruments are weakly correlated with the endogenous variables or when many instruments are used (Poi, 2006). The choice of estimator may depend on factors such as instrument strength, sample size, and model complexity. In this study, TSLS is applied on the following simultaneous equation:

$$GDP = a_1 + a_2 NNR + a_3 UNM + a_4 TAX$$

$$NNR = a_5 + a_6 GCF + a_7 UNM + a_8 TAX$$

where NRR is Total natural resources rents (% of GDP). GDP denote GDP per capita (current US\$). UNM is Unemployment, total (% of total labor force). GCF represents Gross capital formation (% of GDP). TAX stands for Tax revenue (% of GDP). This research utilizes Thailand yearly data between 1972 and 2020 download from World Bank database and analyze by Two-Stage Least Squares method.

RESULT

This section presents the key findings from the correlation analysis and regression models by OLS and 2SLS methods. Table 1 shows descriptive statistics.

Table 1 Descriptive statistics

Variable	Mean	Std. dev.	Min	Max
GCF	28.3156	6.3477	20.0715	42.8627
TAX	14.3414	1.7603	10.1734	17.4135
GDP	2,713.9680	2,232.6500	209.3748	7,814.3840
NRR	1.7468	0.7880	0.5462	3.7169
UNM	1.5598	1.1807	0.2500	5.7700

The descriptive statistics in Table 1 provide an overview of the key economic indicators analyzed in the study. The mean value of Gross Capital Formation (GCF) is 28.32% of GDP, with a standard deviation of 6.35%, ranging from 20.07% to 42.86%. Tax Revenue (TAX) averages 14.34% of GDP, showing less variability with a standard deviation of 1.76% and values spanning from 10.17% to 17.41%. Gross Domestic Product (GDP) per capita has a mean of \$2,713.97 with a large standard deviation of \$2,232.65, reflecting the wide range from \$209.37 to \$7,814.38. Natural Resource Rents (NRR) constitute 1.75% of GDP on average, with moderate variability (SD = 0.79%) and a range between 0.55% and 3.72%. Lastly, Unemployment (UNM) averages 1.56% of the labor force, with a standard deviation of 1.18% and values from 0.25% to 5.77%.

Table 2 Correlation analysis

Variable	GCF	TAX	GDP	NRR	UNM
GCF	1.0000				
TAX	0.4989 (0.0003)	1.0000			
GDP	-0.2290 (0.1136)	0.5537 (0.0000)	1.0000		
NRR	-0.4546 (0.0010)	-0.0283 (0.8471)	0.3689 (0.0091)	1.0000	
UNM	0.0418 (0.7754)	-0.0372 (0.7998)	-0.3893 (0.0057)	-0.4248 (0.0023)	1.0000

The correlation analysis in Table 2 reveals significant relationships among the variables under study. GCF shows a moderate positive correlation with TAX (0.499, $p < 0.01$) but no significant relationship with other variables. TAX exhibits a strong positive correlation with GDP (0.554, $p < 0.01$), indicating a potential link between taxation and economic output. NRR negatively correlates with GCF (-0.455, $p < 0.01$) and UNM (-0.425, $p < 0.01$) while showing a positive association with GDP (0.369, $p < 0.01$). UNM, on the other hand, demonstrates a negative correlation with GDP (-0.389, $p < 0.01$) and NRR, suggesting that higher resource rents are associated with lower unemployment. Figure 1 shows time series data of variables.

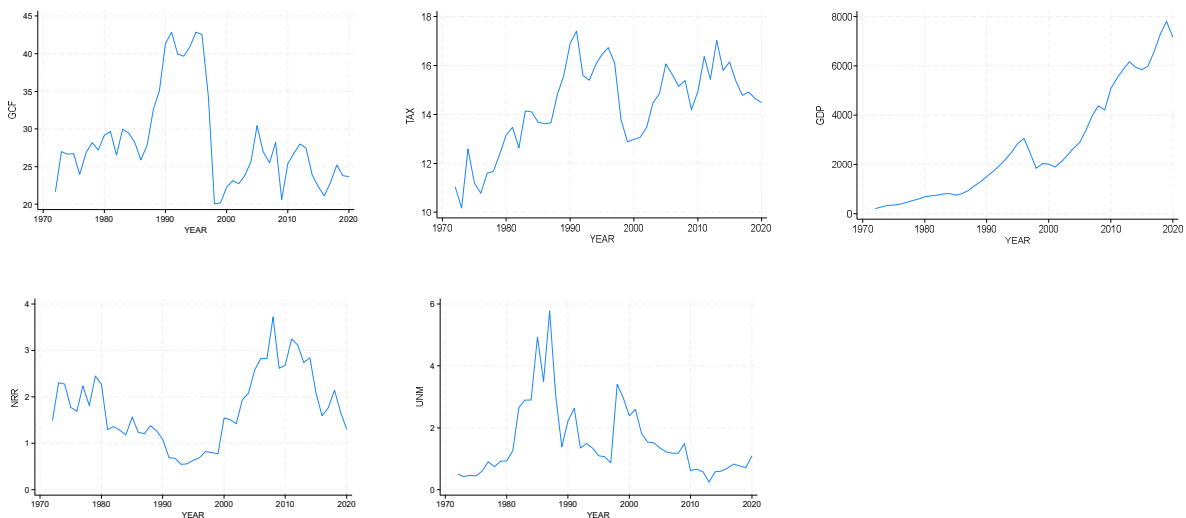
**Figure 1** Time series data of variables

Table 3 Full regression model estimation

Variable	Coefficient	Std. Err.	t	P> t	95% Conf. Interval (Lower)	95% Conf. Interval (Upper)
NRR	- 196.1767	274.4096	- 0.7100	0.4780	- 749.2129	356.8595
GCF	- 240.7330	35.6271	- 6.7600	0.0000	- 312.5347	- 168.9313
TAX	1,116.0050	112.6033	9.9100	0.0000	889.0681	1,342.9420
UNM	- 675.8216	158.1307	- 4.2700	0.0000	- 994.5130	- 357.1301
_cons	-5,077.7380	1,560.9630	- 3.2500	0.0020	-8,223.6530	-1,931.8240
F(4, 44)	34.3700		Adj R ²	0.7355		
Prob > F	0.0000		RMSE	1,148.2000		
R ²	0.7575					

The full regression model estimation in Table 3 provides insights into the determinants of the economic variables analyzed. NRR demonstrates an insignificant negative coefficient (-196.18, $p = 0.478$), indicating a weak relationship with the dependent variable. In contrast, GCF shows a significant negative effect (-240.73, $p < 0.001$), suggesting its inverse association with the dependent variable. TAX exhibits a strong positive effect (1,116.01, $p < 0.001$), highlighting its substantial influence. Similarly, UNM negatively affects the dependent variable (-675.82, $p < 0.001$). The model achieves an adjusted R² of 0.736, indicating that approximately 73.6% of the variance is explained by the predictors, with an F-statistic of 34.37 ($p < 0.001$), confirming the overall model significance.

Table 4 NRR regression model estimation

Variable	Coefficient	Std. Err.	t	P> t	95% Conf. Interval (Lower)	95% Conf. Interval (Upper)
TAX	0.1047	0.0591	1.7700	0.0830	- 0.0144	0.2238
UNM	- 0.2622	0.0765	- 3.4300	0.0010	- 0.4163	- 0.1082
GCF	- 0.0689	0.0164	- 4.2000	0.0000	- 0.1019	- 0.0358
_cons	2.6045	0.7539	3.4500	0.0010	1.0861	4.1229
F(3, 45)	10.5400		Adj R ²	0.3734		
Prob > F	0.0000		RMSE	0.6238		
R ²	0.4126					

Table 5 Simultaneous model estimation by 2SLS

Variable	Coefficient	Std. Err.	t	P> t	95% Conf. Interval (Lower)	95% Conf. Interval (Upper)
NRRE	0.2388	0.0995	2.4000	0.0210	0.0383	0.4393
TAX	521.3525	149.4395	3.4900	0.0010	220.3659	822.3390
UNM	- 531.5081	210.0984	- 2.5300	0.0150	- 954.6679	-108.3483
_cons	-4,581.9340	2,046.7960	- 2.2400	0.0300	-8,704.3920	-459.4761
F(3, 45)	15.3600		Adj R ²	0.4730		
Prob > F	0.0000		RMSE	1,620.8000		
R ²	0.5060					

Table 4 presents the regression model for NRR, showing significant effects from TAX, UNM, and GCF. While TAX has a positive but marginally significant coefficient (0.105, $p = 0.083$), both UNM (-0.262, $p < 0.01$) and GCF (-0.069, $p < 0.001$) negatively influence NRR. This indicates that higher unemployment and gross capital formation are associated with reduced natural resource rents. The model's adjusted R^2 is 0.373, indicating modest explanatory power.

Table 5 provides a simultaneous estimation using the TSLS method, incorporating the interrelationships among variables. Here, NRRE, the estimated NRR, (0.239, $p < 0.05$), TAX (521.35, $p < 0.01$), and UNM (-531.51, $p < 0.05$) significantly influence the dependent variable. This simultaneous model improves the adjusted R^2 to 0.473, capturing broader interactions between the indicators.

While Table 3 uses a standard regression approach, Table 5 employs TSLS to account for endogeneity and simultaneity among variables. The TSLS model in Table 5 adjusts coefficients and significance levels, providing more robust estimates for NRR (positive and significant in TSLS) and highlighting interdependencies overlooked in the full regression model. These underline the advantage of TSLS in analyzing interconnected economic systems.

DISCUSSION

The descriptive statistics and correlation analyses highlight key relationships among the variables under study. For instance, tax revenue (TAX) shows a strong positive correlation with GDP, which suggests that effective fiscal policies are pivotal in driving economic growth. This finding aligns with economic growth theory, which emphasizes the role of government expenditure and fiscal measures in promoting development (Fernald & Jones, 2014). Similarly, the negative correlation between unemployment (UNM) and GDP reflects the traditional economic view that lower unemployment rates are associated with higher productivity and output, as posited in classical growth models (Fix, 2014).

The regression models further elaborate on these relationships. In the full regression model, TAX exhibits a significant positive effect on GDP, reinforcing its critical role as a driver of economic performance. This result resonates with findings from studies that identify taxation and government revenue as fundamental to fostering sustainable economic growth (Lumabao & Rosales, 2023). Conversely, gross capital formation (GCF) and unemployment (UNM) demonstrate significant negative effects on GDP, suggesting that inefficiencies in investment allocation and labor market dynamics may hinder economic progress. These results partially align with the previous study, which emphasizes the importance of efficient capital utilization and labor force participation in economic growth (Gonzalez et al., 2022). However, the insignificant effect of natural resource rents (NRR) on GDP in the full model contrasts with the resource curse hypothesis, which posits that resource rents often have negative or mixed impacts on economic growth due to governance challenges and rent-seeking behavior (Langarudi & Radzicki, 2021).

The results from the Two-Stage Least Squares (TSLS) model provide a deeper understanding of these dynamics by accounting for simultaneity and endogeneity among the variables. In this model, natural resource rents, represented by NRRE, exhibit a significant positive effect on GDP, indicating that resource rents can contribute to economic growth under certain conditions. This finding challenges the natural resource curse hypothesis in the context of Thailand, suggesting that the country may have mitigated some of the adverse effects traditionally associated with resource dependence. Previous studies support this possibility, as studies highlight the role of strong institutions and effective governance in transforming natural resource wealth into economic prosperity (Epo & Faha, 2019; Hadj & Ghodbane, 2021). Moreover, the positive effect of TAX on GDP in the TSLS model reinforces the importance of fiscal policies, aligning with economic growth theory's emphasis on government expenditure as a growth driver (Fernald & Jones, 2014).

The negative effects of GCF and UNM on natural resource rents, as demonstrated in the NRR regression model, underscore the complexity of resource management. Higher unemployment and inefficient capital formation appear to reduce resource rents, which may indicate underlying structural challenges in Thailand's economy. These findings are consistent with the previous study that highlights the bidirectional and often asymmetric relationship between resource rents and economic variables, where institutional quality and governance play critical roles in shaping outcomes (Fu & Liu, 2022).

The study's results provide a balanced perspective on the interplay between GDP, resource rents, and other economic indicators in Thailand. While the findings partially support the natural resource curse hypothesis by

highlighting the conditional nature of resource rents' impact, they also underscore the importance of effective governance and fiscal policies in leveraging natural resources for economic growth. These insights contribute to the broader discourse on economic growth theory and resource management, emphasizing the need for context-specific strategies that align with a country's institutional and economic realities.

POLICY IMPLEMENTATION

The significant positive impact of tax revenue on GDP underscores the importance of strengthening fiscal policies and enhancing tax collection mechanisms. This could involve broadening the tax base and improving compliance to generate sustainable revenue streams for economic development. In addition, the negative effects of unemployment and inefficient capital formation on GDP and resource rents suggest the need for labor market reforms and more strategic allocation of investments. Policies should focus on skill development, job creation, and fostering industries that efficiently utilize capital and labor resources. Furthermore, the positive relationship between natural resource rents and GDP in the TSLS model indicates the importance of governance and institutional reforms to maximize resource benefits. Prioritizing transparency, reducing corruption, and investing in green technologies will ensure sustainable resource management and long-term economic growth.

FUTURE RESEARCH

Future research should explore sector-specific dynamics of natural resource rents and their impacts on economic growth to better understand the variations across industries. Additionally, examining the role of environmental policies and green technologies in resource management could provide insights into sustainable practices. Comparative studies across resource-dependent economies with varying institutional frameworks could identify best practices for governance and fiscal strategies. Lastly, employing advanced econometric techniques and high-frequency data could refine causal inferences and enhance the robustness of findings.

CONCLUSION

This study investigates the interrelationships between GDP, natural resource rents, and other economic indicators, namely unemployment, gross capital formation, and tax revenue, within the context of Thailand. Motivated by gaps in previous research, which often focused on isolated effects, this study employs a comprehensive approach to analyze these interconnected dynamics from 1972 to 2020. The Two-Stage Least Squares (TSLS) methodology was utilized to address endogeneity and simultaneity, ensuring robust estimation of causal relationships. Data for the study were sourced from the World Bank database. The findings reveal several critical insights. First, tax revenue significantly and positively impacts GDP, emphasizing the vital role of fiscal policies in driving economic growth. Second, unemployment and gross capital formation negatively affect GDP and resource rents, highlighting inefficiencies in labor markets and investment strategies. While natural resource rents exhibited an insignificant effect on GDP in the full regression model, the TSLS results indicated a positive and significant impact, suggesting that resource rents can contribute to economic growth under specific institutional and governance conditions. These results partially challenge the resource curse hypothesis, underscoring the importance of contextual factors such as institutional quality and policy frameworks. Policy implications arising from the analysis are multifaceted. Strengthening fiscal policies through enhanced tax collection mechanisms and compliance can provide sustainable resources for economic development. Labor market reforms, including skill development and job creation initiatives, are essential to reducing unemployment and optimizing labor force participation. Additionally, strategic investment allocation should prioritize sectors that efficiently utilize capital and labor to support sustainable resource management and long-term growth.

ACKNOWLEDGEMENT

This research is supported by the School of Economics, Sukhothai Thammathirat Open University, Thailand. This research is also supported by the computer engineering department, Srinakharinwirot University, Nakhon

Nayok, Thailand. This research also supports by Central Food Retail Company Limited, Replenishment and Demand Forecasting Department, Thailand.

REFERENCES

- Ayub, S., & Shah, F. (2015). Impact of monetary policy on Gross Domestic Product (GDP). *Asian Journal of Business and Management*, 3(6). <https://doi.org/10.24203/ajbm.v3i6.3334>
- Boehlke, J. (2019). Some remarks on methodological foundations of unified growth theory (pp. 3–16). *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30251-1_1
- Çemberci, M., Civelek, M. E., & Cömert, P. N. (2022). The role of foreign direct investment in the relationship between global innovation index and Gross Domestic Product. *Gurukul Business Review*, 18(1). <https://doi.org/10.48205/gbr.v18.8>
- Chamberlin, G. (2011). Gross domestic product, real income and economic welfare. *Economic & Labour Market Review*, 5(5), 5–25. <https://doi.org/10.1057/elmr.2011.51>
- Cheng, E., & Cao, L. (2014). Establishing the “Gross Domestic Product of Welfare”: A major revision of GDP for a better accounting system. *World Review of Political Economy*, 5(4). <https://doi.org/10.13169/worlrevipoliecon.5.4.0439>
- Debonheur, K. D., Ouedraogo, I., & Avom, D. (2023). The effect of natural resources rents on human development in selected African countries. *Natural Resources Forum*, 48(3), 803–837. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12341>
- Epo, B. N., & Nochi Faha, D. R. (2019). Natural resources, institutional quality, and economic growth: An African tale. *The European Journal of Development Research*, 32(1), 99–128. <https://doi.org/10.1057/s41287-019-00222-6>
- Farzanegan, M. R., Lessmann, C., & Markwardt, G. (2018). Natural resource rents and internal conflicts: Can decentralization lift the curse? *Economic Systems*, 42(2), 186–205. <https://doi.org/10.1016/j.ecosys.2017.05.009>
- Farzanegan, M. R., Markwardt, G., & Lessmann, C. (2013). Natural-resource rents and internal conflicts: Can decentralization lift the curse? *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2244830>
- Fedorova, E. A., Musienko, S. O., & Afanas'Ev, D. O. (2020). Impact of the Russian stock market on economic growth. *Finance: Theory and Practice*, 24(3), 161–173. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2020-24-3-161-173>
- Fernald, J. G., & Jones, C. I. (2014). The future of US economic growth. *American Economic Review*, 104(5), 44–49. <https://doi.org/10.1257/aer.104.5.44>
- Fix, B. (2014). Rethinking economic growth theory from a biophysical perspective. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2798205>
- Fu, R., & Liu, J. (2022). Revenue sources of natural resources rents and its impact on sustainable development: Evidence from global data. *Resources Policy*, 80, 103226. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103226>
- Gonzalez, L. M., Llanto, C., & Manapat, C. (2022). The relationship between Philippine population, remittances, foreign direct investment, and trade openness on its Gross Domestic Product. *Journal of Economics, Finance and Accounting Studies*, 4(4), 168–201. <https://doi.org/10.32996/jefas.2022.4.4.19>
- Govori, F., & Fejzullahu, A. (2020). External financial flows and GDP growth in Kosovo. *Journal of Developing Societies*, 36(1), 56–76. <https://doi.org/10.1177/0169796x19898964>
- Grujić Vučkovski, B., Paraušić, V., & Kljajić, N. (2023). Impact of realized investments in new fixed assets on Gross Domestic Product in Serbia. *Ekonomika Poljoprivrede*, 70(3), 737–753. <https://doi.org/10.59267/ekopolj2303737g>
- Hadj, T. B., & Ghodbane, A. (2021). Do natural resources rents and institutional development matter for financial development under quantile regression approach? *Resources Policy*, 73, 102169. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102169>

- Harmina, A. (2016). The role of entrepreneurship in explaining the real Gross Domestic Product per capita: Regression model selection. *Croatian Review of Economic, Business and Social Statistics*, 2(1), 24–38. <https://doi.org/10.1515/crebss-2016-0007>
- Hasan, M. M., Hossain, B. M. S., & Sayem, M. A. (2022). Determining the impact of economic factors to the Gross Domestic Product in Bangladesh. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 12(1), 37–40. <https://doi.org/10.32479/ijefi.12686>
- Langarudi, S. P., & Radzicki, M. J. (2021). Blessing or burden? Another look at the natural resource curse (pp. 311–346). *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67190-7_12
- Luqman, M. (2024). Transition towards natural resource rents and green technology to achieve China's COP26 success: A novel insights in the case of trade openness and environmental pollution. *Resources Policy*, 92, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105021>
- Lumabao, M. K., & Rosales, J. F. (2023). Determinants of GDP growth in the Philippines: 1970–2020. *Journal of Economics, Finance and Accounting Studies*, 5(1), 73–97. <https://doi.org/10.32996/jefas.2023.5.1.6>
- Mignamissi, D., & Malah Kuete, Y. F. (2021). Resource rents and happiness on a global perspective: The resource curse revisited. *Resources Policy*, 71, 101994. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.101994>
- Mladenović, I., Milovančević, M., Sokolov Mladenović, S., Marjanović, V., & Petković, B. (2016). Analyzing and management of health care expenditure and gross domestic product (GDP) growth rate by adaptive neuro-fuzzy technique. *Computers in Human Behavior*, 64, 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.07.052>
- Munemo, J. (2021). Do African resource rents promote rent-seeking at the expense of entrepreneurship? *Small Business Economics*, 58(3), 1647–1660. <https://doi.org/10.1007/s11187-021-00461-0>
- Okolo, C. V., Wen, J., & Susaeta, A. (2023). Maximizing natural resource rent economics: The role of human capital development, financial sector development, and open-trade economies in driving technological innovation. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(3), 4453–4477. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31373-z>
- Pan, L., Wang, Y., Sun, X., Sadiq, M., & Dagestani, A. A. (2023). Natural resources: A determining factor of geopolitical risk in Russia? Revisiting conflict-based perspective. *Resources Policy*, 85, 104033. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104033>
- Rashid Khan, H. U., Zaman, K., Usman, B., Nassani, A. A., Aldakhil, A. M., & Qazi Abro, M. M. (2019). Financial management of natural resource market: Long-run and inter-temporal (forecast) relationship. *Resources Policy*, 63, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101452>
- Spahiu, M. J., & Spahiu, B. J. (2022). The factors influencing Gross Domestic Product growth in the post-pandemic period: The case of Kosovo. *Journal of Liberty and International Affairs Institute for Research and European Studies - Bitola*, 8(2), 136–149. <https://doi.org/10.47305/jlia2282136s>
- Syed, Q. R., Durani, F., Kisswani, K. M., Alola, A. A., Siddiqui, A., & Anwar, A. (2023). Testing natural resource curse hypothesis amidst geopolitical risk: Global evidence using novel Fourier augmented ARDL approach. *Resources Policy*, 88, 104317. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104317>
- Tang, C., Irfan, M., Razaq, A., & Dagar, V. (2022). Natural resources and financial development: Role of business regulations in testing the resource-curse hypothesis in ASEAN countries. *Resources Policy*, 76, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102612>
- Wang, G., & Peng, W. (2020). Detecting influences of factors on GDP density differentiation of rural poverty changes. *Structural Change and Economic Dynamics*, 56, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2020.10.004>
- Wang, H., Hao, L., Wang, W., & Chen, X. (2023). Natural resources lineage, high technology exports and economic performance: RCEP economies perspective of human capital and energy resources efficiency. *Resources Policy*, 87, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104297>
- Wu, X., Zhang, Z., Huang, Q., & Chang, H. (2021). A data-driven Gross Domestic Product forecasting model based on multi-indicator assessment. *IEEE Access*, 9, 99495–99503. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3062671>

- Wyżnikiewicz, B. (2017). Gross domestic product as the subject of criticism. *Wiadomości Statystyczne. The Polish Statistician*, 62(3), 5–15. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0869>
- Yilanci, V., Turkmen, N. C., & Shah, M. I. (2022). An empirical investigation of resource curse hypothesis for cobalt. *Resources Policy*, 78, 102843. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102843>
- Zhang, L., & Fargher, N. (2021). Aggregate accounting earnings, special items and growth in gross domestic product: Evidence from Australia. *Accounting & Finance*, 62(2), 2467–2496. <https://doi.org/10.1111/acfi.12871>

ENERGY MANAGEMENT IN BUILDING MANAGEMENT SYSTEM BY INCORPORATING AI DRIVEN SMART GRIDS

Megha Shruti

Computer Science Engineer (Specialised in Cyber Security and Digital Forensics)

School of Computing Science and Engineering, VIT Bhopal University

Bhopal-Indore Highway, Kothrikalan Sehore, 466114, Madhya Pradesh, India

Abstract

Managing energy is a crucial part of modern infrastructure, particularly as energy consumption, sustainability, and environmental impacts grow. Efficient energy use is essential for reducing operational costs, enhancing sustainability, and promoting environmental stewardship. As cities become smarter, energy distribution, consumption, and waste management systems are automated. Among these technologies, Building Management Systems (BMS) are key to controlling a building's energy use, including heating, ventilation, air conditioning (HVAC), lighting, and energy storage systems. It aims to monitor and regulate energy consumption, offering insights that improve building operations. However, energy inefficiencies in BMS are common due to outdated systems and poor integration between different building functions. HVAC systems, for example, are often running continuously, even in unoccupied spaces, while lighting systems may remain on unnecessarily. Moreover, the impossibility of accurately predicting energy demand often leads to increased operation costs during peak hours. Inefficient maintenance schedules created by reactive measures instead of real-time data also waste energy. To address these inefficiencies, incorporating an **AI-driven smart grid within BMS** can provide a transformative solution. Using advanced technologies such as automation, real-time monitoring, and artificial intelligence, smart grids significantly improve BMS energy efficiency. They enable two-way communication between the building and the energy network, going beyond traditional grids. With AI, building energy management can be optimized by analysing real-time data from occupancy sensors, weather forecasts, and equipment performance. By integrating an AI-driven smart grid, BMS inefficiencies can be mitigated, leading to enhanced energy management, reduced operational costs, and improved sustainability. Additionally, AI can improve energy consumption forecasting, which can lower operating costs and avoid unnecessary energy waste. The use of artificial intelligence in energy management systems will become essential as smart cities become more sustainable and energy-efficient. This will significantly improve energy management and enhance sustainability.

Keywords: Sustainability, Energy Management, Automation, Energy Efficiency, Artificial Intelligence.

Introduction

Energy management is a global imperative that one must keep in mind while in process of establishing smart cities in developing countries. Energy efficiency gets catalysed once technology or Artificial Intelligence is converged with sustainability principles while reshaping the Building Management Systems.

Smart grids enhance building management systems by enabling real-time energy monitoring, optimizing power consumption, integrating renewable energy sources, and automating demand response, improving efficiency, sustainability, and cost-effectiveness in energy management. AI driven management system leverage advanced algorithms, machine learning, techniques, and data analytics to glean actionable insights from vast amounts of building data, enabling proactive optimization and adaptive control strategies. Integrating AI in smart grids enhances its performance by enabling predictive maintenance, optimizing energy distribution and managing demand-response system. Furthermore, it facilitates real-time decision making integrates renewable energy effectively and enhances grid resilience through intelligent fault detection and automated responses. The advancements in AI algorithms particularly in the realms of machine learning, deep learning and predictive analytics have empowered energy management in such Building Management Systems.

The increase in the demand for sustainability has started attracting many people, operator's stakeholders etc. People have started investing in AI driven solutions as a means of managing energy more efficiently and achieving environmental goals. So ultimately by leveraging AI technologies in such Developing systems to upgrade normal cities to smart cities, we can adapt dynamic environmental energy utilization in real time while making sure the occupant's comfort and operational efficiency.

1. Materials and Methods

1.1 Components of AI driven smart grid in BMS: AI driven smart grids in BMS consist various components, all of which work together to optimize energy usage, provide real time insights and enhance the energy usage. Some of the components are as follows: -

1.1.1 Sensors and IoT Devices: The sensors and IoT devices work as backbone of the AI driven Smart Grid. It monitors key parameters such as temperature, humidity energy consumption etc. This helps in gathering real time information from the building environment. This enables the system to make informed decisions and adjust operations dynamically.

1.1.2 AI algorithms: Vast amount of data is collected by sensors which are processed by ai algorithm which is generates actionable insights. These algorithm leverage machine learning and predictive analytics to optimize energy usage, balance loads and detect inefficiencies. This helps in forecasting energy demand, identify patterns and recommend adjustments to minimize waste.

1.1.3 Advanced Control Systems: Advanced control system automates the key functions of BMS. AI helps the system to dynamically adapt to changes in occupancy, weather and user preference. All this contributes to significantly increasing the overall efficiency.

1.1.4 Energy Storage System: The excess energy that is produced during low demand periods or by renewable sources is stored in energy storage system. This stored energy can be used later during the times of peak demand. AI manages the charge-discharge cycles to maximize battery life and ensure energy availability when needed.

1.1.5 Demand Response System: Demand response systems adjust the building's energy consumption based on real-time grid conditions. During peak demand periods, AI systems can automatically reduce non-critical loads, such as dimming lights or lowering HVAC power, to prevent grid overload.

1.1.6 Communication Infrastructure: A robust communication infrastructure ensures seamless data flow between sensors, control systems, and cloud platforms. Technologies like Zigbee, LoRaWAN, and 5G enable real-time data transfer and connectivity. This infrastructure is vital for coordinating energy optimization processes across all systems in the building.

1.1.7 Data Analytics Platforms: Data analytics platforms process historical and real-time data to provide actionable insights for energy management. These platforms help facility managers understand energy consumption patterns, identify inefficiencies, and implement improvements. They also generate detailed reports that guide decision-making and long-term planning.

1.1.8 Smart Meters: Smart meters provide precise, real-time information about energy usage. They track consumption patterns and relay data to both the grid and building management systems. This transparency helps identify energy-saving opportunities and facilitates efficient billing and energy distribution.

2. Technologies and Discussion

2.1 Building Management System (BMS): A Building Management System (BMS) optimizes energy management by monitoring and controlling systems like HVAC, lighting, and energy storage using IoT sensors and AI algorithms. It integrates renewable energy, manages demand response, reduces peak loads, and enables real-time adjustments, ensuring efficiency, cost savings, and sustainability in building operations.

In smart cities, Building Management Systems (BMS) enhance energy efficiency and sustainability by integrating with city-wide infrastructure. They optimize HVAC, lighting, and energy usage in buildings, coordinate with renewable energy sources, manage demand response, and communicate with smart grids. By using IoT and AI, BMS ensures energy conservation, reduces costs, and supports smart city goals of resource

optimization, reduced carbon footprint, and improved living standards. Their integration allows seamless energy distribution, predictive maintenance, and real-time monitoring, contributing to smarter, greener urban environments.

2.2 Smart Grids: A smart grid is an advanced energy network that integrates digital technology, IoT, and AI to optimize electricity distribution, monitor real-time energy flows, and balance demand and supply. It enhances reliability, supports renewable energy integration, enables two-way communication between utilities and consumers, and promotes efficient, sustainable energy management.

Now, an AI-driven smart grid leverages artificial intelligence to enhance energy management by analysing real-time data, predicting demand, and optimizing supply. It enables autonomous decision-making, integrates renewable energy sources efficiently, and improves grid reliability. By detecting anomalies and enabling dynamic adjustments, it ensures sustainable, cost-effective, and intelligent energy distribution.

2.3 Energy Inefficiencies in BMS: -

- **Inefficient HVAC Operation:** Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems are often responsible for a large portion of a building's energy consumption. Inefficient operation arises from improper scheduling, faulty equipment, and an inability to adapt to real-time occupancy and weather conditions, leading to energy wastage.
- **Lighting inefficiencies:** Traditional lighting systems often lack automation and operate at full capacity regardless of actual occupancy or natural daylight availability. This results in unnecessary energy usage, particularly in areas that remain unoccupied for extended periods.
- **Poor Maintenance Practices:** Regular maintenance is crucial for optimal energy performance. Delayed or inadequate maintenance can lead to equipment degradation, reduced efficiency, and increased energy consumption. This includes issues like dirty filters, worn-out parts, and uncalibrated sensors.
- **Suboptimal System Integration:** A fragmented Building Management System, where different components like HVAC, lighting, and security operate independently, often leads to missed opportunities for energy optimization. Integration challenges hinder seamless data sharing and automated decision-making.
- **Lack of Real-Time Monitoring and Analytics:** Without real-time monitoring, it's difficult to identify and address inefficiencies promptly. The absence of actionable insights delays corrective measures, resulting in prolonged energy wastage.
- **Oversized or Undersized Equipment:** Equipment that is not properly sized for the building's needs operates inefficiently. Oversized systems lead to excessive energy consumption, while undersized systems struggle to meet demand, causing increased wear and reduced lifespan.

2.4 Strategic Techniques for Smart Grid Operation Improvement of energy management in Building Management Systems (BMS)

- **Real time energy monitoring:** Smart Grids allow BMS to continuously monitor energy consumption in real time. This data helps identify inefficiencies, track energy usage patterns, and ensure that resources are being used optimally. By collecting up-to-date energy consumption data, the system can make quick adjustments to optimize performance, reduce waste, and lower costs.
- **Demand Response Integration:** Smart Grids enable dynamic demand response, where BMS can adjust energy usage based on grid conditions or energy pricing signals. The BMS can reduce energy consumption during peak demand periods by automatically controlling HVAC, lighting, and other systems. This reduces energy costs, supports grid stability, and can result in incentives from utility companies for participating in demand response programs.
- **Renewable Energy Integration:** Smart Grids allow for better integration of renewable energy sources like solar and wind into a building's energy mix. BMS can dynamically switch between renewable sources and

the grid based on availability. This not only reduces dependency on conventional energy but also helps reduce the building's environmental impact by maximizing renewable energy use when available.

- **Enhance Load Management:** With Smart Grid data, BMS can perform more efficient load management by prioritizing essential systems and balancing the load across various parts of the building. This prevents overloading and optimizes the performance of energy-consuming systems. By better understanding the building's energy needs and grid conditions, BMS can minimize energy usage during high-demand times and manage consumption more effectively.
- **Predictive Maintenance:** Smart Grids offer real-time data on system performance, which can be used by the BMS to predict potential failures before they happen. Sensors monitor equipment health, such as HVAC systems and lighting, alerting the BMS when maintenance is needed. This predictive approach reduces downtime, extends equipment life, and avoids costly emergency repairs by enabling timely interventions.
- **Energy Storage Optimization:** Energy storage solutions, such as batteries, can be better optimized through Smart Grids. BMS can use stored energy during peak grid times, reducing the need to purchase expensive electricity. Smart Grids enable better control of when to store energy (e.g., during off-peak hours) and when to use it. This increases energy independence, reduces costs, and ensures the building is always powered with the most efficient energy mix.
- **Advanced Automation:** Smart Grids enable advanced automation within BMS by providing real-time data and insights that drive automated responses. The BMS can automatically adjust building systems like lighting, HVAC, and security based on changing energy conditions, occupancy, or external grid signals. This intelligent automation improves operational efficiency, reduces human intervention, and ensures optimal energy usage at all times.

2.6 Need of AI driven Smart Grid

Because of the rapid revolution of the modern power system, more distributed smart grid components—including smart metering infrastructure, communication infrastructure, distributed energy resources, and electric vehicles—are tightly integrated into power system by encompassing a huge electrical power network with the underlying communication system. Massive amounts of data are generated by those components to automate and improve the smart grid performance by supporting vast applications, such as distributed energy management [6], system state forecasting, and cyberattack security . Because the conventional computational techniques do not have the sufficient ability to process the vast amount of data introduced by smart grid systems, AI techniques have received much attention.

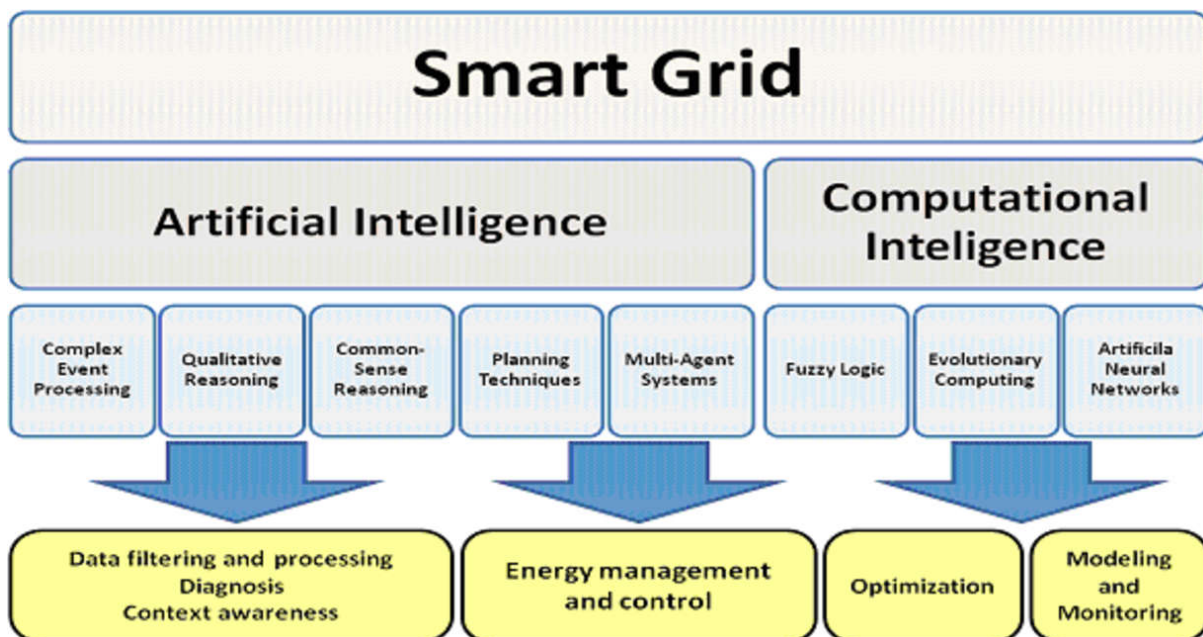


Fig. 1- Artificial Intelligence and Computational Intelligence Techniques and their Contribution to Advanced Features of the Smart Grid

2.7 Possible improvements after incorporating such AI driven smart grids in BMS

Incorporating AI-driven smart grids into Building Management Systems (BMS) has statistically improved efficiencies in several areas. Below are some points you can include to highlight these efficiencies. Let's closely have a look at the statistics: -

- **Reduced Energy Consumption:** The usage of advanced AI algorithms helps in adjusting the operations in the BMS dynamically based on many factors. Such precision minimizes energy wastage, achieving up to 30% reduction in HVAC energy consumption. Smart devices further optimize the energy usage by utilizing occupancy sensors and natural lights which results in additional in 50%-60% of energy saving.
- **Improved Energy Distribution:** Smart grids integrated with AI optimize the distribution of energy throughout a building, ensuring that supply aligns precisely with demand. By reducing energy transmission and distribution losses by 15-20%, buildings experience more consistent and efficient energy delivery. During peak hours, AI-powered demand response systems balance energy loads, leading to 10-15% reductions in grid strain.
- **Renewable Energy Utilization:** AI enables seamless integration of renewable energy sources like solar and wind into a building's energy ecosystem. By predicting energy demand and optimizing storage, AI increases the utilization of renewable energy by 20-30%. Smart grids powered by AI align renewable energy supply with real-time energy consumption patterns, reducing dependency on non-renewable sources and enhancing sustainability.
- **Energy Storage Optimization:** AI-driven smart grids optimize the performance of energy storage systems, ensuring efficient charging and discharging cycles. This optimization achieves a 90-95% energy efficiency in storage operations, reducing energy losses and improving reliability.
- **Overall Building Energy Efficiency:** The integration of AI-driven smart grids into BMS can lead to a 30-40% increase in overall energy efficiency. By optimizing every aspect of energy consumption, from HVAC to lighting to renewable integration, AI ensures that buildings consume only the energy required to maintain optimal operations.
- **Carbon Footprints Reduction:** By minimizing energy waste and maximizing the utilization of renewable energy, AI-driven BMS significantly reduce carbon emissions. This results in a 20-25% reduction in a building's carbon footprint, contributing to global sustainability goals and green building certifications.

2.8 Challenges Faced

Based on the current development of AI technology, the possible challenges that can be faced while executing the plan are as follows: -

- **High Initial Cost:** Incorporating such AI techniques in smart grids can substantially increase the cost of the entire project. As it requires significant investments for deploying smart grid infrastructure in BMS for energy management.
- **Complexity in Integration Losses in Energy Transmission:** Initially traditional grids were used. But now combining traditional grids with modern AI equipped technologies and culminating data from diverse sources can be complicated.
- **Energy Storage Limitation:** Energy Storage is a very crucial part in BMS. Inadequate energy storage solutions can hinder effective energy management, especially during peak demand or low renewable energy supply.
- **Over Optimization Risks:** Excessive reliance on AI optimization in smart grids can ignore real-world constraints like infrastructure limits and dynamic demand changes, leading to over-optimization. This may result in inefficiencies, system imbalances, or operational failures

- **Maintenance Challenges:** Proper maintenance is very important for the system to carry on smooth execution. But ensuring the proper functioning of grid infrastructure, sensors, and AI system requires regular and costly maintenance.
- **Dependency on Reliability Connectivity:** Smart grids and AI systems depend on uninterrupted communication networks for real-time data exchange, decision-making, and control, which is challenging in areas with unstable connectivity or during network outages.
- **Cyber Security Threat:** AI systems in smart grids are prone to cyber threats like ransomware, data manipulation, and adversarial attacks, potentially disrupting operations, compromising data integrity, and threatening grid stability and energy distribution.

2.9 Overcoming the Challenges

To mitigate these challenges:

- **Invest in robust data management frameworks and cybersecurity measures.**

Implementing advanced cybersecurity measures, such as encryption, multi-factor authentication, and real-time monitoring, protects sensitive information from breaches, ensuring trust and reliability in the system.

- **Use interpretable AI models to build trust among stakeholders.**

Explainable AI (XAI) techniques help stakeholders understand AI decisions, fostering confidence in its reliability. This is crucial for overcoming resistance to adoption and ensuring accountability in energy management decisions.

- **Foster collaborations between AI experts, utility companies, and policymakers.**

Partnerships enable the development of practical, scalable AI solutions tailored to the energy sector. Open dialogue ensures that AI deployment meets technical, ethical, and regulatory requirements.

- **Develop clear regulations and standards for AI deployment in smart grids.**

Establishing well-defined regulations and standards ensures the responsible and effective deployment of AI in smart grids. These guidelines should address issues such as data privacy, cybersecurity, interoperability, and ethical AI use. Standardized frameworks streamline implementation, reduce legal risks, and promote consistency across the energy sector.

- **Train the workforce to bridge skill gaps and ensure smooth adoption.**

A skilled workforce is vital for the successful implementation of AI in smart grids. Training programs should focus on AI technologies, data analytics, cybersecurity, and system integration. By upskilling employees, organizations can overcome resistance to technological change and ensure a smooth transition to AI-driven energy management systems.

By addressing these hurdles strategically, AI can play a crucial role in transforming energy management within smart grids

2.10 Costing

The cost of incorporating an AI-driven Smart Grid into a Building Management System (BMS) in Indian Rupees (INR) can be divided into several components. Sensors and IoT devices are foundational, costing ₹8 lakh–₹40 lakh, as they gather real-time data on parameters like occupancy, temperature, and energy usage. AI algorithm development requires ₹16 lakh–₹80 lakh to customize energy optimization, load balancing, and predictive maintenance capabilities. Upgrading advanced control systems for HVAC and lighting automation adds ₹12 lakh–₹40 lakh. Integrating renewable energy sources, such as solar panels or wind turbines, may cost ₹40 lakh–₹1.6 crore, while installing energy storage systems (ESS) ranges from ₹16 lakh–₹1.2 crore, depending on battery capacity. Building a robust communication infrastructure costs ₹4 lakh–₹16 lakh to enable seamless data transfer, and smart meters add another ₹4 lakh–₹12 lakh for real-time energy tracking. Data analytics platforms (₹8 lakh–₹40 lakh) process and visualize collected data for actionable insights. Predictive maintenance tools, which prevent costly breakdowns, can range from ₹8 lakh–₹32 lakh. Lastly,

labor and installation costs range from ₹24 lakh–₹80 lakh, while annual maintenance can cost ₹4 lakh–₹16 lakh. These investments enhance energy efficiency, sustainability, and operational savings, making AI-driven smart grids a long-term value addition to building management systems.

(1 USD ≈ ₹80 is used for conversion; actual rates may vary.)



Fig.2-Energy management systems: market size, 2021 to 2023 (USD billion)

2.11 Cost Optimization

Optimizing costs while implementing an AI-driven Smart Grid in a Building Management System (BMS) requires strategic planning and prioritization. Begin with a **pilot project** in a smaller area of the building, such as HVAC or lighting systems, to demonstrate ROI before scaling across the entire facility. Utilize **existing infrastructure** wherever possible by retrofitting sensors and control systems instead of replacing them entirely.

Leverage **government subsidies** and **tax incentives** for integrating renewable energy sources like solar panels or wind turbines. These programs can significantly offset installation costs and provide long-term benefits. Consider adopting **subscription-based services** for AI software and data analytics platforms instead of upfront purchases, as this spreads costs over time.

Focus on **high-impact components** first, such as energy storage systems or demand response solutions, which yield substantial savings. Collaborate with reliable vendors and seek competitive pricing by comparing multiple quotations. Opt for **modular and scalable systems** that allow phased implementation, ensuring budget flexibility.

Invest in **predictive maintenance tools** to reduce unplanned downtime and equipment failures, saving repair costs in the long run. Finally, train staff on using the new systems effectively to maximize their potential. These steps will ensure an efficient and cost-effective transition to AI-driven energy management.

2.12 Future of Artificial Intelligence in Smart Grids.

The future of AI-driven smart grid in BMS is quite transformative. That's because it enables smart decision making by adopting a smart and fast approach to counter any problem faced. The integration of AI with smart grid has a lot of potential to revolutionize energy management in BMS by enhancing efficiency, sustainability and adaptability. Some exploration of the future scope of this domain is as follows: -

- **Real time Energy Optimization:** AI driven Smart Grids can analyse vast amount of real time data from Smart Grids and BMS. By leveraging this data, AI can make precise decisions to optimize energy usage dynamically.
- **Predictive Energy Management:** AI can help in predicting the demands within the building based on historical data, weather patterns, occupancy trends and many other factors. This allows the BMS to properly schedule energy intensive activities during off peak hours. Eventually decreasing the grid power during the peak times.
- **Enhanced Integration of Renewable Energy:** As smart grids evolve, integrating renewable energy sources like wind and solar will become more streamlined and supported by advanced energy storage solutions. This integration will enhance grid stability and reliability and promote a more sustainable and carbon-neutral energy landscape.
- **Fault Detection and Predictive Maintenance:** The AI algorithms continuously monitor building equipment. This helps in detecting various anomalies or inefficiencies. By identifying numerous patterns, AI enable faster detection and predictive maintenance reducing downtime, repair costs and energy waste.
- **Energy Trading and Blockchain Integration:** The blockchain offers a secure and decentralized framework for energy transactions, promoting transparency and trust in energy exchanges. It can facilitate peer-to-peer energy trading, allowing consumers to buy and sell energy directly.
- **Scalability and Future ready system:** AI-enabled Smart Grids ensure that BMS are scalable and adaptable to future advancements in energy management. Whether integrating new technologies like electric vehicle (EV) charging stations or upgrading to more advanced energy systems, AI ensures seamless operation while maintaining efficiency.

3. Conclusion and Recommendations

As the traditional electric grid system transitions to a smart grid system, the conventional power system methods present limitations in processing and analysing the massive amounts of data that is now a norm with a smart grid. Integrating various AI techniques with BEMS in different HVAC control, such as heating/air conditioning, energy optimization and indoor thermal comfort, has led to significant improvements in energy efficiency, with some studies reporting energy savings of up to 36.5% compared to traditional control methods. Thus, AI techniques are being developed and applied to many applications in smart grid systems with promising results.

Despite the promising potential of AI in transforming energy systems, several challenges must be addressed to realize its full benefits. Technical barriers, such as data privacy and cybersecurity, remain significant concerns as AI systems process large volumes of sensitive information. Robust cybersecurity measures and data protection frameworks are essential to maintain system integrity and public trust. Economic considerations also play a critical role in AI adoption. While AI technologies can lead to long-term cost savings through improved efficiency, the initial investment required for infrastructure, training, and deployment can be substantial.

With proper and supervised execution of the AI algorithms and techniques driving the smart grid can be highly beneficial for energy management in the upcoming BMS in the developing smart cities.

4. Reference

1. **Smart Grid: Navigating the Future of Energy**(<https://www.wevolver.com/article/smart-grid-navigating-the-future-of-energy>)
2. Impact of Artificial Intelligence on the Planning and Operation of Distributed Energy Systems in Smart Grids (file:///C:/Users/mrgha/Downloads/energies-17-04501.pdf)
3. Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid: A Survey (file:///C:/Users/mrgha/Downloads/smartcities-04-00029%20(2).pdf)

4. Application and prospect of artificial intelligence in smart grid
(<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/510/2/022012/pdf>)
5. Artificial Intelligence and Computational Intelligence Techniques and their Contribution to the Advanced Features of the Smart Grid. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31097008/FULL_2011_42-libre.pdf?1365338153=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DA_State_of_the_Art_on_Energy_Efficiency.pdf&Expires=1733255728&Signature=UnpSOoOsBIU4Uys9QdHNZcipJSdPv2f8-hvM9vFpG0eJKd-UBu-OsvlWonCPSdD~M1syvrry4q87fzUUxzzynl0T0Rea-gPN49BHpLPWGIInEPBedkk2pGV6lExEJH7CWY1e52-ORMitZioayNwHNT-E0jkk~OWeTxmX6kPazLeHP1S2E4Uy-1a3mG9--AfiuZoofOTYmqcncZINILIppEbNUhfs6-SZEt1xzegM1GLREOYahuk-9J-yIdKlwI4JfuvTVbkE4zKyA2tuGyqRzTVAbGHrnQ-sV92lAwKR2S95soMSirRS9f7aKdfTJjgLKwrlzhp1LPUIVK6dn9sQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA#page=42
6. AI driven energy management system for smart buildings (AI-Driven Energy Management Systems for Smart Buildings[1].pdf)
7. AI application in Buildings: A Review of Energy Management advancements (AI-APPLICATIONS-IN-BUILDINGS-A-REVIEW-OF-ENERGY[1].pdf)

WHY AND HOW MUCH ENERGY DO WE NEED?**Muralidhar MANAPURAM¹**¹NERIST, Retired Professor, Department of Mechanical Engineering, Itanagar, India.¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0000-0000>**Abstract**

India is the largest populated country viz. 1.45 billion in the world. The energy needs are increasing with the increase in population. As per the energy norm of 1 kW per capita it requires 12,702 billion units per annum. The energy requirements are met by fossil fuels, hydel, nuclear, and new renewable energy. The quality of life, material welfare, health and income are demonstrably affected by energy availability to growing population. Societies have been evolved from Hunter-gatherer Society to Agricultural Society, Industrial Society and at present Knowledge Society. It is interesting to observe the leisure time for knowledge society 50%, industrial society is around 45%, agricultural society 25% and 17% to hunter-gatherer society. The more the leisure more energy is required. As per Nikolai Kardashev scale three types of energy is available for humanity. The Type I is all energy sources on Earth (10^{16} Watts), Type II energy is Solar energy (4×10^{26} Watts) and Type III energy is the energy radiated from Milky Way (10^{36} Watts). Availability is quite large but the ways to convert into user friendly needs to be explored. Any technology developed it should be technically feasible, economically viable, socially acceptable and environmentally friendly.

At micro-level estimated energy requirement (EER) for man per day is around 2900 kcal/day and for woman 2200 kcal/day. The parameters considered for computation include weight, height, physical activity and age. Human efficiency is around 18% considering output and input. Human body requires electricity for functions of brain and heart are 10 Watts and 1.5 Watts respectively. If we consider self-perpetuating human body is like a battery with three vital parts viz. Structure (cells, bones, muscles, skin, blood, nerves etc), Liquid (intra and inter-cellular liquids that play an important role in generation of electrical energy and Life force (electrical charge responsible for activating the body and its structure). If there is a partial absence of energy body weakness and disease invades and when total absence of energy results death.

In the present work an attempt has been made to discuss energy requirements with increase of population and availability of energy sources. The present study also highlights the human body and estimated energy requirements (EER) for an average male and female with suitable calculations, energy efficiency of human beings. Several useful conclusions have been arrived at.

Keywords: Estimated energy requirement, Milky Way, Physical Activity, knowledge society, Human body battery, Life force

INTRODUCTION

Human societies have been evolved from Hunter-Gatherer, Agricultural, Industrial and Knowledge societies during the past three millenniums. The energy requirements were very less during hunter-gatherer i.e. bio-mass where as knowledge societies use modern commercial energy with large quantities. The first question is why do we need energy?. The second question is how much energy we need?. As we know energy is capacity to do work. Einstein quantified $E=MC^2$ where E is energy, m is the mass and c is the speed of light. Electrical energy is $E= \text{power} \times \text{time}$. The unit of energy is Joule (J) which was named after James Prescott Joule. It is equal to the amount of work done when a force of one Newton displaces a mass through a distance of one metre in the direction of that force. $J=Nm$.

If You are one person, out of 8.2 billion people on one planet Earth out of eight planets, orbiting one star (Sun) out of 300 billion stars in one Galaxy (Milky Way 10^{11} planets, 1 to 1.8 lacs light years) out of two trillion Galaxies. Beyond galaxy Universe 10^{87} planets with observable diameter of 93 billion light years (4.4×10^{23} km) and Omniverse and All-That-Is. Actual Universe is 250 times larger than observable universe (7 trillion light years) with an age of 13.799 billion years.

You need energy virtually from womb to tomb. Energy is required for the universal needs of people on land, seas and oceans, air and space. Energy is needed to cater the needs of global family for feeding and clothing, purification and transportation of water,, building highways, railroads, locomotive, automobiles for mobility of people, aircrafts, satelites and space crafts, ships and submarines. You also need energy for bells of Church, idols of God and Goddess, crowns of Emperors, Queens, Miss Universe and Miss world as well. You need energy to heart to pump blood and brain to function of humanbeings, mobiles phones, computers and internet for communication and connectivity of global village people.

The energy required for global population are extracting from Type I energy viz all the energy sources available on Earth 10^{16} Watt, then Type II energy viz Solar Energy 4×10^{26} Watt and Type III energy viz energy from Milky Way 10^{36} Watts is available. The energy required for world populatiom of 8.2 billions, as per 1 kW norm, is 71,832 billion units. Some nations have more energy available and others have less energy. 80 percent energy is consumed by 20 percent people and the rest 20 percent by 80 percent people viz. unequitable distribution.

Average humanbeing requires 4000 kJ energy per day just to survive and day-to-day chores. Hardworking labourer requires 5 times more energy viz 20,000 kJ. Food with required calorific value is convered into the rquired energy with 10 per cent efficiency. Efficiency of human engine is 18 percent. Human output is around 2880 kJ and Input is around 16000 kJ. Hence efficiency is $2888/16000=0.18 \times 100=18$ percent. Humanbeings require energy 1.5 Watts for pumping of 10 tons of blood from heart and for functioning of brain around 10 Watts is required continuously.

STATUS OF WORLD POPULATION AND ENERGY NEEDS

As per UN worldometer world population for 234 nations is 8.2 billions. Top three nations include India (1.45 billions), China (1.42 billions) and United States (0.345 billions). World needs 71.832 Trillion units per annum as per 1 kW norm. The per capita power availability varies from 270 to 25000 units and world average is 2234 units and 0.255 kiloWatt Years. In terms of kilo Watt Years Norway has 2.854, Sweden 1.941, Luxemburg 1.598.

ENERGY NEEDS AND INDUSTRIAL REVOLUTIONS 1 TO 5

- First Industrial Revolution (1770-1900 AD): **Steam power**, water wheels, spinning machines, mechanized industrial machines developed. Population has been increased gradually 1-2 billions.
- Second Industrial Revolution(1900 to1950AD):**Electricity** was invented. Development of industrial machined using electricity, highly mechanized systems, industrial towns and estates were developed. water store systems, food grains storage systems, cultivation from manual to mechanised systems. Muscular power is replaced by machine power. Population is more than four billion.
- Third Industrial Revolution (1950 AD to 1974 AD): **Electronic Computer and Internet** was invented. Computer integrated systems and Artificial Intelligence was developed. Human brain power is given to machines and Industrial systems. Civilization developed many folds. Mobility of people from one continent to the other, cultural exchange took place. Robots and highly mechanised and automated systems developed. population increased from 4 to 5 billions.
- Fourth Industrial Revolution (2011-2020 AD): Super Computers, internet, automated factories, smart industrial systems developed. Unmanned highly automated industries evolved. Human brain power is given to machines, neural networks, AI, ML, industrial and intelligent robots, unmanned systems developed to Moon, Mars Venus, space etc. Globe became global village. Population increased to 5 to 8 billions.
- Fifth Industrial Revolution (2020 AD and beyond): Human are looped in Automated industrial system, Collaborative robots, AGVs, SGVs.

Energy requirement increases significantly from Industry revolution 1 to 5 and also with increasing world population.

HUMAN ANATOMY ENERGY MODEL

Considering self-perpetuating human body is like a type of battery composed of three vital parts

1. Structure: cells and the organs, bones, muscles, skin layers, blood vessels, nerves and other physical structure.
2. Liquid: Intra and inter-cellular liquids that play important role in generation of electrical energy.
3. Electrical charge: Charge responsible for activating the body and its structure. It is also termed as Life force.

Out of these three components electrical charge is least understood. If there is a partial absence of energy in the body weakness or disease invades. When total absence of energy there is a death. Exhaustion is a symptom of low energy levels in the body. Any time you use your body and mind you lose energy. Vital energy in the body is 170 grams. It can be increased by physical activities, scientific dieting, physio therapy and sun bathing etc.

ESTIMATED ENERGY REQUIREMENT FOR MALE AND FEMALE

Energy required for men and women varies. Men require 2900 kcals/ day whereas women require 2200 kcals/day. Estimated Energy Requirement (EER) is calculated by two equations for male and female,

EER for Male in kcal per day = $662 - (9.53 \times A) + PA + [(15.91 \times W) + 539.6 \times H]$ where

A = Age in years, PA = Physical Activity varies from 1-1.48 for male, H = Height in meters

EER for Female in kcals per day = $354 - (6.91 \times A) + PA + [(9.36 \times W) + 726 \times H]$

Assume a man of 66 years old, PA=1.25, Weight=70 kgs, Height is 1.62 meters

Then EER = $662 - (9.53 \times 66) + 1.25 + (15.91 \times 70) + (726 \times 1.62) = 2517.835$ kcals per day

EER COMPUTATION AND ENERGY EFFICIENCY OF HUMANBEING

Average human needs about 4000 kJ/day of energy for daily chores or just to survive. Hard working labour required 5 times the average energy viz. 20,000 kJ/day.

Human out put for hard work = $0.1 \text{ kW} \times 8 \text{ hours} \times 3600 \text{ seconds} = 2880 \text{ kJ}$

Human Input = $20,000 - 4,000 = 16000 \text{ kJ/day}$.

Human Efficiency = $O/I = 2880/16000 = 0.18 \times 100 = 18\%$

Human input is food and it is 10% efficiency in converting food in to fat and muscular tissues that in turn converts into useful work.

Hence efficiency of humanbeing is $18\% \times 0.1 = 1.8\%$

CONCLUDING REMARKS

Human societies have evolved into Hunter-Gatherer society, Agricultural Society, Industrial Society and Knowledge society of World community. Energy requirements increased significantly from first IR to fifth IR. Human body needs energy for proper function continuously. Human heart beats 2.5 billion time Life time and energy generated equal to go to Moon and come back to Earth. Human brain requires 10 W and Heart requires 1.5 W to function. Energy is required from womb to tomb. Male require more energy as compared to female. The EER equations are given and model calculations are made. 20% people are consuming 80% energy and 80% people are consuming 20% of energy. The global people energy requirements are increasing with population increase and industrialisation. Type I and Type II energy are used at present but Type III energy source is not used or ways to generate is to be started.

ACKNOWLEDGEMENT

Author would like to express sincere thanks to Department of Mechanical Engineering, NERIST, Nirjuli, Itanagar, Arunachal Pradesh, India for the necessary help rendered in the present work. World Energy Conference, Turkey organizing committee for accepting my paper for presentation in the International Conference.

REFERENCES

1. Where there is Doctor, a village health care Handbook, David Werner, Ministry of Health and Family Welfare, Govt. Of India, 2006.
2. Industry 4.0 and Intelligent Systems for an Automotive Piston Casting, R.Ozah , Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engg, NERIST, India 2023.
3. Muralidhar M, Sustainable Energy Planning for Rural Northeast India: A Study, National Conference on Water Harvesting and its Management for Sustainable Development, NERIST, Feb. 2008, India.
4. Amr Adel, Future of Industry 5.0 in Society, Human Centric Solutions, Challenges and Prospective Research Areas, Jr. of Cloud Computing, 2022, <http://doi.org/10.1186>.
5. K. Naidu, Energy Services in International Trade Implications for Developing Countries like India, Jr. CPRI, vol 1, No 1, Sept. 2004, pp 57-62
6. Worldometer 2024, World Population Report (online/Internet).

S.No	Human parts	Numbers
1	Bones	206
2	Muscles	640
3	Blood	9 pints
4	Hairs	5 million
5	Eyes	2
6	Ears	2
7	Teeth	32
8	Nose	1
9	Nails	20
10	Oxygen	65%
11	Carbon	18.5%
12	Hydrogen	9.5%
13	Nitrogen	3.2%
14	Calcium	1.5%
15	Phosphorus	1.0%
16	Sulfur	0.2%
17	Others 53 elements Iron, Mg, Cl	1.1%
18	Heart	1
19	Brain	1
20	Water	50-80%
21	Skin	5 kgs
21	No of atoms	7×10^{27}
22	Ave. Mass	70 kgs

Table 1: Human Body and its sub-systems and Composition

S.No	Human Part	Specification	Energy or power required
1	Heart (Male)	340 grams (atrias and ventricles)	1.5 Watts of power
	Heart pump	Pumps 85 gr each beat	
	Heart beat	72 Nos	
	Pumping of blood per day	9000 liters	
	Heart (Female) Heart beats	80 Nos	
2	Human Brain	1300 grams	10 Watts of power
	Delta waves	1-3 Hertz	Deep, dreamless sleep
	Theta Waves	4-8 Hertz	Deep relaxation, meditation, mental imagery
	Alpha waves	9-13 Hertz	Relaxed, calm,, lucid, not thinking
	Beta Waves	14-30 Hertz	Awake, normal alert, conspiuousness
	Gamma Waves	30-100 Hertz	Memory recall, peak awareness, cognition enhancement, transdental states and high level information processing.
	Epsilon	0.5 Hertz	Stops all processes
	Human body	62-68 Hertz	
	Onset of death	25 Hertz	
3	Important pH values	Blood	7.4 pH
		Skin	7.4 pH
		Tears	7.2 pH
		Saliva	6.7 pH
		Urine	4.4-8.0 pH
		Semen	7.2-8.0 pH
		Vagina	3.8-4.5 pH
		Bile juice	8-8.6 pH

Table 2: Energy Requirements of Human Brain and Heart and their Sub-systems

THE FACTORS AFFECTING THE TECHNICAL EFFICIENCY OF IRANIAN GAS POWER PLANTS: THE APPLICATION OF SUPER EFFICIENCY METHOD

Sakineh Sojoodi

Assistant Professor of Economics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Laleh Dastmalchi

Ph.D. Candidate in Economics, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

The purpose of the study was to answer the question of what variables affect the level of technical efficiency of Iranian gas power plants. One of the challenges in answering this question is the calculation method of the technical efficiency of power plants. One of the most prevalent methods to calculate technical efficiency is data envelopment analysis (DEA). The method cannot rate performance for decision units with a performance score of 1. One proposed method to overcome this problem is using the super efficiency method to calculate technical efficiency. First, using Lin and Chen's (2018) super efficiency method, the study measured the efficiency score for each power plant from 2012 to 2019, the factors affecting this efficiency score were identified using the data panel regression method. The study results revealed that power plant size, capacity utilization rate, and thermal efficiency have a positive and significant effect on the technical efficiency of gas power plants. Nevertheless, the negative effect of power plant age on the technical efficiency of gas power plants is insignificant.

Keywords: Super efficiency method, gas power plants, data envelopment analysis (DEA), capacity utilization rate, thermal efficiency.

1. Introduction

With the advancement of technology, electricity has turned into the driving force of industry, agriculture, and even services. Hence, preparing the context for efficient performance in the production of this energy by reducing the supply price of the product would increase social welfare and enhance the competitiveness of other products. Enhancing efficiency in electricity generation in the first step calls for measuring efficiency, recognizing the status quo, and determining the factors affecting efficiency. The study tries to calculate the technical efficiency and identify the role of different elements in the difference in technical efficiency among gas power plants in the country (Iran) from 2011 to 2019. The reason behind selecting gas power plants is the high share of these power plants in the production and supply of electricity consumed in Iran and the need to increase their efficiency given their use of non-renewable energy to generate electricity.

One of the challenges in measuring technical efficiency has been choosing the suitable calculation method for this index. Different approaches can be used to measure technical efficiency, among which Data Envelopment Analysis (DEA) is a widely used one. DEA is a non-parametric analysis method to calculate the efficiency and evaluate the performance of Decision-Making Units (DMUs). Nowadays, using DEA is expanding fast and used to evaluate the performance of different organizations and industries. Different theoretical and empirical studies have been conducted on DEA models. Despite the many advantages of this method, one of the obvious problems of DEA is that if the number of efficient units (with an efficiency index equal to one) is more than one, then the best one cannot be chosen among them. In other words, ranking the units understudy with a 100% efficiency index is one of the challenges facing the DEA method. In DEA literature, different approaches have been introduced to solve this problem. One of the most popular and practical of these approaches is the super-efficiency method.

The novelty of the study relative to previous ones is using the super efficiency method to calculate the efficiency score of gas power plants. Additionally, the study considered the effects of power plant age, size, capacity utilization rate, and thermal efficiency as variables affecting efficiency score.

Then first, the literature has been reviewed, and then the method of calculating the efficiency and the research

model is given. In the results section, the results of the model estimate are reported, and conclusions from the findings are presented in the final section.

2. A review of the subject literature

Until the early 1970s, most studies focused on the role of firm ownership in efficiency, and less attention was paid to variables such as firm age and operating capacity. Seitz (1971) was of the first studies to involve variables associated with power plant characteristics such as power plant location, fuel used in the power plant, type of building and size and age of the power plant in explaining efficiency. Later on, exogenous variables such as regulation and GDP also entered the model.

2.1. Power plant age:

Some studies have inserted power plant age as a variable affecting technical efficiency in the regression of this variable (Pollitt, 1996; Khanna et al., 1999; Hiebert, 2002; and Sirasoontorn, 2005). Overall, new power plants are supposed to have lower fuel consumption and maintenance costs due to new technologies and generators and be more efficient (Kok Fong See, 2012). On the other hand, older power plants can adapt to production conditions and have more experience in this field. However, the new power plants incur additional costs such as human force training to adapt to new technologies (Khanna et al., 1999). Sirasoontorn (2005) has calculated the technical efficiency of Thai government power plants using DEA and SFA methods, showing that the power plant's age has a significant effect on inefficiency, and inefficiency increases with an increase in age. Barros (2008) has reached similar conclusions in Portugal. However, some studies have reached the opposite results. For instance, Pollitt (1996), in an inter-country study of nuclear power plants, has shown that older power plants are much more efficient given their experience and better management of production units.

2.2. Power plant size:

Power plant size has been used as one of the variables affecting technical efficiency in many studies (Joskow and Schmalensee, 1987; Meibodi, 1998; Khanna et al., 1999; Diewert and Nakamura, 1999; and Hiebert, 2002). Based on the literature available, the increase in the size of power plant boilers saves power plant fuel costs. Some experts have claimed that this effect is only seen in small-scale power plants, and the increase in the scale of the power plant increases costs due to poor monitoring and control of the power plant in large power plants (Joskow and Schmalensee, 1987). In most of the studies, a positive relationship has been confirmed between plant size and technical efficiency. For instance, Joskow and Schmalensee (1987) studied the factors determining the thermal efficiency of coal power plants in America, showing that plant size and experience are effective factors affecting technology and efficiency. This theory has been confirmed by Kumar and Managi (2009) and Barros and Antunes (2011). However, some studies such as Sarica and Or (2007) have indicated that the increase in the size of the plant because of increased problems due to lack of coordination, mismanagement, and maintenance problems of the plant, technical efficiency decreases. Nakaishi et al. (2021) used two virtual variables for large power plants (production more than 1000 MWh) and medium (production between 600 to 1000 MWh) to examine the effect of power plant size on technical efficiency, showing that as the size of the plant increases, so does the efficiency.

3.2. Capacity utilization rate:

Usually, a low-capacity utilization rate means that some generators and plant equipment are not used, which results in additional maintenance costs and low technical efficiency. Additionally, frequent commissioning and shutdown of power generation equipment increases power plant energy consumption and reduces efficiency (Khanna et al., 1999; Hiebert, 2002). In experimental studies, capacity utilization rates are mostly measured using the ratio of the average operating capacity to the plant's rated capacity. The results of most experimental studies indicate a positive and significant dependence of technical efficiency on capacity utilization rate. For instance, Hiebert (2002), Khanna et al. (1999), Olatubi & Dismukes (2000), Hiebert (2002), and Nakaishi et al. (2021) have confirmed this hypothesis.

2.4. Thermal efficiency rate:

The term thermal efficiency refers to energy conversion efficiency. In other words, it is how much energy must be expended to achieve a functional unit of work. In a thermal power plant, fuel is the source of energy, and its useful work is the electricity supplied to the grid. This variable could have a key role in power plant performance. The studies by Lam and Shiu (2001) among provinces and Nakaishi et al. (2021) among Chinese power plants have revealed that technical efficiency decreases sharply as the ratio of fuel to electricity generation in a power plant increases.

Studies about the efficiency of the electricity industry in Iran have usually sufficed to efficiency calculations and have not examined the factors affecting it. Mehrabi (2000) examined the efficiency of power plants and electricity distribution companies using the DEA method from 1995-1998. The study results have indicated that efficiency does not vary much concerning the presence or absence of the labor force. Rahmani (2002) measured the efficiency and productivity of the country's thermal power plants from 1996 to 2000 using both DEA and SFA methods. The findings indicate that the average technical efficiency of thermal power plants is 90%. PourKazemi and Heidari (2002) have calculated the technical efficiency of thermal power plants in the country in two modes of fixed and variable efficiency using the DEA method and three inputs of labor, capital, and fuel and considering electricity generation as an output. The study findings revealed that constant efficiency on the scale of technical efficiency is 64%, and variable efficiency on the scale of 74%. Emami Meibodi et al. (2009) calculated the technical efficiency of thermal power plants in 2007 using the DEA method, showing that the technical efficiency of these power plants is 76.4 and 92.8, respectively with the assumption of constant efficiency scale and variable efficiency to scale. Abrishami and Niakan (2010) have calculated the technical efficiency of thermal power plants from 2003 to 2006 using the SFA method. The study results indicated that the average technical efficiency of power plants is 93%. After estimating the technical efficiency in the study, the effect of the size of the power plant and its fuel type on technical efficiency was examined, with the results showing that the size of the power plant and the change of fuel to natural gas had a positive effect on the technical efficiency of these power plants. Motafakker Azad et al. (2014) calculated the efficiency of thermal power plants using the non-parametric random data envelopment (StoNed) method revealing that the size and rate of capacity utilization and the age of the power plant have a negative effect on the technical efficiency of thermal power plants.

3. Empirical model and method of measuring technical efficiency

Given the literature, the subject of the model by which the factors affecting the technical efficiency of power plants have been studied is as follows:

$$Eff_{it} = f(Age_{it}, Siz_{it}, Cap_{it}, Hr_{it}) \quad (1)$$

Here, i is the power plant unit and t the year, from 2011 to 2019. Moreover, Eff shows the technical efficiency rating for each power plant. The pattern above is estimated using the panel data model and using Stata software. Given the existing limitations in the study, in access to information about power plants, only the following five variables are used as factors affecting the technical efficiency of power plants:

Age of the power plant (Age): The logarithm of the number of years elapsed since the date of the first operation of the power plant,

Power Plant Size (Siz): Nominal power logarithm

Capacity utilization rate (Cap): The ratio of the average operating capacity of the power plant to its nominal capacity (percentage),

Thermal efficiency (Hr): The amount of thermal energy obtained by burning a unit of fuel and measured in kilocalories or Btu. As the thermal energy of one-kilowatt hour of electricity is consistently 860 kcal, the efficiency of units or power plants is obtained through the following formula:

$$\text{Thermal efficiency (\%)} = \frac{860}{\text{Thermal energy consumption is generated per kilowatt hour of electricity}} \times 100$$

(2)

Data limitations made only 31 gas-fired power plants whose statistical information was available in all the years in question be examined. The names of these power plants, the super efficiency values, and their rank are listed in Table 1.

As already stated, the research dependent variable of the model is the value of the technical efficiency of gas power plants. Methods of measuring technical efficiency are divided into two categories: parametric and non-parametric. Before 1957, most of the studies measuring the efficiency used parametric methods. In spite of their many advantages, these methods had two major drawbacks making them impossible to use on a large scale. These two problems are:

A) Parametric approaches are suitable for single or multiple input and single output modes.

B) Calculating the parameters and determining the parametric function is not easy overall and needs specifying a special form.

According to five principles, Farrel (1978[Ma1]) developed a set called “Production Possibility Set” and considered its boundary as an efficient frontier of production. In Farrel nonparametric method, any DMU on this boundary is efficient and otherwise it is considered inefficient. Because of the scientific problems and the limitations of the Farrel method, this method did not find much practical application and remained silent for many years, until in 1978, when Charnes, Cooper and Rhodes (CCR) introduced DEA method by comprehensiveizing Farrel method, which covers the specificity of the production process with several factors of production and product. In this approach, no special assumption is required regarding the shape of the production function and the efficiency of one firm is measured relative to the efficiency of other firms to estimate the production function. To get familiarized with the method, assume that the evaluated system has n decision making units ($DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n$), where each DMU_j uses m input $X = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$

to generate s output $Y = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})$. The inputs and outputs of each DMU or firm are all non-negative and each DMU has at least one positive input and one positive output: $Y \neq 0, Y \geq 0, X \neq 0, \text{ and } X \geq 0$. Considering these assumptions, Charans et al. (1978) introduced their primary model, called the multiplicative model as fractional and nonlinear. Among the problems of the initial equation, we can mention the existence of countless optimal solutions as well as its convexity and nonlinearity. To do away with these problems, Charens et al. (1978) rewrote it from a nonlinear model to a linear model by equating the denominator of the objective function, and maximized the output to calculate the output-oriented efficiency (with certain inputs). In firm p , they used the following linear programming model:

$$\begin{aligned}
 E &= \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rp} \\
 \text{s. t.} \quad &\sum_{i=1}^m v_i x_{ip} = 1 \\
 &\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \\
 &u_r, v_i \geq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s \quad , \quad i = 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{3}$$

In the above equation, u is the weights of the products and v the weights of production factors. In this linear programming model, the purpose is to maximize the product, and the first constraint is the same as the normalized budget constraint, and the second one shows that the ratio of total weighted revenues to total weighted costs (efficiency index) is 1 at maximum. This problem is known as output-oriented DEA and can be solved using its dual form, with fewer constraints compared to the above equation. This model, known as the input-oriented model with a constant return to scale, is shown as Equation (4):

$$\min \quad \theta$$

$$\begin{aligned}
 \text{s. t. } \quad & \theta x_{ip} - \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\
 & y_{rp} - \sum_{i=1}^n \lambda_i y_{rj} \leq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s \\
 & \lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \\
 & \theta \text{ is free}
 \end{aligned} \tag{4}$$

In this model, θ is the efficiency of the decision-making unit p compared to other units and its value is less than or equal to 1. When θ is equal to one, DMU p is on the efficient frontier, which means that the unit is operating efficiently. Values of less than one show the points outside the efficient frontier and at the same time inside PPS and the inefficient activity of the DMU. $\lambda_1, \lambda_2,$ and $\lambda_n \dots$ are non-negative numerical values that show the weights of DMUs for measuring the reference set. The reference set is obtained from the linear composition of the decision-making units under study, and for each firm, there is a point on the efficient frontier at which that firm must be located to achieve a 100% efficiency level. If another constraint indicating that the sums λ should be equal to 1 is added to this model, the model will be converted to an input-oriented model with Variable Return to Scale (VRS). Figure (1) indicates how to measure the efficiency in input-oriented model and the problem that this method may encounter. In this figure, it is assumed that an output is produced using two inputs. There are six DMUs (ie A, B, C, D, E and F) whose output are the same. The purpose is to evaluate unit E. First, the production possibility set and its boundary are determined. The efficient frontier is obtained by the line connecting units A, B, C, D and F. This curve is called the Farrell efficiency frontier and represents the optimal scale (composition of inputs) to produce the same amount of product and on it the decrease of one input must be accompanied by the increase of another input, otherwise the level of production will decrease.

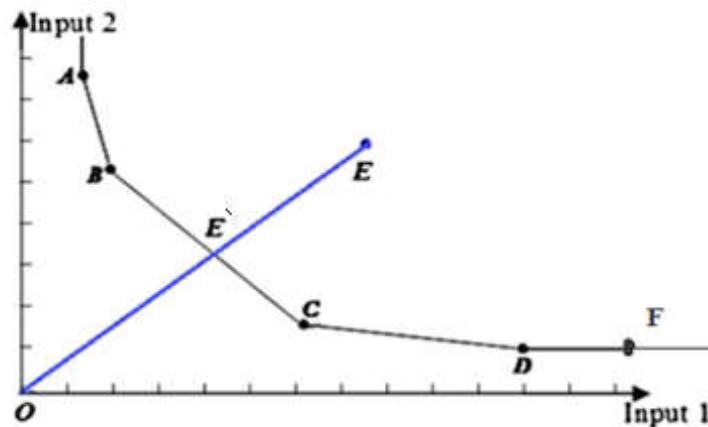


Figure (1): Input-oriented DEA model

Source: Meng and Shi (2017)

As is seen in Figure (1), DMUs A, B, C, D, F are on the efficiency frontier with an efficiency index equal to one. Firm E is located above this frontier and can move to a point (\bar{E}) on the frontier formed by efficient firms by less use of the inputs and stabilizing production and betterment of its efficiency. The distance from point E to the efficient frontier indicates the inefficiency of unit E and the efficiency index of this unit is $\frac{OE}{OF}$.

DMUs like DMU_F are on the efficient frontier with seemingly 100% efficiency, yet the input (here the first input) can be reduced and still remain on the efficiency frontier, where it is said firm F is weakly efficient or it is an extreme DMU. Thus, the detecting an efficient unit using DEA method is not very accurate. To solve this problem and rank the companies that have efficiency index equal to 1, Charnes et al. (1985) introduced additive models in which efficiency is calculated in two steps. First, the efficiency score (θ) is calculated and

then in the efficient units, based on equation (5), input slacks (s_i^-) and output slacks (s_r^+) are calculated and evaluated.

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \\
 & s. t. \quad \sum_{i=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- \leq \theta_p x_{ip} \\
 & \quad \quad \sum_{i=1}^n \lambda_j Y_{rj} - s_r^+ \geq Y_{rp} \qquad (5) \\
 & \lambda_i \geq 0 \\
 & j = 1, \dots, n \\
 & i = 1, \dots, m \\
 & r = 1, \dots, s
 \end{aligned}$$

The decision making unit p is strongly efficient if and only if $\theta=1$ and for all inputs and outputs of this unit, the amount of input and output slacks are zero. Also, p is a weak efficient if and only if $\theta = 1$ and some inputs and outputs of the decision making unit p have a non-zero input slack or output slack. The first and most obvious drawback of the above model is that it maximizes the total slacks of inputs and outputs instead of minimizing them. Therefore, it will not reach the nearest efficient point, but will reach the farthest efficient point. To solve such problems, we can use the super efficiency methods where efficient frontier of production is estimated without the presence of the DMU under evaluation.

Suppose there are n decision making units with m input and s output, in other words, the set includes all DMUs as follows:

$$\{DMU_1, DMU_2, DMU_3, \dots, DMU_j, \dots, DMU_n\}$$

If we select DMU_p from among all the DMUs in the above set as the DMU under evaluation, the set of DMU_p inputs is as follows:

$$\{x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pm}\}$$

And the set of DMU_p outputs is as follows:

$$\{y_{p1}, y_{p2}, \dots, y_{ps}\}$$

The basic model of SE method was proposed by Anderson and Peterson (1993) for ranking efficient units. In this method, the unit under evaluation (DMU_k) is removed from DMUs set and then the performance of this unit compared to other units is measured. This model, which is a modified form of CCR model, is:

$$\begin{aligned}
 & \theta_k^* = \min \theta_k \\
 & s. t. \quad \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq k}}^n \lambda_j X_j \leq \theta_k X_k \\
 & \quad \quad \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq k}}^n \lambda_j Y_j \geq Y_k \qquad (6)
 \end{aligned}$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad j \neq k$$

$$\theta_k \quad \text{is free}$$

In this minimization problem, the efficiency score can be greater than 1. For instance, in Figure 2 (As mentioned in Figure 1, this figure shows the Farrell efficiency frontier of a decision problem with two inputs and one output. x_1 and x_2 are inputs of the problem and can vary from one problem to another problem.), the calculated SE score for point B is greater than 1. One of the problems of SE models is that for some DMUs on the efficient frontier, without the presence of these units, no frontier can be defined for the production set (point D). In this case, it is stated that the above minimization problem is infeasible for that point. Infeasibility is the main hurdle in the application of SE models. It has to be noted that the Anderson-Peterson model does not guarantee that the infeasibility problem will not occur.

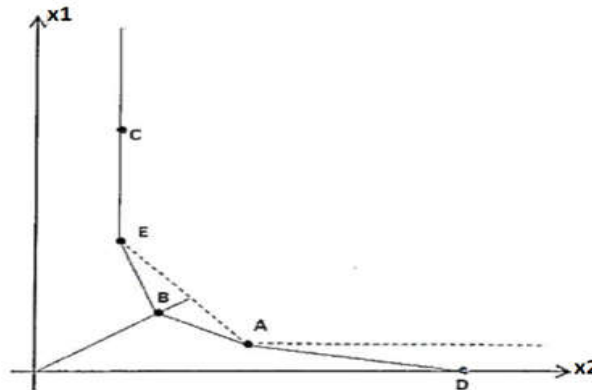


Figure (2): The frontier of SE

Source: Lee and Zhu (2012)

As Figure 2 shows, when an efficient DMU like DMU_D has an input equal to zero, the SE model with constant return to scale may be faced with infeasibility problem (Zhu, 1996). For SE model under variable returns to scale (VRS) condition, infeasibility problem is more common. Even if all input and output data are positive, infeasibility may occur in SE model with VRS (Seiford and Zhu, 1999).

Li, Jahanshahloo and Khodabakhshi's model is explained as the second model of SE in current paper. Firstly, the efficiency score of all DMUs is obtained with the CCR model. Undoubtedly, by solving CCR model, the efficiency for all efficient DMUs (including extreme and non-extreme efficient DMUs) is equal to one. Next, by solving the LJK super-efficiency model, for all efficient DMUs whose efficiency score is equal to one in the CCR model, the score of super-efficiency and therefore the exact rank for them is obtained¹. The LJK model for measuring super efficiency score of DMU₀ can be described as below:

$$\min \quad 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i2}^+}{R_i^-}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq 0}}^n \lambda_j x_{ij} + s_{i1}^- - s_{i2}^+ = x_{i0} \quad , \quad i = 1, \dots, m$$

¹ Although the model is to rank extreme DEA efficient DMUs obtained by the CCR model, it can be used to evaluate efficient units directly. It means without solving the CCR model, one can rank efficient DMUs by solving just the super-efficiency model.

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq 0}}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{ro} \quad , \quad r = 1, \dots, s \quad (7)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad j \neq 0$$

$$s_{i1}^-, s_{i2}^+ \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m$$

$$s_r^+ \geq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s$$

Where R_i^- is maximum of all i -th inputs including i -th input of evaluating DMU i.e. $R_i^- = \max_j(x_{ij})$. Note that R_i^- is always positive because if R_i^- is zero, it means no DMU used the input i . For each DMU₀ being evaluated, the objective of the LJK model is to minimize the unity plus the average ratio of the second input slacks over the maximum inputs among all DMUs. Given that the first and the second item are unit less, the objective function of the LJK model is unit invariant.

It has to be noted that in the optimal solution, between s_{i1}^- and s_{i2}^+ , only one of them can be positive. Indeed, one can use the free variable s instead of $s_{i1}^- - s_{i2}^+$ in model (7), yet this will probably lead to the infeasibility of the model, so it is emphasized that it is used in the same way.

The study used Lin and Chen's (2018) modified super-efficiency method to calculate the technical super-efficiency score of gas power plants. The approach proposed by Lin and Chen (2018) has the following advantages over its previous methods:

- (1) It is always subject to non-negative datasets,
- (2) When a small perturbation occurs for DMU being assessed, the proposed model acts more robust
- (3) Provides a finite and unique SE value for evaluating all DMUs
- (4) Has a good ability to distinguish between efficient DMUs,
- (5) The proposed model can be used in the case of constant returns to scale (CRS) for the infeasibility resulting from zero data
- (6) The proposed approaches can provide similar performance to conventional input-output (output-oriented) DEA models (Lin and Chen, 2018)

The following model is Lin and Chen (2018) output-oriented SE model in VRS mode that is used to measure SE of the p -th DMU (DMU _{p}):

$$\begin{aligned} \min \quad & \beta_p + M \times T_p \\ \text{s.t.} \quad & t_{ip} - T_p \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ & \beta_{rp} - \beta_p \leq 0 \quad , \quad r = 1, \dots, s \\ & \sum_{i=1, i \neq p}^n x_{ij} \lambda_{jp} - t_{ip} x_{ip}^{\max} \leq x_{ip} \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (I) \\ & \sum_{i=1, i \neq p}^n y_{rj} \lambda_{jp} + \beta_{rp} y_r^{\max} = y_{rp} \quad , \quad r = 1, \dots, s \quad (II) \quad (8) \\ & \sum_{i=1, i \neq p}^n \lambda_{jp} = 1 \quad (III) \\ & \lambda_{jp} \geq 0 \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad , \quad j \neq p \\ & t_{ip} \geq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

β_{rp} is free , $r = 1, \dots, s$

In the objective function, M is a positive number large enough determined by users of the model, and is considered 10^5 as an example in Lee and Zhu (2012). The presence of large enough M as a numerical coefficient of the input variables in the objective function hinders the inefficient units from moving towards the efficiency frontier along the input axis and thus the model becomes an output-oriented model. $t_{ip}x_{ip}^{max}$ shows the power or possibility of saving the i -th input of DMU_p relative to the new efficiency frontier established by the other $DMUs$ after removing the DMU_p from the set of all $DMUs$. Moreover, $\beta_{rp}y_r^{max}$ shows the output surplus at the r -th output or output of the DMU_p relative to the new efficiency frontier formed by the other $DMUs$ after removing the DMU_p from the set of all $DMUs$. Thus, t_{ip} and β_{rp} are as the scale to take the DMU_p to the new efficiency frontier formed by the other $DMUs$ after removing DMU_p from all $DMUs$ set, respectively, in direction of the inputs and outputs, the following relationships are also established:

$$x_i^{max} = \max_{j=1, \dots, n} \{x_{ij}\} , \quad i = 1, \dots, m$$

$$y_r^{max} = \max_{j=1, \dots, n} \{y_{rj}\} , \quad r = 1, \dots, s$$

We proceed as follows to calculate the values of SE:

$$\tilde{t}_p = \begin{cases} 1 + \sum_{i \in \hat{I}_p} \tilde{t}_{ip}^* / |\hat{I}_p| & , \quad \text{if } |\hat{I}_p| > 0 \\ 0 & , \quad \text{if } |\hat{I}_p| = 0 \end{cases}$$

$$o_p^+ = \begin{cases} 2 / (2 - \sum_{r \in R_p^+} \frac{\tilde{\beta}_{rp}^*}{|R_p^+|}) & , \quad \text{if } |R_p^+| > 0 \\ 0 & , \quad \text{if } |R_p^+| = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$o_p^- = \begin{cases} 2 / (2 - \sum_{r \in R_p^- \cup R_p^0} \frac{\tilde{\beta}_{rp}^*}{|R_p^-| + |R_p^0|}) & , \quad \text{if } |R_p^+| = 0 \\ 0 & , \quad \text{if } |R_p^+| > 0 \end{cases}$$

Where

$$\hat{I}_p = \{i | \tilde{t}_{ip}^* > 0, i = 1, \dots, m\}$$

$$R_p^+ = \{r | \tilde{\beta}_{rp}^* > 0, r = 1, \dots, s\}$$

$$R_p^- = \{r | \tilde{\beta}_{rp}^* < 0, r = 1, \dots, s\}$$

$$R_p^0 = \{r | \tilde{\beta}_{rp}^* = 0, r = 1, \dots, s\}$$

The value of SE is calculated as follows:

$$\frac{1}{\phi_p} = \hat{t}_p + o_p^+ + o_p^- \quad (10)$$

DMU_p is efficient VRS if and only if one of the following two conditions is met:

1) ϕ_p is equal to one, $|R_p^-| = |R_p^+| = 0$ and all slacks of the model are equal to zero.

2) ϕ_p is less than one.

Otherwise, DMU_p is inefficient VRS.

To evaluate the efficiency of power plants and calculate their super-efficiency score because of the lack of information on the workforce of power plants, two inputs and one output are used for each power plant:

Input 1: Installed capacity (as an alternative to capital input)

Input 2: Fuel consumption (in BTU)

Output: Power generation of power plants (in terms of MWh)

4. Results

In the first step, the super-efficiency values of gas power plants for the period examined are measured to estimate the research model, as presented in Table 1. Based on the results, in 2011, 2015, 2016, and 2019, Esfahan and Noshahr power plants have the highest and lowest technical efficiency among gas power plants, respectively. Moreover, the average efficiency in these years is 1.0016, 0.9956, 0.9953, and 0.9988, respectively. In 2012, Golestan and Gayen power plants were the most efficient and inefficient gas power plants, respectively, and the average efficiency of power plants in this year was 1.0019. In 2013, Shirvan and Noshahr power plants had the best and worst performance among gas power plants, respectively, and the average efficiency of power plants this year was 0.9932. Then in 2014, Hafez and Hesa power plants ranked 1st and 31st, respectively, and the average efficiency of power plants this year was 0.9964. In 2017, Ferdosi and Hesa power plants had the highest and lowest technical efficiency among gas power plants, respectively, and the average efficiency of power plants this year was 0.9793. Ultimately, in 2018, Asaloyeh and Kish power plants were the most efficient and inefficient power plants among 31 gas power plants, respectively, and the average technical efficiency of power plants this year was 0.9803.

Table 1: Super efficiency values of gas power plants from 2011 to 2019

The name of gas powerplant	Super Efficiency Score								
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Soofian	1.0046	1.006	1.0064	1.0038	1.0037	1.0024	1.0046	1.0081	1.0059
	18	23	21	25	24	24	22	20	22
Urmia	1.0018	1.0013	1.0022	1.0014	1.0022	1.0016	1.0013	1.0033	1.0059
	24	26	25	27	26	26	27	26	23
Hesa	1.0003	1.0001	0.4998	0.4996	1.0023	1.0013	0.4988	0.4987	0.9992
	29	29	30	31	25	27	31	30	29
Dorood	1.0022	1.0006	1.0012	1.0023	1.0014	1.002	1.0031	1.0064	1.00445
	23	27	27	26	27	25	24	22	25
Rey	1.0438	1.0508	1.0558	1.0727	1.0435	1.0438	1.0737	1.0698	1.0971
	5	9	6	4	9	9	3	6	3
Gayen	1.0034	0.4910	1.00005	1.0003	1.0010	1.004	1.0026	1.0046	1.0037
	20	31	28	28	28	23	25	24	27
Kaveh	1.0388	1.0437	1.0480	1.0526	1.0552	1.0539	1.0401	1.049	1.0420
	6	10	7	8	8	7	10	9	9
Shirvan	1.0329	1.0508	1.0757	1.0719	1.076	1.0465	1.0841	1.045	1.0356
	7	8	1	6	3	8	2	10	10
Shahrood	1.0010	1.0084	1.02265	1.0252	1.0275	1.0267	1.0240	1.0269	1.0236
	26	22	13	14	13	14	14	13	12
Kish	1.0128	1.0123	1.0175	1.0189	1.0183	1.0182	1.0145	0.4844	1.0133
	16	21	15	16	17	16	18	31	18
Hormozgan	1.0291	1.0344	1.04135	1.0387	1.0313	1.0777	1.0346	1.070	1.0573
	8	11	10	10	11	2	11	5	7
Chabahar	1.0156	1.0190	1.0165	1.0405	1.0202	1.0185	1.0194	1.0183	1.0170
	14	16	16	9	16	15	15	16	15
Kangan	1.0147	1.0168	1.0145	1.0155	1.0215	1.0137	1.01415	1.0159	1.0141
	15	17	17	17	15	18	19	17	17
Booshehr	1.0038	1.0055	1.004	1.0010	1.0007	0.4999	0.4996	1.0010	1.0006

	19	25	24	19	29	30	30	27	28
Loshan	1.0013	1.0146	1.004	1.0086	1.0109	1.0082	1.0059	1.0073	1.0069
	25	18	23	21	19	20	21	21	21
Zahedan	1.0261	1.0289	1.0286	1.0306	1.0295	1.0313	1.0308	1.0251	1.0188
	10	12	11	13	12	12	13	14	14
Bandar Abbas	1.0008	1.0004	0.9996	0.9995	0.4995	0.9997	0.9996	1.0003	0.4999
	27	28	29	29	30	28	28	28	30
Shiraz	1.0182	1.0256	1.0123	1.0120	1.0078	0.9995	1.0184	1.0138	1.0169
	13	15	18	18	20	29	17	18	16
Yazd	1.0046	1.0124	1.0089	1.0101	1.0057	1.0042	1.0075	1.0117	1.0074
	17	20	20	20	22	22	20	19	20
Zargan	1.0025	1.0146	1.0093	1.0078	1.007	1.01	1.0022	1.0035	1.0054
	22	19	19	22	21	19	26	25	24
Esfahan	1.0596	1.0848	1.0613	1.072	1.0836	1.0782	1.0697	1.0734	1.1306
	1	4	5	5	1	1	4	2	1
Roodshoor	1.0265	1.0288	1.0240	1.0381	1.0393	1.0363	1.0484	1.0374	1.0355
	9	13	12	11	10	11	9	11	11
Asaloyeh	1.0566	1.0599	1.0424	1.0329	1.0597	1.0416	1.0558	1.08255	1.0974
	2	6	9	12	6	10	6	1	2
Ferdosi	1.0480	1.1205	1.0746	1.074	1.0634	1.0641	1.0849	1.0703	1.0700
	4	3	2	2	5	6	1	4	6
Kahnooj	1.0006	1.0059	1.0053	1.0060	1.0054	1.0045	1.0037	1.0048	1.0042
	28	24	22	23	23	21	23	23	26
Khoramshahr	1.0524	1.0525	1.0448	1.0739	1.0811	1.0768	1.0616	1.0639	1.0557
	3	7	8	3	2	3	5	8	8
Kashan	1.0259	1.0279	1.0189	1.0248	1.0261	1.0309	1.0317	1.0333	1.0074
	11	14	14	15	14	13	12	12	19
Noshahr	0.4989	0.4998	0.4994	0.4999	0.4995	0.4999	0.4999	0.4995	0.4998
	31	30	31	30	31	31	29	29	31
Golestan	1.0215	1.1409	1.0743	1.0715	1.0557	1.0739	1.0521	1.0729	1.0815
	12	1	3	7	7	4	8	3	5
Hafez	1.0027	1.1292	1.0743	1.0766	1.0722	1.0687	1.05395	1.0687	1.0841
	21	2	4	1	4	5	7	7	4
Tolid	0.99865	1.0731	1.0021	1.0057	1.0121	1.016	1.0190	1.0222	1.0227
Parakandeh	30	5	26	24	18	17	16	15	13

Source: Research findings

4.1. Selecting between pooled and panel data methods

Prior to starting the discussion, review and interpret the results and judge the relationship between the super-efficiency values of gas power plants as a dependent variable and the age of power plants, power plant size, power plant capacity utilization, and power plant thermal efficiency rate as independent variables, it is necessary first to test whether the studied power plants are homogeneous or not. In this test, performed by F-test statistics, in the null hypothesis, the homogeneity of the studied power plants is supposed, so the rejection of the null hypothesis shows the use of the panel data method, and the non-rejection of the null hypothesis indicates the use of Pooled Ordinary Least Squares. The test results, shown in Table 1, show the rejection of the null hypothesis and the need to use the panel data method for power plants.

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n \text{ Pooled data}$$

$$H_1: \alpha_i \neq \alpha_j \text{ Panel data}$$

4.2. Hausmann test

In the next step, one has to select between two methods of estimating panel data, fixed effects method, and random effects method. Hausmann test statistics are used to determine the estimation method (fixed effects or random effects) in panel data. According to this test, rejecting the hypothesis shows using the fixed effects

method.

$$H_0: b_s = B_s \quad \text{Random effects method}$$

$$H_1: b_s \neq B_s \quad \text{Fixed effects method}$$

The results from the Hausman test show that the H_0 hypothesis is accepted, and therefore the random effects method has to be used. The results of this test are given in Table 2.

Table 2. The results of F-Limer and Hausman tests

F amount	8.12
P-Value	0.0000
Hausman	0.0926
χ^2	7.97

Source: Research Findings

4.3. Model estimation

As the null hypothesis of the Hausman test was accepted, the random effects method is used to estimate the model. According to the results (Table 3), the estimated coefficients of all explanatory variables except the power plant age are significant. The age coefficient is negative, showing that new power plants have higher technical efficiency; nonetheless, this effect is insignificant. The insignificance of this effect can be explained by the fact that gas power plants are in almost the same age range. The maximum, minimum, average, and standard deviation of age of gas power plants in 2019 are 56, 10, 25.52, and 13.85, respectively.

The power plant size variable (Siz) coefficient has the highest value among the explanatory variables, showing the significance of this variable in the difference in technical efficiency of power plants. The coefficient value indicates that a one percent increase in the power plant size increases the efficiency index by 0.9371%. This can be the ability of larger power plants to attract workforce, especially more skilled managers. This is in line with the results obtained in the studies of Pollitt (1996), Meibodi (1998), Diewert and Nakamura (1999), and Kumar and Managi (2009).

Capacity utilization rate (Cap) is positive too. The value of the coefficient of this variable shows its significance in technical efficiency, and accordingly, the increase in the capacity utilization rate increases its technical efficiency. This could be because high utilization rates prevent the frequent shutdown and re-operation of power generation equipment and thus reduce energy loss and depreciation due to restart. Moreover, the thermal efficiency rate has a positive and significant effect on technical efficiency. This indicates the significance of thermal efficiency in the technical efficiency of power plants.

Table 3. Model estimation using random effects panel data method

age	-0.0196 (-0.09)
size	0.9371 (4.03)
capacity utilization rate	0.3207 (1.70)
terminal efficiency rate	0.2097 (1.81)
R^2	0.2547

Source: Research Findings

The efficiency score of power plants is from 0 to 2, and considering that the data is limited to one interval and has upper and lower boundaries, it is better than the Tobit panel estimation method. Hence, the pattern is estimated by the Tobit panel method; the results are given in Table 4. As is seen, the results of this estimate

confirm the results of Table 1, so that the age of the power plant has a negative but insignificant effect on the technical efficiency of gas power plants. However, the size, capacity utilization rate, and thermal efficiency rate have a positive effect and are significant on the technical efficiency of gas power plants.

Table 4: Model estimation using Tobit panel method

age	-0.0215 (-0.09)
size	0.9361 (4.01)
capacity utilization rate	0.3209 (1.71)
terminal efficiency rate	0.2096 (1.83)

Source: Research Findings

6. Conclusion and Policy Implications

In this study, the technical efficiency of gas power plants in the country (Iran) was calculated and analyzed by Lin and Chen (2018) using the super-efficiency method, and gas power plants were ranked compared to each other considering the obtained super-efficiency values.

Then the study examined the factors affecting the technical efficiency of selected thermal power plants indicating that the increase in the size and rate of utilization of capacity and thermal efficiency rate increases efficiency, and the increase in the age of power plants decreases technical efficiency.

References

- Abrishami, H., Niakan, L. (2010). Measurement of technical efficiency of thermal power plants in the country by method and comparative comparison with countries (SFA) of randomly selected border analysis in developing. *Quarterly Journal of Energy Economics Studies*, 26, 153-175.
- Andersen, P., & Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management science*, 39(10), 1261-1264.
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science*, 30(9), 1078-1092.
- Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W., Swarts, J., & Thomas, D. (1989). An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. *Research in governmental and nonprofit accounting*, 5, 125-163.
- Antunes, Olinda Sequeira (2011). Performance Assessment of Portuguese Wind Farms. & Barros, C.P. *Energy Policy*, 39, 6, 3055-3063.
- Barros, C.P. (2008). Efficiency Analysis of Hydroelectric Generating Plants: A case study for Portugal. *Energy Economics*, 30, 59-75.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
- Charnes, A., Cooper, W. W., Golany, B., Seiford, L., & Stutz, J. (1985). Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. *Journal of econometrics*, 30(1-2), 91-107.
- Diewert, WE & Nakamura, AO (1999). Benchmarking and the Measurement of Best Practice Efficiency: An electricity generation application. *Canadian Journal of Economics*, 32, 2, 570-88.
- Emami Meibodi, A., Afgheh, M., Rahmani Sefati, M.H. (2009). Measuring Technical Efficiency and Productivity in Heating, Gas and Combined Cycle Power Plants. *Quantitative Economics (Former Economic*

- Studies). 6, 3, 79-103.
- Hiebert, DL (2002). The Determinants of the Cost Efficiency of Electric Generating Plants: A stochastic frontier approach. *Southern Economic Journal*, 68, 4, 935-46.
- Joskow, PL & Schmalensee, R (1987). Incentive Regulation for Electric Utilities. *Yale Journal on Regulation*, 4, 1, 1-49.
- Khanna, M, Mundra, K & Ullah, A. (1999). Parametric and Semi-parametric Estimation of the Effect of Firm Attributes on Efficiency: the electricity generating industry in India. *The Journal of International Trade & Economic Development*, 8, 4, 419-30.
- Kok Fong See & Coelli, T.J. (2012). An Analysis Of Factors That Influence The Technical Efficiency Of Malaysian Thermal Power Plants. *Energy Economics*, 34, 3, 677-685.
- Kumar, S. & Managi, S (2009). The Economics of Sustainable Development the Case in India, *Springer*. New York, USA.
- Lam, P. L., & Shiu, A. (2001). A data envelopment analysis of the efficiency of China's thermal power generation. *Utilities policy*, 10(2), 75-83.
- Lee, H. S., & Zhu, J. (2012). Super-efficiency infeasibility and zero data in DEA. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 429-433.
- Lin, R., & Chen, Z. (2018). Modified super-efficiency DEA models for solving infeasibility under non-negative data set. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 56(3), 265-285.
- Mehrabi, A. (2000). Examining the efficiency of thermal power plants and electricity distribution companies using comprehensive data analysis method. Master Thesis, Faculty of Economics, *Allameh Tabatabaee [Ma2]University*, Tehran.
- Meibodi, AE (1998). Efficiency Considerations in the Electricity Supply Industry: the case of Iran. *Surrey Energy Economics Discussion Paper Series*, no. 95, University of Surrey.
- Meng, X. L., & Shi, F. G. (2017). An extended DEA with more general fuzzy data based upon the centroid formula 1. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(1), 457-465.
- Ministry of Energy (Various Years). Detailed statistics of the country's electricity industry.
- Motafkker Azad, M.A., Pourabadollah Koich, M., Fallahi, F., Ranjpour, R., Sojoodi, S. (2014). Calculating the technical efficiency of thermal power plants in the country and investigating the factors affecting it: non-parametric random method of data coverage. *Journal of Economic Research*, 49 (1), 93-113.
- Nakaishi, T. (2021). Developing effective CO₂ and SO₂ mitigation strategy based on marginal abatement costs of coal-fired power plants in China. *Applied Energy*, 294, 116978.
- Olatubi, WO & Dismukes, DE (2000). Data Envelopment Analysis of the Levels and Determinants of Coal-Fired Electric Power Generation Performance. *Utilities Policy*, 9, 47-59.
- Pollitt, MG (1996). Ownership and Efficiency in Nuclear Power Production. *Oxford Economic Papers*, 48, 2, 342-360.
- Pourkazemi, M.H., Heidari, K. (2002). Using Data Envelopment Analysis (DEA) in evaluating the efficiency of thermal power plants in the country. *Lecturer of Humanities*, 24, 35-54.
- Rahmani, B. (2002). Estimating and analyzing efficiency and productivity of thermal power plants in the country using DEA and SFA methods. Master Thesis, *University of Tabriz, Faculty of Humanities and Social Sciences*.
- Sarica, K & Or, I (2007). Efficiency Assessment of Turkish Power Plants Using Data Envelopment Analysis. *Energy Policy*, 32, 1484-99.
- See, K. F., & Coelli, T. (2012). An analysis of factors that influence the technical efficiency of Malaysian thermal power plants. *Energy Economics*, 34(3), 677-685.
- Seiford, L. M., & Zhu, J. (1999). An investigation of returns to scale in data envelopment analysis. *Omega*, 27(1), 1-11.

- Seitz, WD (1971). Productive Efficiency in the Steam-Electric Generating Industry. *Journal Polit. Econ.*, 79, 879-886.
- Sirasontorn, P (2005). Efficiency Measures and Regulation: Thai electricity generation. *Thammasat Economic Journal*, 23, 1, 38-81.
- Zhu, J. (1996). Robustness of the efficient DMUs in data envelopment analysis. *European Journal of operational research*, 90(3), 451-460.

ENERGY EFFICIENCY ECONOMICS AND POLICY

Muhammad Sufyaan Khan

Vellore institute of Technology, India

Abstract

Purpose: This paper presents significant developments in the energy efficiency sector in India from 1960 to the present. It emphasizes the importance of energy efficiency policies for ensuring energy security and highlights the challenges faced during their implementation and compliance.

Methodology: The study was conducted through desktop analysis, utilizing a wide variety of sources, including published books, research papers, regulations, policies, and roadmaps on energy in both global and Indian contexts.

Findings: The study reveals that energy efficiency initiatives are an integral part of India's energy planning strategies. As domestic conventional energy sources diminish with increased usage, the Government of India has recognized the need to adopt energy efficiency strategies to pursue sustainable energy development.

Limitations: This paper attempts to analyze the changing importance of energy efficiency policy initiatives in India from 1960 to the present date. It serves as a stepping stone, indicating the need for further research.

Originality/Value: The paper provides extensive information about the energy efficiency scenario in India. The methodology and results reported may be useful for anyone interested in researching the Indian energy sector.

Introduction

Energy is the life blood of the society. The prosperity of the community, industry, and economy depends up on safe, secure, sustainable, and affordable energy (European Union 2011). Access to energy is essential to addressing the problems that cause poverty. A life lived without energy is a life lived in poverty (World Coal Association 2012). Poverty reduction means increased energy consumption. Though the energy needs of people living in poverty are small, and small amounts of energy can make significant difference in their lives, millions of men, women, and children in the developing world do continue to live absolute poverty because they do not have access to modern energy services (Andrew Scott 2010).

According to International Energy Association's World Energy Outlook (2011), there are 1.3 billion people across the globe without access to electricity and 2.7 billion people who do not have clean cooking facilities. This problem is mainly spread across the developing world, considering sub-Saharan Africa and developing Asia which together account for 95 % of people in energy poverty.

While world energy demand has undoubtedly grown significantly over time, most of the low-income developing countries with high import dependency show a high vulnerability to energy price volatility (BP 2011). The world primary energy consumption pattern shows that this will increase in the coming years. Figure 1 shows the primary energy consumption of the world in 2011.

From 2000 to 2010 India's primary energy consumption increased at a CAGR of

5.9 %, while global consumption rose at a CAGR of 2.5 %. As a result, India transitioned from being the world's seventh largest energy consumer in 2000 to fourth largest within a decade. However India's per capita energy consumption is one of the lowest in the world (Earnst and Young 2012). The global average of per capita consumption is 1,747 kg of oil equivalent (kgoe), while India's per capita consumption is merely 447 kgoe (BP 2011). Over the next few years, the high growth in GDP is likely to further increase energy consumption in India. According to the International Energy Agency, the country's total primary energy demand is expected to increase to 897 million tons of oil equivalent by 2015, increasing at a CAGR of 3.7 % during the period 2009–2025 (IEA 2011). India's growing primary energy consumption is shown in Fig. 2 given below.

India’s economic transformation after the early 1990s has put energy at the center of its economic agenda (Bastia 2006). The present and coming generations have a tremendous task to creating and implementing a road map for a reliable, affordable, and sustainable energy for all end users. The concept of “energy security” can be traced to the eve of World War I when the First Lord of Admiralty Winston Churchill made a historic decision to shift the power source of naval ships of the Great Britain from coal to oil (Yergin 2006). Energy security refers to a resilient energy system (Brown et al. 2003). Energy security essentially implies ensuring uninterrupted supplies of energy to support economic and commercial activities necessary for the sustained growth of the economy. The relevance for this concept for India emanates from the increasing imbalance between the demand for

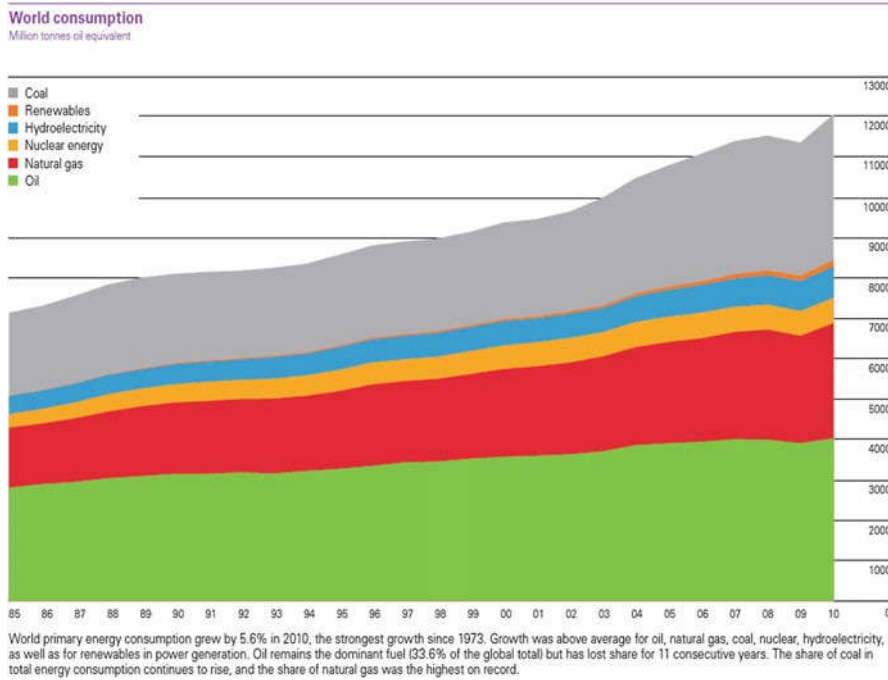


Fig. 1 World primary energy consumption. *Source: BP Statistical Review 2011*

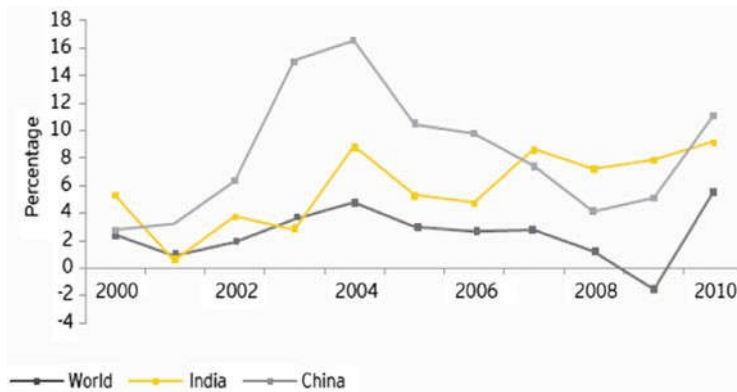


Fig. 2 Rising primary energy consumption of India (%y-o-growth). *Source: BP statistical Review of World Energy 2011*

energy and its supply from indigenous sources, implying thereby the growth import dependence for essential requirements of the nation (Singh 2010). With a growing GDP rate of 8 %, India is moving parallel to China in terms of development but the energy consumption is catching up as well. Today we have identified a myriad of energy sources from fossil fuel to nuclear energy. But our demands on energy due to changes in our lifestyles have also increased. According to IEA figures, the global demand on energy would increase by 60

% by 2030. In order to enhance energy security, it is necessary to consider policies which are reducing risks from both the supply and demand side. For this purpose, the governments of developing countries are advised to diversify their resources of imported energy, while seeking to reduce a reliance on imported energy (especially oil) over the long term. While considering on the demand side, policies aimed at increasing energy efficiency are often the easiest and lowest cost-effective method to achieve greater energy security (GNSD 2010). Therefore, after summing up all the energy issues, energy efficiency has been identified as the only tool to overcome the energy challenges facing the world today.

1 Background

The 1973 oil embargo raised the oil prices worldwide, but it was the developing countries which were the main victims of oil price hike. According to a World Bank study, the oil import bill for the developing countries in 1974 rose to around US\$45 billion (Willrich 1975). In the twenty-first century, changes in energy supply or demand in one region will have repercussions across the globe (Foquet 2008). So the efforts in energy conservation or energy efficiency taken by a nation will attribute the global energy security. The World Summit on Sustainable Development (WSSD) held in Johannesburg, South Africa, in 2002 highlighted the importance of the energy efficiency and access to sustainable energy as key element to sustainable development (IIEC 2004). Energy efficiency can serve as a stepping stone for ensuring green growth, economic efficiency, and sustainable development (UN 2011).

Energy conservation and energy efficiency are related but separate concepts. Energy conservation is achieved when growth of energy consumption is reduced, measured in physical terms. Energy efficiency may be defined as a practice of judicious use of energy with an aim to reduce its economic cost and environmental impact. It has been in practice ever since after the first oil shock in 1973; now it has assumed even more importance because of being the most cost-effective and reliable means of mitigating the global climate change (Dey 2007).

The four primary energy sources are coal, oil, gas, and nuclear energy, and the energy efficiency was considered as fifth fuel (Don Hedley 1986). At present the energy efficiency became the first one and the world governments exploit energy efficiency as their energy resource of first choice because it is the least expensive and most readily scalable option to support sustainable economic growth, enhance national security, and reduce further damage to the climate system (ICLEI 2007). The energy efficiency is a fundamental element in progress towards sustainable energy future. The concept of energy efficiency can be applied in energy extraction, transportation, conversion as well as in consumption. As global energy demand

Table 1 Key reasons for advocating energy efficiency

Market failures

Payback gap—consumers face higher interest rate than producers

- Differences of prices from marginal cost—with franchised monopolies or regulatory oversight, prices rarely reflect marginal cost
- Risk sheltering of the utility—monopoly franchise or regulatory oversight shields utility from risk
- Rate of return regulation—leads to an incentive to over invest
- Externalities—externalities are not seen by market actors
- Lack of information—consumers does not choose EE technologies because of lack of knowledge
- High transaction costs—consumers miss opportunities because of high transaction costs
- Disconnected decision makers are tenant/landlord relationships—consumers may not be able to influence EE decisions. This occurs, such as for instance, when one party, the landlord, pays for the equipment while the other party, the tenant, pays the energy bill

Other reasons

- Ensuring adequate energy supply

- Maintaining consumer price stability
- Promoting greater equity with respect to energy cost burdens

Source: Adapted from Pacuadan and Guzman (2002) in Reddy et al. (2009)

continues to grow to find the needs and aspirations of the population across the globe, actions to increase energy efficiency will be essential (ICC 2007). Many developing countries have also implemented major efficiency drives. Energy efficiency is a means to conserve natural resources, reduces environmental degradation, and not least to save money (Reddy et al. 2009). It is true that energy efficiency helps to reduce greenhouse gas (GHG) emissions that it is an essential part of an effective strategy to climate change. It is estimated that, by using the most advanced technologies, a CO₂ reduction of about 50 % is possible until the year 2050 (Martinot and Mac Doom 2000). Energy efficiency is a gold mine for CO₂ reduction and should not be overlooked in aiming for the Kyoto Protocol and beyond. Pacuadan and Guzman (2002) pointed out the key reasons for advocating energy efficiency which can be fulfills multiple objectives and they are compiled in the Table 1.

Energy efficiency improvements have multiple advantages, such as the efficient utilization of natural resources, reduction in air pollution levels, and lower spending by the consumer on energy-related expenditure. Investments in energy efficiency result in long-term benefits which are reduced energy consumption, local environmental enhancement, and overall economic development (Reddy et al. 2009). The short-term and long-term benefits are given in Table 2.

There are certain barriers or obstacles present while implementing energy efficiency technologies which are lack of information, transaction, institutional, and regulatory issues that make investment. The major key barriers that were identified by the International Energy Association are given in Table 3.

Table 2 Positive aspects of energy efficiency

Short-term benefits	Long-term benefits
Reduces load, peak demand, and energy use water etc.	Less oil wells, refineries, forests, land,
Reduces market prices for all consumers more cost effective	Less subject to security risks and interruptions Often less costly and Creates jobs and improves the economy
Less subject to market and fuel price volatility transportation and distribution costs	Less subject to market and fuel price volatility No Improve economic development
Short gestation periods	Less transport (fuels to the energy-generating places)
Fuel is saved	Less health impacts
Plantations are saved	Reduced environmental impacts
(a)	Local pollutants
(b)	Global pollutants
(c)	Water use
Reduces local pollutants service	Increases energy security Improved quality of

Source: Reddy et al. (2009)

Table 3 Barriers to energy efficiency Barrier Examples

Barrier	Examples
Market	Market organization and price distortions that prevent customers from appraising the true value of energy efficiency The principal agent problem, in which the investor does not reap the rewards of improved efficiency (the classic case being landlord–tenant situation) Transactions costs (project development costs are high, relative to potential energy savings)
Financial	Lack of understanding of EE investments or to perceived risk in the part of financial institutions Information and awareness Regulatory and Institutional Lack of sufficient information and understanding in the part of consumers to make rational consumption and investment decisions Energy tariffs that discourage EE investment (such as declining block prices) Incentive structures that encourage energy providers to sell energy rather than invest in cost-effective energy efficiency Institutional bias towards supply–side investments
Technical	Lack of affordable EE technologies suitable to local conditions Insufficient local capacities for identifying, developing, implementing, and maintaining EE investments

Source: IEA (2010)

2 Energy Efficiency Policies

Traditionally, economic development has been closely connected to the adequacy of energy. Countries pursuing economic growth are expected to resort to increasing levels of energy use. Achieving these levels of energy production and utilization

through present technologies is not only difficult and expensive but also environmentally unsustainable. Various studies indicate that increased energy efficiency can bridge the gap between growing demand and reduced supply without affecting adversely the quality of service (Golove and Eto 1996; Reddy and Balachandra 2003; Reddy et al. 2009). According to IEA's World Energy Outlook, effective policy commitment to energy efficiency is necessary, which is still lacking in many developing countries. Without this policy commitment, international efforts to help and assist developing countries will not be able to fully succeed (Janssen 2010). Energy security is one of the main targets of energy policy (Winzer 2011).

Energy efficiency policies usually consist of instruments of governmental intervention into the energy market. These instruments aim to overcome barriers to investment in energy efficiency improvements. The role of governments in influencing energy markets has changed dramatically over the last 2,000 years, and historically, governments of agrarian and rural economies focused only marginally on modern forms of energy. Governments had other priorities (Jupp 2006). The transition away from biomass fuels that depended on land for production towards fossil fuels gradually led to an increased involvement of the governments in energy markets. The nineteenth and twentieth centuries saw the formation of a large number of large energy supply companies, first of coal and then oil (Fouquet 2009). Sustainable energy policies fell into four major categories such as climate change, energy efficiency, renewable energy, and transportations as shown in Fig. 3.

Actions undertaken in each category can be broadly classified into policy- and process-type initiatives. Policy-type initiatives are generally designated at the country level and comprise country strategies and national plans or programs targeting specific sectors or areas of the economy. Process-type initiatives comprise

the actual tools used to apply the policy in practice. Other programs focus mostly on technologies promoting energy efficiency and cleaner, more energy-efficient ways of production. Another popular policy initiative is encouraging voluntary agreements by industry. Several countries have country strategies, national policies, or legislation in place to guide energy efficiency policy, devise strategies, and set targets and ways to monitor performance (IIEC 2004). Here in this paper made an attempt to analyze the changing pattern of energy efficiency policy initiatives of India from 1960 to till date and its contribution to the global energy security in a nutshell.

3 A Brief History of Energy Efficiency Initiatives in India

The Indian Electricity Act, 1910 laid the foundation for electricity supply in India. After independence, various policies, legislations, and programs were introduced to boost development, with electricity being a key focus. Initially, the primary concern was ensuring the availability of electricity, oil, and coal for growth, while energy conservation received little attention in the first two decades. The Planning Commission, established in 1950, formulated plans for resource utilization, with the first Five-Year Plan (1951–1956) allocating 27% of the budget to irrigation and power, prioritizing multi-purpose river valley projects. The second and third plans (1956–1966) emphasized regional grid interconnection and improving thermal station efficiency, while noting inefficiencies in thermal plants, which had low efficiency levels around 20% until the 1960s.

Energy planning became integral to development, although Demand Side Management (DSM) was not a priority. The Energy Survey of India Committee (1963) was tasked with assessing national energy needs, particularly for rural areas, and advising on investments and energy pricing. The fourth Five-Year Plan (1969–1974) separated power from irrigation, leading to a significant increase in installed power capacity. By 1970, the public sector controlled 80% of the power capacity, highlighting the government's push for public sector dominance. Recognizing the need for long-term energy planning, the Fuel Policy Committee (1970) emphasized using coal over oil, improving energy generation efficiency, and focusing on hydropower.

The 1973 oil crisis underscored the importance of energy conservation, prompting recommendations for substituting oil with coal and electricity. This crisis led to the formation of the Petroleum Conservation Action Group (1974), which evolved into the Petroleum Conservation Research Association (PCRA) in 1978 to promote petroleum conservation. The Working Group on Energy Policy (1977) proposed reducing oil dependence, increasing energy efficiency, encouraging renewable energy like hydropower, and reducing energy demand. Their findings guided energy planning in the sixth Five-Year Plan (1980–1985).

During the 1980s, efforts intensified to reduce reliance on energy imports, with the Advisory Board on Energy (1983) providing detailed demand forecasts and evaluating energy strategy options. However, the economy's protectionist policies until the 1990s limited private sector and international involvement. The economic reforms of 1991, triggered by a financial crisis, deregulated sectors, including energy, opening them to foreign investments. By the late 1990s, energy conservation gained prominence. The Energy Conservation Act was proposed, with a focus on using renewable energy and conserving natural resources to ensure sustainable growth.

The Five-Year Plans continued prioritizing energy efficiency. The eleventh plan emphasized energy-efficient measures for agricultural pumps, while the twelfth plan recommended comprehensive programs for energy audits, training, and subsidized implementation. Awareness initiatives like the Oil Conservation Week (1991), later expanded to a fortnight in 1997, raised public consciousness. The government institutionalized National Energy Conservation Day (14 December) and established awards to recognize organizations contributing to energy efficiency. These efforts underscore India's transition from focusing solely on energy supply to adopting a holistic approach that includes conservation and sustainability.

4 Latest Policies and Institutions of Energy Efficiency

1. India Hydrocarbon Vision: 2025

Oil and natural gas play a vital role in the economic growth of the country. Thus, it is necessary to have a long-term policy for the hydrocarbon sector, which would facilitate meeting the country's future energy needs. The India Hydrocarbon Vision: 2025 lays down the framework, which would guide the policies

relating the sector for the 25 years that it was declared in 2000 with the following objectives:

- (a) To assure energy security by achieving self-reliance through increased indigenous production and investment in equity oil abroad
- (b) To enhance the quality of life by progressively improving product standards to ensure a cleaner and greener India
- (c) To develop the hydrocarbon sector as a globally competitive industry which could be benchmarked against the best in the world through technology upgradation and capacity building in all facets of industry
- (d) To ensure oil security for the country keeping in view strategic and defense considerations (India Hydrocarbon Vision: 2025 Document, 2000)

2. The Energy Conservation Act 2001

In February 2000, the Energy Conservation Bill was introduced in Parliament and The Energy Conservation Act (EC Act) was published in the Gazette of India in October 2001 (and effective from 1 March 2002) and is known as the Energy Conservation Act 2001. In 2002, the Energy Management Centre was reinstated as the *Bureau of Energy Efficiency (BEE)*. The key objectives of the Act are:

- To provide a policy framework and direction to the national energy conservation activities
- To coordinate policies and programs on efficient use of energy with the stakeholders
- To establish systems and procedures to verify, measure, and monitor energy efficiency improvements
- To leverage multilateral, bilateral, and private sector support to implement the Act
- To demonstrate energy-efficient delivery systems through public-private partnerships

The Energy Conservation Act lays down clear action plans and envisages the establishment of a specific organization to convert these plans into reality through various regulatory and promotional interventions. The thrust areas identified for the implementation of the Act are

- (a) Indian Industry Program for Energy Conservation
- (b) Demand Side Management
- (c) Standards and Labeling Program for notified equipment and appliances
- (d) Energy Efficiency in Buildings and Establishments
- (e) Energy Conservation Building Codes
- (f) Professional Certification and Accreditation
- (g) Manuals and Codes
- (h) Energy Efficiency Policy Research Program
- (i) School Education
- (j) Delivery Mechanisms for Energy Efficiency Services

The Bureau of Energy Efficiency has a mission to institutionalize energy efficiency, to set up a delivery mechanism for energy efficiency services, and to provide leadership to implement a nationwide energy efficiency program, with a thrust on self-regulation and market principles and with the primary objective of reducing energy intensity of the Indian economy (The Energy Conservation Act 2001)

3. The Electricity Act 2003

The Electricity Act 2003 was enacted to harmonize and rationalize provisions of existing laws and to reform legislation by promoting efficient and environmentally benign policies. The Act mandates efficiency in various forms in generation, transmission, and distribution. Under the provisions of Section 3(1) of the Act, the Central Government brought out the National Electricity Policy for the development of the country's power system based on optimal utilization of resources. The policy emphasizes higher efficiency levels of generating plants, stringent measures against electricity theft, energy conservation measures, and boosting

renewable and nonconventional energy sources. The Act recognized the requirement of introducing newer concepts like power trading, open access, Appellate Tribunal, etc. and also emphasized special provision for rural areas (The Electricity Act 2003)

4. Integrated Energy Policy

The Integrated Energy Policy aims to bridge the prevailing gap in the demand and supply of energy in short-, medium-, and long-term perspective. Recognizing the role of both private and public sector participation in meeting the energy needs of the country, the policy strikes a right balance by stating that “wherever possible energy market should be competitive. However, competition alone has been shown to have its limitation in a number of areas of the energy sector and independent regulation becomes even more critical in such instances.” The approach of Integrated Energy Policy is summarized below

- Till market matures in independent regulation across the energy streams is a necessity
- Pricing a resource allocation to be determined by market forces under an effective and credible regulatory oversight
- Transparent and targeted subsidies
- Improved efficiencies across the chain
- Policies that reflect externalities of energy consumption
- Incentives/disincentives to regulate market and consumer behavior
- Management reforms to foster accountability and incentives for efficiency

The broad vision behind the Energy Policy is to reliably meet the demand for energy services of all sectors at competitive prices. The policy ensures India’s energy security that at its broadest level and in primarily about ensuring the continuous availability of commercial energy at competitive prices to support its economic growth and meet the lifeline energy needs of its households with safe, clean, and convenient forms of energy even if that entails directed subsidies. Meeting this policy vision India pursues all available fuel options and forms of energy, both conventional and nonconventional. The policy also emphasizes to seek to expand its energy resource base and seek new and emerging energy sources and consider very important that to pursue technologies that maximize energy efficiency, demand side management, and conservation (GOI 2006).

Along with electricity demand, India’s oil requirement is also growing rapidly. Today, India consumes about 3–6 million barrels of oil per day. The nation’s crude oil imports are projected to reach five million barrels per day in 2020, which is more than 60 % of Saudi Arabian oil production currently. Power generation, industrial fuel, transport, fertilizers, and petro-chemicals firms are some of the major consumers of petroleum products. The government has initiated various steps to promote conservation of petroleum products in the transport, industrial, agriculture, and domestic sectors. Adoption of measures and practices which are conducive to increase fuel efficiency and training programs in the transport sector is one of them. Modernization of boilers, furnaces, and other oil-operated equipment with efficient ones and promotion of fuel-efficient practices and equipment in the industrial sector and standardization of fuel-efficient irrigation pump sets and rectification of existing pump sets to make them more energy efficient in the agricultural sector are also adopted by the government. Development and promotion of the use of fuel-efficient equipment and appliances like kerosene and LPG stoves in the household sector are other initiatives on the side of government.

The Working Group for the eleventh Plan (2007–2012) suggested an outlay of about USD 1.4 billion for energy conservation measures, but this is minuscule in relation to the budget for other elements of the power sector. One of the objectives of the eleventh plan is to reduce the energy intensity per unit of greenhouse gas (GHG) by 20 % from the period 2007–2008 to 2016–2017. India’s objectives for GHG emission reduction were formally addressed when the Government of India launched the National Action Plan for Climate Change (NAPCC) in mid-2010. The NAPCC relies on eight missions where the National Mission for Enhanced Energy Efficiency (NMEEE) is a critical one. NMEEE aims to boost the programs under the EC Act through four major initiatives:

- (a) Perform, Achieve and Trade (PAT) scheme, designed as a market-based mechanism to enhance efficiency in DCs (energy-intensive industries and facilities as specified by BEE) by setting goals, reducing

energy intensity, and allowing those who exceed goals to receive energy permits that can be traded with other DCs

- (b) Market Transformation on Energy (MTEE), which envisages an active shift to energy-efficient appliances and machinery in designated sectors through innovative measures
- (c) Financing mechanisms to help finance Demand Side Management (DSM) programs
- (d) Enhancing of energy efficiency in power plants

Since the enactment of the Energy Conservation Act 2001, the decade saw various policy initiatives for mobilizing public and private enterprises towards EE. The BEE was formed, under the Ministry of Power, as a vehicle for deploying the recommendations of the Energy Conservation Act. The BEE is also the legal entity for executing the initiatives under NMEEE and engages in public-private partnership in implementing various EE programs under it. The EE policy endorsements through the Electricity Act 2003 and NMEEE reinforce BEE's role as the central agency for developing and establishing systems and procedures necessary for achieving India's overarching energy efficiency goals. Since India is a quasi-federal polity, the planning process in the energy sector at the national level is very complex, and the national plan is an amalgam of central and state plans. The institutional structure of the energy efficiency sector in India is given in Fig. 4.

5 Schemes for Promoting Energy Efficiency in India

India heavily relies on conventional energy sources such as thermal, hydro, and nuclear power for electricity generation. These resources, such as oil and coal, are valuable but take millions of years to form, making them exhaustible. Due to their limited availability, energy prices may rise over time, reflecting the cost of exploration and scarcity. It is essential to use these resources optimally to ensure their long-term availability.

Improving energy efficiency not only reduces energy consumption per unit of production but also enhances the country's energy security by ensuring sustainable access to resources at affordable prices. To promote energy efficiency and conservation, the Ministry of Power, through the Bureau of Energy Efficiency (BEE), has initiated several schemes.

Energy Efficiency Initiatives in India

1. Bachat Lamp Yojana (BLY)

- This program focuses on replacing incandescent bulbs with energy-efficient CFLs in households.
- CFLs are provided at prices comparable to incandescent bulbs.
- The scheme leverages the Clean Development Mechanism (CDM) under the Kyoto Protocol to recover the cost difference.

2. Standards and Labeling Program

- Introduced under the Energy Conservation Act, 2001, this program ensures energy efficiency labeling for appliances.
- Key features include:
 - **Labels on Appliances:** Mandatory display of energy efficiency labels on specified products.
 - **Minimum Efficiency Standards:** Prohibition on the sale and manufacture of products not meeting minimum standards.
- The STAR rating system (1–5 stars) helps consumers make informed decisions by providing clarity on energy efficiency.

3. Energy Conservation Building Code (ECBC)

- Launched in 2007, ECBC sets minimum energy standards for new commercial buildings

with a connected load of 100 kW or contract demand of 120 kVA.

- It considers India's climatic zones (hot and dry, warm and humid, composite, temperate, and cold) and provides tailored energy performance norms.

4. Agricultural and Municipal DSM Scheme

- Focuses on improving energy efficiency in agricultural pumping and municipal services.
- Encourages public-private partnerships (PPPs) to implement market-based energy efficiency projects.

5. State Designated Agencies (SDAs)

- Established under the Energy Conservation Act, SDAs are responsible for implementing energy conservation measures at the state level.

- SDAs play three primary roles:

- **Development Agency:** Promoting energy efficiency programs.
- **Facilitator:** Supporting stakeholders in adopting energy conservation measures.
- **Regulator:** Enforcing energy conservation laws and standards.

6. Energy Efficiency in Small and Medium Enterprises (SMEs)

- SMEs in sectors like foundries, brass, textiles, ceramics, and dairy have significant energy-saving potential.
- BEE has initiated studies in 25 SME clusters to develop energy efficiency manuals.
- These manuals include best practices, energy-saving technologies, and case studies to guide SMEs in reducing energy consumption.

7. State Energy Conservation Fund (SECF)

- A statutory requirement under Section 16 of the Energy Conservation Act, 2001, SECF is a key element of the Energy Conservation Action Plan (ECAP).
- The fund supports training programs and fee-based activities to enhance the capacity of SDAs.
- During the XI Five-Year Plan, Rs. 70 crores were allocated for SECF contributions between 2009 and 2012.

6.1 Key Challenges in Securing Energy Efficiency Targets in India

India is a developing economy with a large agricultural base and a growing industrial infrastructure. The country is facing the critical challenge of meeting a rapidly increasing demand for energy. India's economy is projected to grow 7–8 % over the next two decades and in its wake will be substantially increased in demand for oil to fuel land, sea, and air transportation (Sambamurti 1984; Bastia 2006). At present energy efficiency has been stated as a policy objective of most of the governments and it has become an integral part of the India's energy planning strategies. As in the case of any developing country, there are so many challenges to attain the energy efficiency targets to India. According to the Bureau of Energy Efficiency of India, nation's energy efficiency is the fifth lowest in the world. But there is a room for substantial energy savings. The industrial sector consumes about half of the total commercial energy available in India and 70 % of this by energy-intensive sectors like fertilizers, aluminum, textiles, cement and iron steel, and paper and 15–25 % of this is avoidable. One of the major challenges with regard to energy efficiency is that the energy-efficient technologies are often come at increased cost as to compare to their traditional counterparts. This leads the consumers to abstain from or unable to pay the premium for efficiency despite its long-term benefits. The distortion of the price included in subsidized pricing of energy (including that of electricity), particularly for agriculture. Low prices provide fewer incentives for people to regulate and/or reduce consumption. This also adds to the financial burden on the country's exchequer. The recent decontrol of petrol is, therefore, a step in the right direction. While lack of information was a barrier in the early years, the government's effective use

of mass media, including the print and electronic media, has somewhat widened the reach of the energy efficiency message. However, these changes have benefited urban and semi-urban regions much more than others. Rural areas struggle with energy conservation issues in the agrarian sectors because of inefficient practices partially driven by an unreliable power supply. Nontechnical losses like energy theft have continued to be a concern. While small conservation projects in homes require little or no financial investment, such initiatives in the industrial, building, and other sectors usually require some investment due to the scale and nature of the related activities. There is a range of financial programs available at the central and state levels. While it is premature to comment on their effectiveness, there is a concern that information on these are not easily available to those who can benefit from it. Improving energy efficiency requires a comprehensive, long-term approach. There is a need for stable policy framework to encourage investment in the manufacturing and distribution of energy-efficient products and for consumers to develop the necessary confidence to deploy such products.

6 Conclusion

Conventional energy resources use which are based on oil, coal, and natural gas are undoubtedly catalyzing the economic progress, but it is too potentially damaging to the environment and human life and a key challenge to climate change. The potential of renewable energy sources is vast as they can meet many times the world's energy demand. The renewable energy resources such as biomass, wind,

solar, hydropower, and geothermal energy can provide sustainable energy for the world. It is now imperative to consider that future energy scenario is primarily based on renewable energy and other energy-efficient technologies. The task of meeting the growing energy demand of India's development process is enormous. India is probably the only country fully fledged ministry dedicated to the energy production from renewable energy sources. India is emerging as a growing market for solar, wind, and hydroelectric power. India ranks fifth in the global wind energy production. The significant developments of the energy sector in the last five decades shows that India is running along with her counterparts of the world for realizing energy efficiency. A huge financial investment especially for energy efficiency initiatives is the need of the hour. India is moving ahead and in forefront of all developing nations. The CDM activities are also important to sustain the energy security. The new era of energy efficiency initiatives of India will play a vital role in the nation's target to be energy secured. The study shows that India is on a path of sustainable development along with all other developing nations, and these efforts not only contribute to the energy security of India but to a large extent to all set to play a pivotal role in global energy security also.

References

- Sivani Dhanalekshmy (2013) research paper The Energy Efficiency Policy Initiatives and Energy Security: Experiences from India
- Andrew S (2010) The hidden energy crisis: how policies are failing the poor. In its foreword authored by Teodoro Sanchez. Practical Action, Rugby
- Bastia R (2006) Energy source material mix for India in the coming years. CNF year book, Navachethan, New Delhi
- BP Statistical Review on World primary Energy Consumption (2011) Available at <http://www.bp.com>. Accessed 2/6/2012
- BP Energy Outlook 2030 (2011) London. Available at <http://www.bp.com>. Accessed 3/6/2012
- Brown MH, Rewey C, Gangliano T (2003) Energy security. National conference of state Legislatures, Washington, DC
- Commission of the European Communities (2011) Energy 2020-A strategy for competitive, sustainable and secure energy. Office of the European Union, Luxemburg
- Dey D (2007) Energy efficiency initiatives: Indian experience. Available at [http://www.helio-international.org/resources/Current Workings](http://www.helio-international.org/resources/Current%20Workings). Accessed 2/2/2012
- Earnst, Young (2012) Synergy for energy: developing a robust natural gas market in India. Worldpetro coal

congress-2012, New Delhi

Fouquet R (2008) Heat, Power and Light: Revolutions in Energy services. Edward Elgar, Cheltenham

Fouquet R (2009) A Brief History of Energy. In: Joanne E, Hunt LC (eds) International Handbook on the Economics of Energy. Edward Elgar, Cheltenham

GNSSED (2010) Achieving energy security in developing countries, policy brief. TERI – The Energy and Resources Institute, New Delhi

GOI (1965) Report of the energy survey of India committee. Planning Commission, Government of India, New Delhi

GOI (1974) Report of fuel policy committee. Planning Commission, Government of India, New Delhi

GOI (1979) Report of Working Group on Energy Policy. Planning Commission, Government of India, New Delhi

GOI (1983) Report of Planning Group. Planning Commission, New Delhi

GOI (1984) Report of Inter Ministerial Working Group. Planning Commission, New Delhi
GOI (1997) Report of Planning Commission. Planning Commission, New Delhi

GOI (2001) The Energy Conservation Act, 2001. Government of India, New Delhi
GOI (2003) The Electricity Act 2003. Government of India, New Delhi

GOI (2006) The Integrated Energy policy of India 2006. Planning Commission, New Delhi
GOI (2011) Report of planning commission. New Delhi

Golove WH, Eto JH (1996) Market barriers to energy efficiency: a critical reappraisal of the rationale for public policies to promote energy efficiency. <http://eande.lbl.gov/EA/EMP/reports/pslx38059.pdf>. Accessed July

Hedley D (1986) World energy: the facts and the future. Euromonitor, London

ICLEI South Asia (2007) Renewable energy and energy efficiency status in India. A report compiled by ICLEI South Asia, New Delhi

IIEC (2004) A white paper on energy efficiency policies. Available at http://www.iiec.org/index.php?option=com_docman&task=doc.view. Accessed 2/2/2012.

India Hydro Carbon Vision: 2025 (2000) Planning Commission, New Delhi

International Chamber of Commerce (2007) Energy efficiency: a world business perspective.

Prepared by the commission on environment and energy, Paris International Energy Association (2010) Energy efficiency governance. Available at www.iea.org/efficiency. Accessed 28 May 2012

International Energy Association (2011) World energy outlook. Available at <http://www.scribd.com/doc/72512781/World-Energy-Outlook-2011>

Janssen R (2010) Harmonizing energy efficiency requirements- building foundations for cooperative action. International Centre for Trade and Sustainable Development, Issue paper no.14, Geneva, Switzerland

Jupp P (2006) The governing of Britain 1688–1848. Routledge, London

Martinot E, McDoom O (2000) Promoting energy efficiency and renewable energy: GEF climate change projects and impacts. Global Environmental Facility. Available at http://www.martinot.info/Martinot_McDoom_GEF.pdf

Mercados EMI (2010) Preparing a roadmap for implementing energy efficiency portfolio obligation in India. Mercados Energy Market India, New Delhi

Pacuadan R, Guzman E (2002) Impact of energy efficiency policy to productive efficiency of electricity distribution industry in the Philippines. Energy Econ 24(1):41–54

Ramachandra TV (1999) Domestic energy consumption pattern in Uttara Kannada District, Karnataka state,

India. Centre for Ecological Sciences, Indian Institute, Bangalore

Ramachandra TV (2009) RIEP: Regional integrated energy plan. *Renew Sustain Energy Rev* 13:285–317. doi:10.1016/j.rser.2007.10.004

Reddy S, Balachandra P (2003) Integrated energy-environment policy analysis. *Util Policy* 11 (2):59–73

Reddy S, Assenza GB, Assenza D, Hasselmann F (2009) Energy efficiency and climate change: conserving power for a sustainable future. Sage, New Delhi

Sambamurti MK (1984) Energy planning in developing countries, Division of natural resources on energy, Technical co-operation for development. UN, Oxford University Press, Oxford

Singh B (2010) India's energy security: the changing dynamics. Pentagon Energy, New Delhi UN (2011) Guidelines for strengthening energy efficiency planning and management in Asia and

the Pacific. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, United Nations Vasudevan R, Cherail K, Bhatia R, Jayaram N (2011) Energy efficiency in India: history and

overview. Alliance for an energy efficient economy, New Delhi Willrich M (1975) Energy and world politics. Free, New York

Winzer C (2011) Conceptualizing energy security. EPRG working paper1124, Cambridge World Coal Association (2012) Coal Energy for Sustainable development. A publication of World coal association, London

Yergin D (2006) Ensuring energy security. Available at http://www.un.org/ga/61/second/danielyergin_energyscuritypdf. Accessed 22 May 2012

**COMPARISON OF COP IN MARITIME APPLICATIONS USING MODERN REFRIGERANTS****Semih YILMAZ**

Lec. Dr., Dokuz Eylul University, Faculty of Maritime, Department of Marine Engineering, İzmir-Türkiye

(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-0791-4476

Kubilay BAYRAMOĞLU

Asst. Prof., Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zonguldak-Türkiye

ORCID: 0000-0002-5838-6132

M. Turhan ÇOBAN

Prof. Dr., Piri Reis University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Istanbul-Türkiye

ORCID: 0000-0003-1873-2640

Abstract

Seagoing ships and offshore facilities utilize marine and maritime refrigeration systems, which typically consist of refrigerated containers, cargo hold refrigeration, and domestic refrigeration services like cruise ships. The International Maritime Organization treaty MARPOL, in annex VI, forbids the usage of refrigerants that harm the ozone layer in maritime applications. The organization's upcoming environmental laws require all parties involved from the crew to the ship owner to utilize modern refrigerants. R1234yf, R1234ze (E), R1234ze (Z) and R1234zd (E) are the modern refrigerants that replace R407f, R404A, etc. These refrigerants have low global warming potential compared to the conventional ones in service. Modern refrigerants used in the marine industry are analyzed analytically regarding their COP performance. In the analysis, seawater was connected through the condenser circuit to cool the refrigerant through heat transfer on the refrigeration cycle. Parametric analyses were performed on the cooling system at different temperatures using new-generation refrigerants. The comparisons take into account COP, safety, and environmental impact. The results show that R1234ze (Z) refrigerant achieved good performance in terms of COP among the others. The excessive increase in the seawater temperature supplied to the system caused a decrease of up to 50% in COP performance. It has been observed that modern refrigerants are environmentally beneficial but with a slight decrease in COP performance.

Keywords: Marine refrigerants, COP, Refrigeration, Low GWP refrigerant**Introduction**

Climate change, to which the transportation sector also contributes, has become one of the most important challenges of our time. If the world's energy production and consumption continue at the same rate, global warming is expected to cause a temperature increase of 1.5 °C until 2050 (Ravindran, Cotter, Wilson, Jun Huang, & Hewitt, 2024). If the measures to be taken in the short term are not sufficient, it is predicted that the global surface temperature may exceed 4 °C by 2100. To overcome this situation, some countries have agreed on measures to keep the temperature at 2 °C. Although the maritime sector is only responsible for about 2.9% of the world's CO₂ emissions, it is taking measures through the International Maritime Organization (IMO). (Mastrullo, Mauro, Napoli, & Viscito, 2024). The IMO treaty MARPOL, in annex VI, forbids the usage of refrigerants that harm the ozone layer in maritime applications. The organization's upcoming environmental laws require all parties involved from the crew to the ship owner to utilize modern refrigerants (Bayramoğlu, 2024; Yalama, Khmelniuk, Yakovleva, & Trandafilov, 2022). Through state-defined environmental laws, restrictions have been imposed on the use of refrigerants in order to reduce the impact caused by their emissions in the atmosphere. The first objective is to reduce the use of refrigerants that cause ozone depletion (Molina & Rowland, 1974). The Montreal Protocol (U.N., 1987) was the first agreement for the reduction of chlorofluorocarbons (CFCs) and hydro chlorofluorocarbons (HCHCs) and later the United Nations

Environment Programme (UNEP) (U.N., 2000). Many amendments were applied EU F-gas regulations on HCFCs due to their higher global warming potential (GWP) (Fedele, Lombardo, Greselin, Menegazzo, & Bobbo, 2023; Koskelainen, 2016). In industrialized countries, the usage of CFCs has been disallowed since 1997, and starting in 2020, the utilization of HCFCs will also be prohibited (Pigani, Boscolo, & Pagan, 2016).

In recent years, the replacement of refrigerants with more environmentally friendly fluids has been brought to the agenda. For this purpose, 4th Generation refrigerants are emphasized. In the medium-long term, all refrigerants should be replaced with low GWP (<150) or natural refrigerants (ammonia, CO₂, synthetic, etc.). However, natural refrigerants have negative properties such as toxicity, flammability and are not suitable for every process, making them difficult to be utilized. Figure 1 shows the GWP values of refrigerants that are frequently used in the maritime industry, separated according to their safety classes (Fedele et al., 2023; McLinden, Kazakov, Steven Brown, & Domanski, 2014).

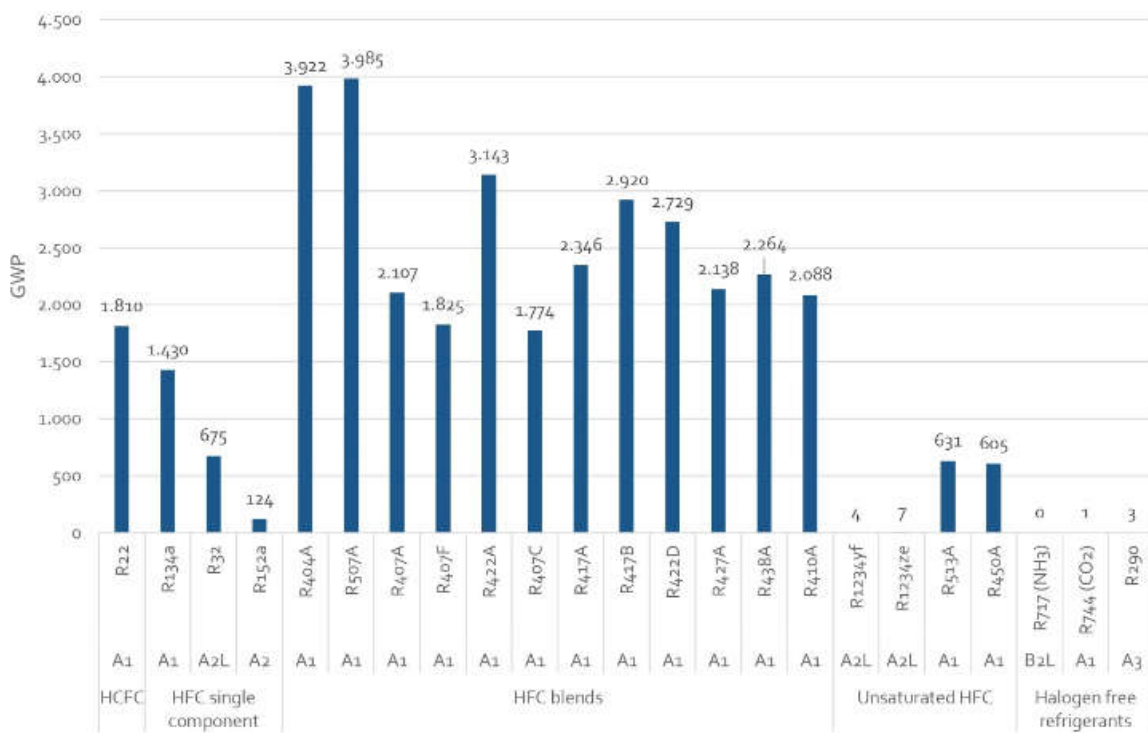


Figure 1. GWP values of the refrigerants (Hafner, Gabrieli, & Widell, 2019)

There are detailed studies on refrigerants in the refrigeration industry (Bobbo et al., 2018). However, despite the widespread use of refrigerants in the maritime industry, the number of studies in literature is insufficient. The studies on maritime applications and low GWP refrigerants can be given as follows. Hafner et al. (2019) published a comprehensive report on refrigeration equipment and refrigerants for the maritime industry. Natural and commercial working fluids were investigated on marine vessels including fishing ships. The report emphasize deeply on substitute refrigerants such as natural working fluids, saturated and unsaturated HFCs (Hafner et al., 2019). Bobbo e al. (2018) gave an comprehensive review of publicly available literature to show replacement possibilities of higher GWP refrigerants in refrigeration, heating, ventilation and air conditioning (HVAC&R) applications. GWP, flammability, energy efficiency and toxicity were taken as determination criteria. Also thermophysical properties were given in detail (Bobbo, Nicola, Zilio, Brown, & Fedele, 2018). Yataganbaba et al. (2015) applied an exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a substitutes in a vapor compression refrigeration cycle. R1234yf and R1234ze were shown as a good alternative to conventional R-134a refrigerant concerning environmental aspects (Yataganbaba, Kilicarslan, & Kurtbaş, 2015). Turgut et al. (2019) made comparisons of cascade refrigeration systems using R744/R717, R744/R134a, and R744/R1234yf working fluids with performance analysis. R744/R1234yf system were given as most promising alternative to other working fluids (Turgut & Turgut, 2019). Yalama et al. (2022) showed an

alternative refrigeration solution to maritime transport with modern refrigerants. General refrigeration system was modified for process modelling. COP, energy and exergy analyses were implemented for optimal working conditions (Yalama et al., 2022). Piganit et al. (2016) evaluated refrigerants with lower GWP values to diminish environmental impacts on passenger ships. NH₃, CO₂, R1234yf and R1234ze(E) were compared to current R407f commercial working fluid (Pigani et al., 2016). Fedele et al. (2023) maintained a detailed review for updated thermophysical properties of low GWP working fluids. The paper provided a special effort on transport and thermophysical properties of R1234yf, R1234ze(E), R1233zd(E), R1243zf refrigerants in detail (Fedele et al., 2023).

Unfortunately, the use of low GWP refrigerants is not mandated in current marine industry practice. Only a few maritime class organizations have mentioned the need to limit GWP values to below 2000 (Pigani et al., 2016). Although many studies have mentioned the use of refrigerants for marine applications, in this study, the COP performances of the working fluids are compared by developed codes for the refrigeration cycle in a marine system.

Methodology

In the study, a simple marine refrigeration cycle is considered for the comparison of the modern refrigerants. The evaporator, condenser, compressor, and expansion valve are the four parts of a simple refrigeration cycle. The diagram of the refrigeration cycle is shown in Figure 2.

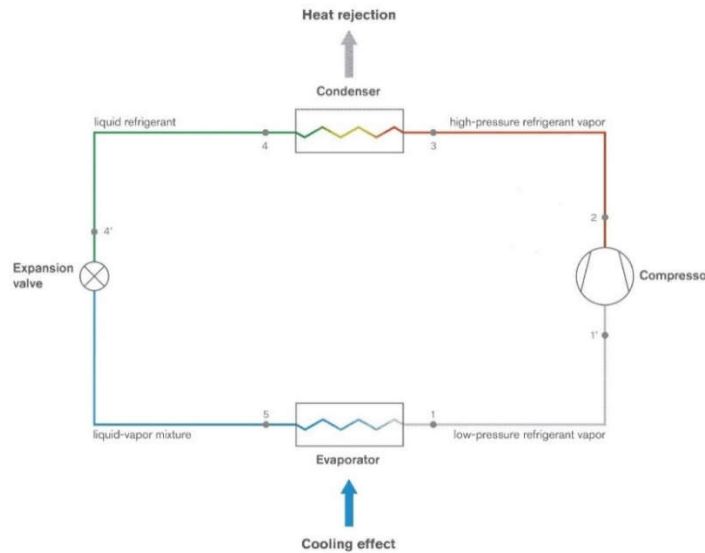


Figure 2. Basic marine refrigeration cycle

After absorbing and evaporating the heat from the evaporator, the refrigerant is compressed in the compressor, increasing the gas's temperature and pressure both directly and indirectly. The condenser then releases the extra heat, and the expansion valve lowers the refrigerant pressure to the condenser inlet pressure level (Turgut & Çoban, 2018). Primarily, the essential equations for the ideal vapor compression refrigeration cycle are defined for compressor (W_{comp}), condenser (Q_{cond}), evaporator (Q_{evap}) and expansion valve (h_{exp}) in the Eq. (1) to Eq. (4). The COP of evaporator (COP_e) and COP of condenser (COP_c) are obtained from Eq. (5) and Eq. (6).

$$W_{comp} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_3 - h_4) \quad (2)$$

$$h_{exp} = h_{4f} = h_5 \quad (3)$$

$$Q_{evap} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_1 - h_5) \quad (4)$$

$$COP_e = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} \quad (5)$$

$$COP_c = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} \quad (6)$$

Then, computer programs are developed using the Java programming language to assess the thermodynamic properties of refrigerants using an open source thermodynamic database (CoolProp) (Bell, Wronski, Quoilin, & Lemort, 2014) and ASHRAE thermodynamics database (Stewart, Jacobsen, & Penoncello, 2005). The program contains codes obtaining thermodynamic properties from the database as refrigerant property calculator program, cycle calculator as refrigerant cycle program (Atalay & Coban, 2015). The general flow diagram of the computer programs is shown in Figure 3.

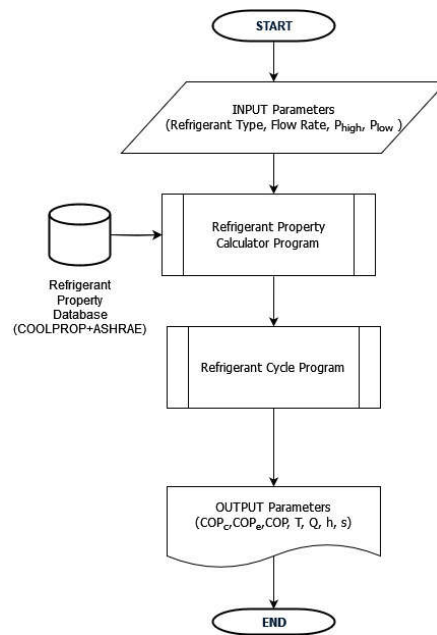


Figure 3. The flow diagram of the computer programs

Temperature, pressure, enthalpy, entropy, internal energy, density, specific volume, and the purity of pure refrigerants were all considered thermodynamic qualities. Any two pairs of known thermodynamic characteristics should be able to be used as input parameters by computer simulation programs. In order to find solutions for various thermodynamic input pairs, the refrigerant calculator application incorporates sets of root solving techniques.

The analyses are implemented with the refrigerants R1234yf, R1234ze (E), R1234ze (Z), R1233zd (E), R152a and R134a. R134a has been fully replaced by R1234yf in mobile air conditioning. R1234ze(E) can be a good alternative for water chillers, R1234ze(E) for water-to-water heat pumps, and R1233zd (E) for centrifugal chiller systems. R152 is still in use on large chillers and coolers of maritime applications. Table 1 demonstrates technical properties of the refrigerants investigated.

Table 1. Technical properties of the investigated refrigerants (McLinden et al., 2014; Refprop, 2013; Stewart et al., 2005)

ASHRAE Code (ISO 817)	IUPAC name	MM (kg/kmol)	T _{boiling} (K)	GWP
R134a	1,1,1,2-tetrafluoroethane	102.03	246.8	1430
R1234yf	2,3,3,3-tetrafluoropropene	114.04	243.70	4
R1234ze (E)	Trans -1,3,3,3-tetrafluoropropen	114.04	254.18	7
R1234ze (Z)	1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-en	114.04	282.90	1.4
R1233zd (E)	Trans -1-chloro-3,3,3-trifluoro-1-propen	130.50	291.41	7
R152a	1,1-difluoroethane	66.05	248.5	124

Inlet parameters are based on various sea water temperatures to cool down the condenser of the system. According to conventional and literature data (Pigani et al., 2016), the water temperature and condensation temperature difference are considered as a constant value of 15 K. The condenser pressure is calculated according to saturation temperature and evaporator pressure is determined as a constant value. Inlet parameters of the cycles are given in Table 2 with respect to seawater temperature.

Table 2. Inlet parameters of the system cycles

T _{seawater} (°C)	Condenser T _{sat} (°C)	P _{cond} (kPa)	P _{evap} (kPa)
18	33	838.8	150
25	40	1016.6	150
32	47	1221.3	150

Results and Discussion

In this study, the COP performances of the refrigerants are compared by developed codes for the refrigeration cycle in a marine refrigeration system plant. Analyses are performed on modern marine refrigerants such as R1234yf, R1234ze (E), R1234ze (Z), R1233zd (E) and displaced refrigerants such as R152a and R134a. Table 3 shows the COP performances of the modern refrigerants comparing with displaced refrigerants.

Table 3. Performance results of the refrigerants

Refrigerant type	T _{seawater} (°C)	COP _c	COP _e	COP _{ove}
R1234yf	18	3.46	4.46	3.96
	25	2.81	3.81	3.31
	32	2.27	3.27	2.77
R1234ze (E)	18	4.66	3.66	4.16
	25	3.99	2.99	2.49
	32	3.45	2.45	2.95
R1234ze (Z)	18	4.67	3.67	4.17
	25	3.99	2.99	3.49
	32	3.44	2.44	2.94

R1233zd (E)	18	4.49	3.49	3.99
	25	3.81	2.81	3.31
	32	3.26	2.26	2.76
R152a	18	5.03	4.04	4.5
	25	4.36	3.36	3.86
	32	3.85	2.85	3.35
R134a	18	4.94	3.94	4.44
	25	4.26	3.26	3.76
	32	3.75	2.75	3.25

Figure 4, 5 and 6 show the condenser, evaporator and overall COPs for the investigated refrigerants with respect to the variation on the seawater temperature. For constant seawater temperature conditions, modern refrigerants have shown very good performance. R1234ze (E) seems to have the best performance among the modern refrigerants. R1234yf, on the other hand, performed less well than the others. At a seawater temperature of 18 °C, where the performance is expected to be the best, the COP relative performance difference increased up to 45%.

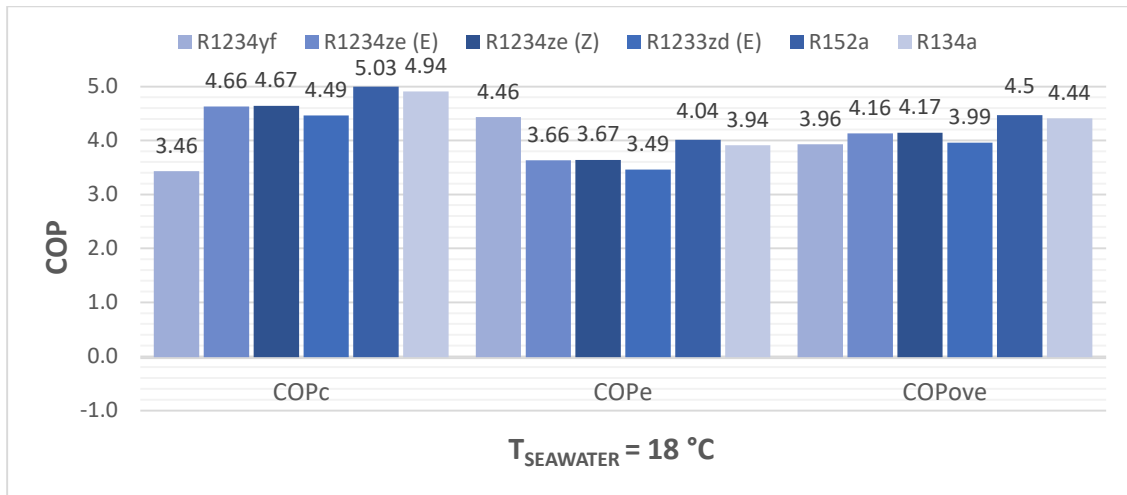


Figure 4. Variation of the COPs according to different refrigerants at T_{seawater} = 18 °C

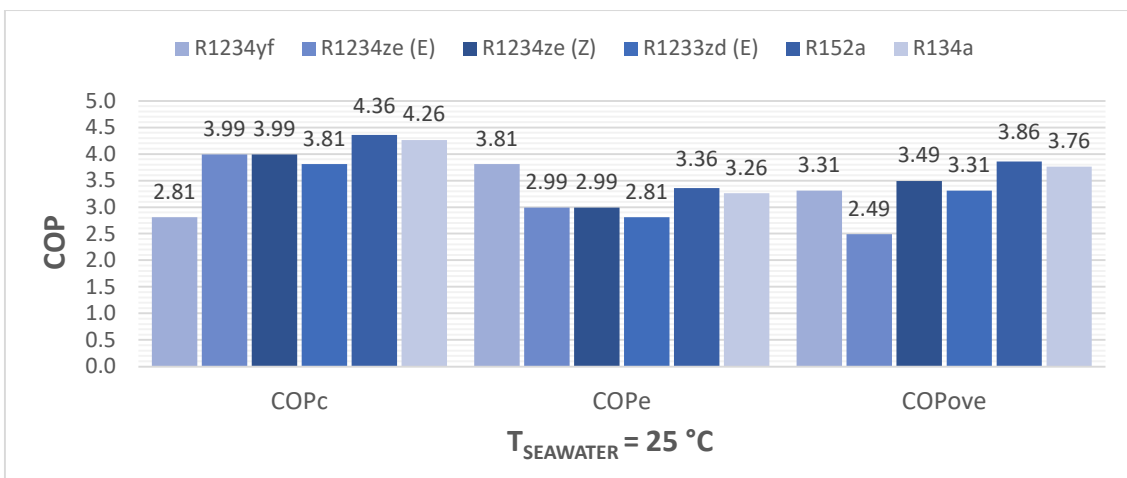


Figure 5. Variation of the COPs according to different refrigerants at T_{seawater} = 25 °C

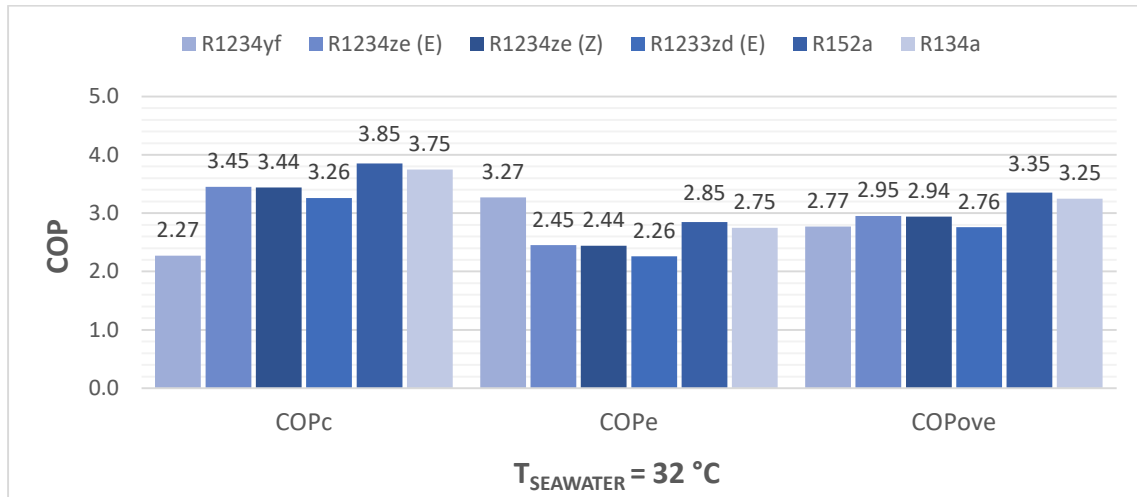


Figure 6. Variation of the COPs according to different refrigerants at $T_{\text{seawater}} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure 7, 8 and 9 demonstrate the condenser, evaporator and overall COPs according to deviation on the seawater temperatures for the modern refrigerants. As can be seen from the graphs, the increase in seawater temperature caused a significant decrease in COP performance. In terms of average COPs, the performance decline is approximately -20.5% when the seawater temperature increased to 25 °C and -27.9% when the seawater temperature increased to 32 °C.

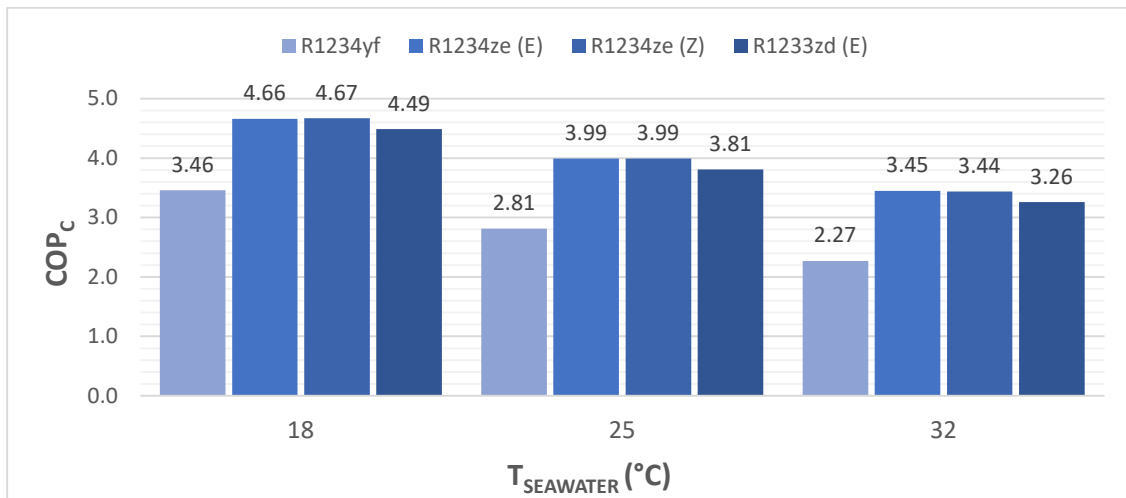


Figure 7. COP_c in relation to the seawater temperature variation

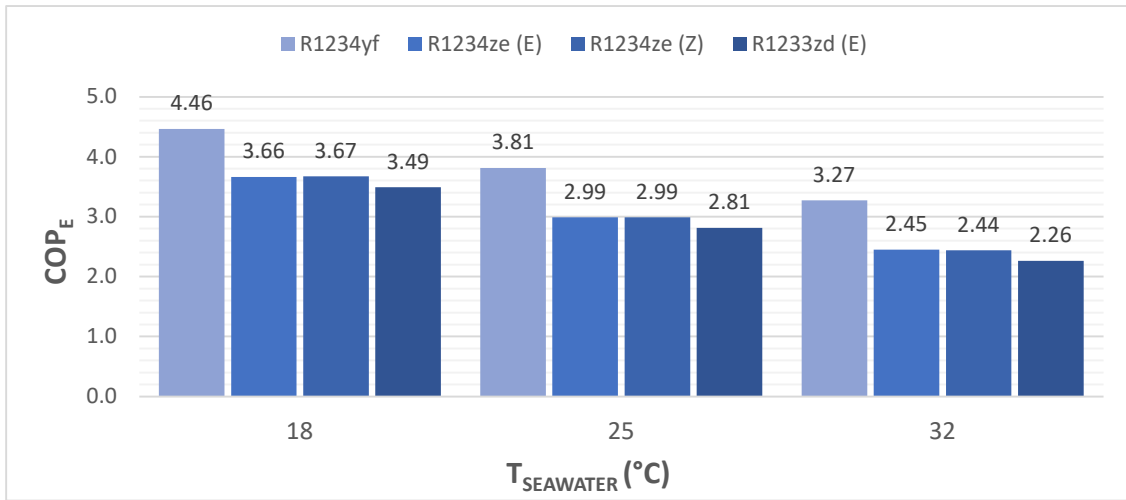


Figure 8. COP_e in relation to the seawater temperature variation

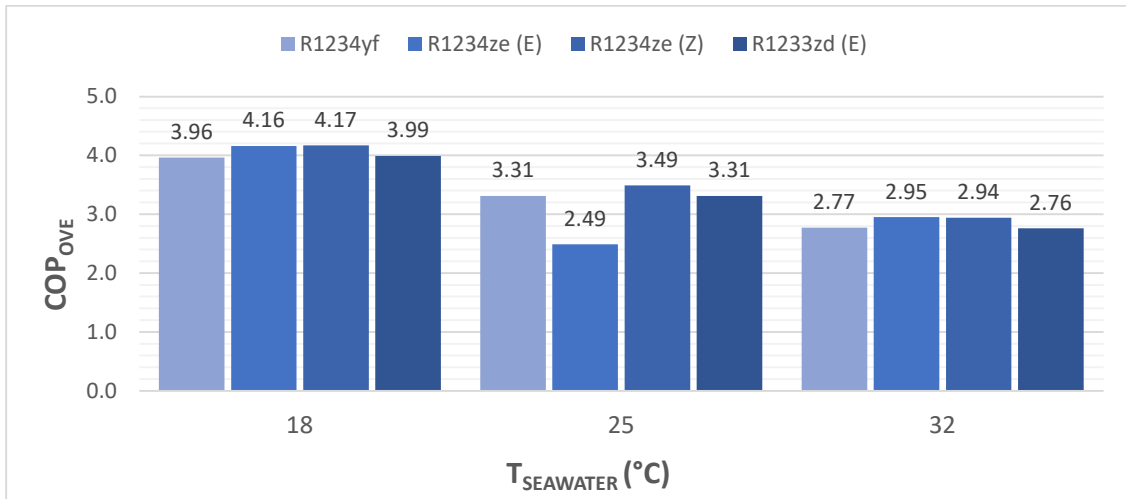


Figure 9. COP_{ove} in relation to the seawater temperature variation

Conclusion and Recommendations

In the study, modern refrigerants are compared in a simple marine refrigeration cycle in terms of COPs. Modern marine refrigerants (R1234yf, R1234ze (E), R1234ze (Z), R1233zd (E)) and displaced refrigerants (R152a and R134a) are employed in the analyses of the study. Theoretical analyses are handled with developed computer codes using the Java programming language. Thermodynamic properties of refrigerants are obtained using an open-source thermodynamic database. Here is a summary of some of the key points that have been discussed thus far:

- Among the current refrigerants, R1234ze (E) appears to perform the best. In contrast, R1234yf did not perform as well as the others.
- The COP relative performance difference rose to 45% at seawater temperatures of 18 °C, where optimal performance is anticipated.
- COP performance significantly declined as ocean temperatures rose.
- When seawater temperature rises to 25 °C, average COPs show a performance loss of about -20.5%, and when seawater temperature rises to 32 °C, the performance decline is -27.9%.

This study has shown that modern refrigerants are promising for the maritime industry. However, there is still a long way to go before these refrigerants can be used in ships. A coordinated work and harmony is required

from ship owners to shipbuilding companies, sector representatives and marine workers. In future studies, additional property prediction methods should be designed and more detailed cycle simulations should be performed in order to draw more precise conclusions about the most promising low-GWP refrigerants and their trade-offs.

References

- Atalay, H., & Coban, M. T. (2015). Modeling of Thermodynamic Properties for Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures by Using the Helmholtz Equation of State and Cubic Spline Curve Fitting Method. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 3(6), 229–251. <https://doi.org/10.13189/ujme.2015.030604>
- Bayramoğlu, K. (2024). Determination of hydrogen production performance with waste exhaust gas in marine diesel engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52(xxxx), 1319–1333. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.339>
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>
- Bobbo, S., Nicola, G. Di, Zilio, C., Brown, J. S., & Fedele, L. (2018). Low GWP halocarbon refrigerants: A review of thermophysical properties. *International Journal of Refrigeration*, 90, 181–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.03.027>
- Fedele, L., Lombardo, G., Greselin, I., Menegazzo, D., & Bobbo, S. (2023). *Thermophysical Properties of Low GWP Refrigerants: An Update. International Journal of Thermophysics* (Vol. 44). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03191-5>
- Hafner, A., Gabriellii, C., & Widell, K. (2019). *Refrigeration units in marine vessels - Alternatives to HCFCs and high GWP HFCs*.
- Koskelainen, M. (2016). Fluorinated gas regulations-changes and impact on the RAC equipment.
- Mastrullo, R., Mauro, A. W., Napoli, G., & Viscito, L. (2024). Thermo-economic optimization and environmental analysis of a waste heat driven multi-ejector chiller for maritime applications. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54(January), 104081. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104081>
- McLinden, M. O., Kazakov, A. F., Steven Brown, J., & Domanski, P. A. (2014). A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 38(1), 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.032>
- Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810–812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>
- Pigani, L., Boscolo, M., & Pagan, N. (2016). Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact. *International Journal of Refrigeration*, 64, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.01.016>
- Ravindran, R. V., Cotter, D., Wilson, C., Jun Huang, M., & Hewitt, N. J. (2024). Experimental investigation of a small-scale reversible high-temperature heat pump – organic Rankine cycle system for industrial waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 257(PA), 124237. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124237>
- Refprop, N. (2013). Reference fluid thermodynamic and transport properties. *NIST Reference Database. Version, 9*.
- Stewart, R. B., Jacobsen, R. T., & Penoncello, S. G. (2005). *Thermodynamic properties of refrigerants*. ASHRAE.
- Turgut, M. S., & Çoban, M. T. (2018). Dynamic Performance Comparison Of R134a and R1234yf Refrigerants for a Vapor Compression Refrigeration Cycle. *Hittite Journal of Science & Engineering*, 5(Special), 9–14. <https://doi.org/10.17350/hjse19030000114>

- Turgut, M. S., & Turgut, O. E. (2019). Comparative investigation and multi objective design optimization of R744/R717, R744/R134a and R744/R1234yf cascade refrigeration systems. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 55(2), 445–465. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2435-y>
- U.N. (1987). Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. *Washington, DC: US Government Printing Office*, 26, 128–136.
- U.N. (2000). The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. *United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya*.
- Yalama, V., Khmelniuk, M., Yakovleva, O., & Trandafilov, V. (2022). Modern refrigeration solutions for maritime sector and marine refrigeration transport. *Refrigeration Engineering and Technology*, 58(4), 184–194. <https://doi.org/10.15673/ret.v58i4.2568>
- Yataganbaba, A., Kilicarslan, A., & Kurtbaş, I. (2015). Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 60, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.010>

**THE IMPACT OF WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM OF A SHIP TO EEXI****Kubilay BAYRAMOĞLU**

Asst. Prof., Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering,
Zonguldak-Türkiye

ORCID: 0000-0002-5838-6132

Semih YILMAZ

Lec. Dr., Dokuz Eylul University, Faculty of Maritime, Department of Marine Engineering, İzmir-Türkiye

(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-0791-4476

Abstract

Various methods are used to reduce CO₂ emissions from ships. These methods generally use alternative low carbon fuel, ship form optimisation, aftertreatment systems and heat recovery systems. Heat recovery systems are one of the least costly and most effective methods of using the available energy. Waste heat recovery systems are based on the principle of integrating the used diesel engine exhaust gas with a diesel engine. In this study, the waste heat recovery potentials for variable turbine inlet pressure conditions and different working fluids were investigated parametrically. The effect of the power obtained from the study on the ship EEXI is compared for each parameter. With the power obtained, the total fuel consumption of the ship and the related CO₂ emissions for the unit load-carrying situation are reduced. The parametric studies in this study were carried out with open-source CoolProp software. As a result of the study, the maximum turbine power for 2 MPa, 2.4 MPa, 2.8 MPa, 3.2 MPa and 3.6 MPa, turbine inlet conditions were determined as 1.26 MW, 1.31 MW, 1.36 MW, 1.4 MW and 1.43 MW, respectively for R410a refrigerant fluid. In addition, the maximum reduction of EEXI value was determined as R410a working fluid. Thus, the study will evaluate the potential of reducing carbon emissions with waste heat within the scope of IMO MARPOL ANNEX VI.

Keywords: EEXI, CO₂ reduction, WHRS, Marine diesel engine, MARPOL**Introduction**

The amount of carbon emissions from shipping globally is constantly increasing. These increasing greenhouse gases (GHG) cause global warming (Yuan et al., 2023). The International Maritime Organization enacts mandatory regulations to reduce emissions from ships (IMO, 2022). The most basic of these regulations is the Energy Efficiency Existing Index (EEXI) (IMO, 2023). Different techniques such as using different fuel types, waste heat recovery systems and ship form optimization are applied to reduce these emissions from ships (Bayramoğlu, 2024a; Bayramoğlu et al., 2022, 2023; Lee et al., 2021).

One of the most preferred systems for reducing emissions from ships and reducing fuel used is waste heat recovery systems (WHRS). These systems include the principle of recovering the heat in the ship's exhaust stack through a thermodynamic cycle (X. Liu et al., 2020). These systems are also fed by different waste heat sources on ships (Pashchenko, 2021). The principle behind waste heat recovery involves integrating the exhaust gases from diesel engines with a recovery system, such as the Organic Rankine Cycle (ORC), which utilizes low-boiling organic fluids to convert waste heat into useful work (Lebedevas & Čepaitis, 2024). This approach not only reduces fuel consumption but also contributes to lower CO₂ emissions, aligning with the International Maritime Organization's (IMO) regulations under MARPOL Annex VI aimed at mitigating the environmental impact of shipping activities (Wei et al., 2022). The potential for waste heat recovery systems to enhance energy efficiency is underscored by studies indicating that these systems can improve thermal efficiency by over 6% and significantly reduce emissions (Akman & Ergin, 2018).

This study investigates the parametric effects of variable turbine inlet pressure conditions and different working fluids on the performance of waste heat recovery systems. Utilizing open-source CoolProp software, the research aims to determine the maximum turbine power output under various conditions and assess the

implications for the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) (Wiliyan et al., 2023). By analyzing the relationship between the recovered power, fuel consumption, and associated CO₂ emissions, this study seeks to provide a comprehensive understanding of the role of waste heat recovery in achieving sustainable shipping practices.

In conclusion, the integration of waste heat recovery systems represents a promising avenue for reducing the carbon footprint of maritime transport. As the industry faces increasing regulatory pressures and environmental scrutiny, the findings of this research will contribute to the ongoing discourse on decarbonization strategies and the optimization of energy efficiency in shipping operations.

Materials and Methods

The process of waste heat recovery from flue gas from the marine diesel engine is given in Figure 1. In the given process, a turbocharger consisting of compressor and turbine main thermodynamic elements is given to provide the required pressure in the intake air in the engine. In the sequel, the organic Rankine cycle, which is a waste heat recovery system in which various refrigerants are analyzed parametrically, is given.

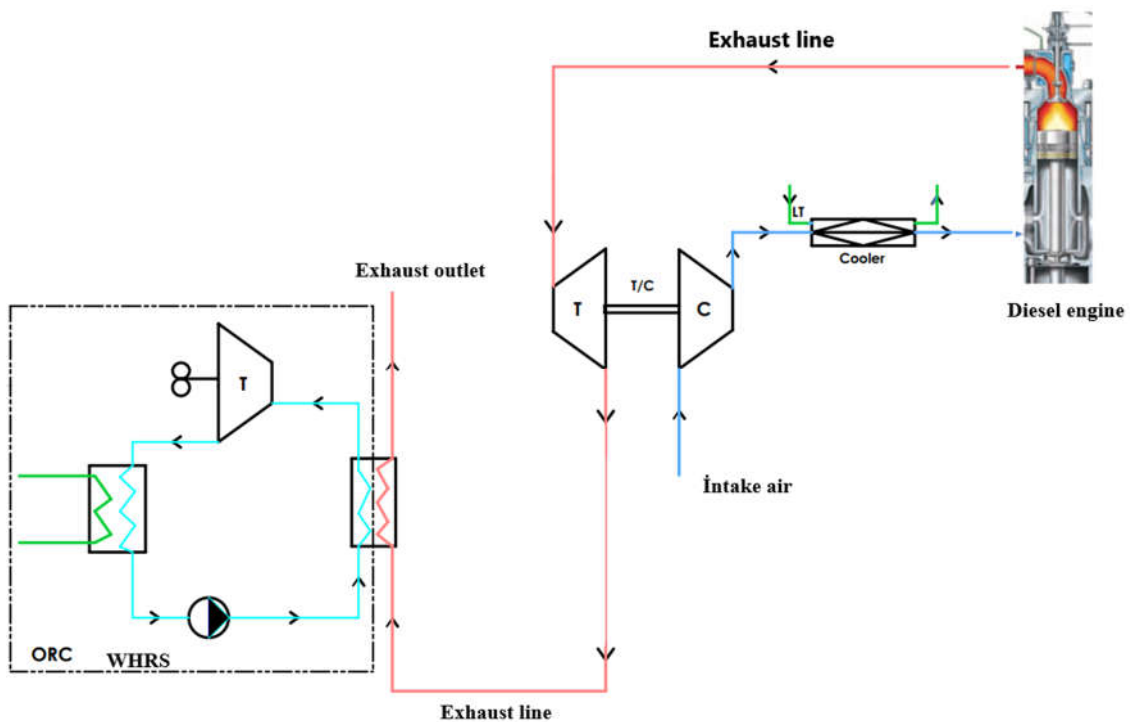


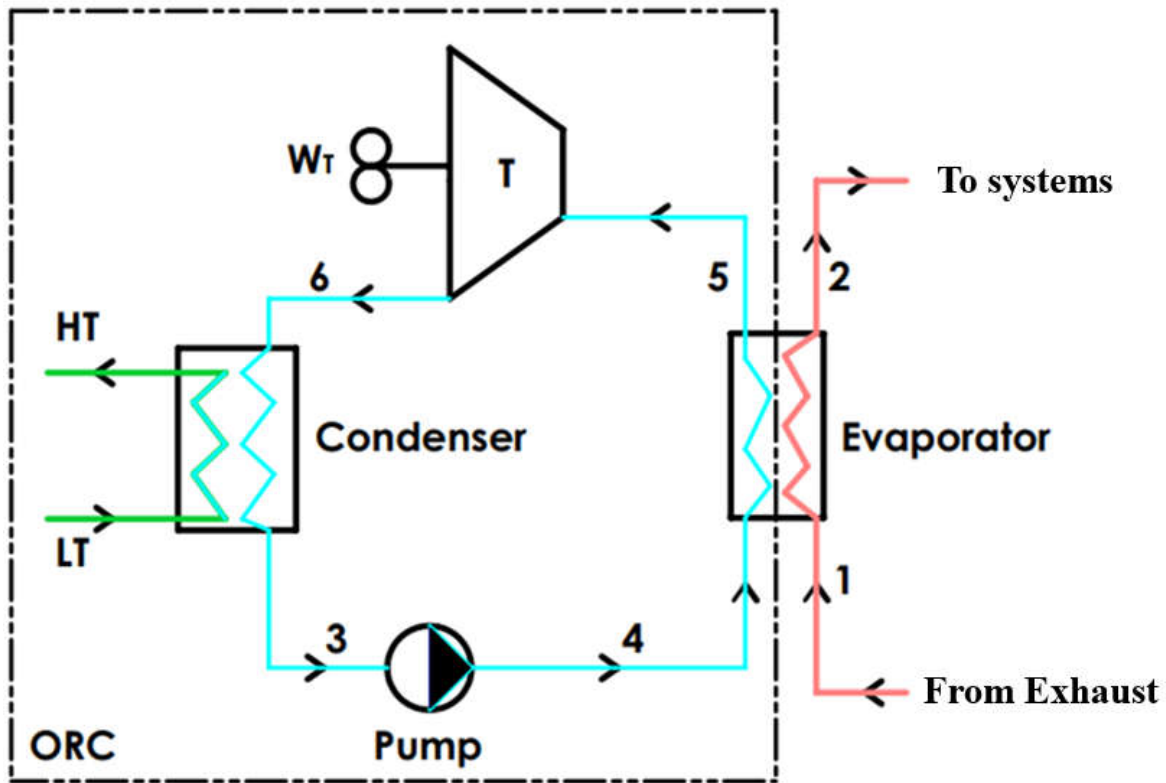
Figure 1. Flow chart of WHRS

The main thermodynamic parameters of the waste heat source from marine diesel engines are exhaust temperatures and mass flow rates. Flow rate and thermodynamic parameters vary according to the engine load. However, the diesel engine operational period mostly performs at 85% load conditions, which is the maximum continuous rating (MCR) engine load (Man, 2004). Therefore, the temperature and mass flow rate of five different engine loads, including the MCR load condition, are given in Table 1.

Table 1. Specifications of the diesel engine

Load [%]	SFC [g/kWh]	Mass flow rate [kg/s]	Exhaust temperature [K]
100	166	45.1	536.15
85	160.2	40.8	504.15
75	157.4	38	489.15
50	157.9	25.5	513.15
25	164.9	14.8	528.15

The waste heat recovery system (WHRS) used in the study consists of four components. These components mainly consist of the turbine where the energy is obtained and the working fluid expands, the heat exchanger where the fluid coming to the turbine evaporates, the condenser where the gas fluid expands after the turbine in the system is condensed, and the pump equipment that allows the fluid to be pumped to the hot source (Bayramoğlu, 2023; Ngo et al., 2019). The WHRS systems as shown in Figure 2.

**Figure 2.** Schematic diagram of ORC

Eq. (1) can be used to express the energy balance for the evaporator that receives the exhaust waste heat (Q. Liu et al., 2013).

$$\dot{m}_{exhaust} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{working\ fluid} \cdot (h_5 - h_4) \quad (1)$$

Eq. (2) provides an expression for the power generated by the turbine.

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{working\ fluid} \cdot (h_5 - h_6) \cdot \eta_T \quad (2)$$

where \dot{W}_T is the turbine power and η_T is the turbine isentropic efficiency. Eq. (3) can be used to express the condenser's heat flow (Q. Liu et al., 2013).

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{working\ fluid} \cdot (h_6 - h_3) \quad (3)$$

Eq. (4) provides an expression for the ORC pump power consumption.

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{m}_{working\ fluid} \cdot (h_4 - h_2)}{\eta_p} \quad (4)$$

The waste heat recovery on ships is important both to generate additional power and to reduce carbon emissions (Bayramoğlu, 2024b). The IMO implemented the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) to lower ships' greenhouse gas emissions. One metric pertaining to a ship's technical design is the EEXI. Ships only need to receive EEXI approval once in their lifespan if no adjustments are made to their energy efficiency. In 2023, the first quarterly survey included a survey of the initial certification (DNV, 2023). The EEXI value, which is used to calculate carbon emissions in ships, is expressed in Eq. (5).

$$EEXI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_i)(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \{(\prod_{j=1}^M f_i \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{nPTI} f_{eff(i)} \cdot P_{AE\ eff(i)}) \cdot C_{FAE(i)} \cdot SFC_{AE(i)}\} - (\sum_{i=1}^{n\ eff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \quad (5)$$

In the given expression, the first term refers to carbon emissions from main engine and auxiliary engines. The term added as negative refers to ship waste heat systems. The main machine power is given in Eq. (6) depending on the MCR power (Czermański et al., 2022).

$$P_{ME} = 0.75 * MCR \quad (6)$$

The combined power of the primary and secondary engines is the total effective power. The power of the auxiliary machine effect is determined using Eq. (7).

$$P_{AE} = P_{ME} * 0.025 + 250 \quad (7)$$

Findings and Discussion

As a result of the study, the power values obtained from the turbine after the expansion of the fluid, which is superheated steam because of the energy transferred from the flue gas to the WHRS evaporator, are given in Figure 3 for different engine loads. The study was carried out for R410a, R407c and R1234yf working fluids. The maximum turbine power was determined to be approximately 1.43 MW for a turbine inlet pressure of 3.6 MPa. The power obtained from the turbine increases with increasing turbine inlet pressure. In addition, as the engine load increases, the exhaust calorific value increases in proportion to the flow rate. this leads to more power from the WHRS system.

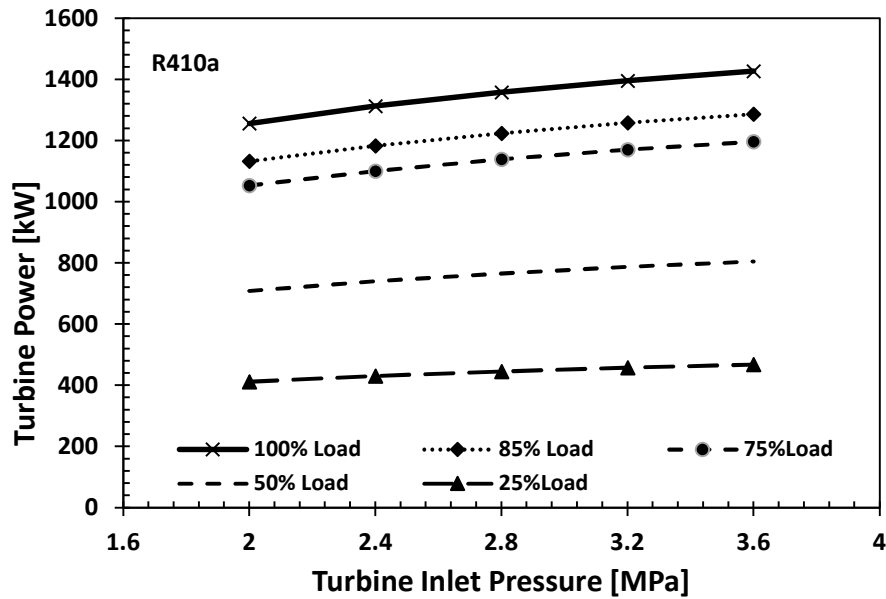


Figure 3. Turbine power versus turbine inlet pressure for R410a

Figure 4 shows the relationship between turbine inlet pressure and turbine power at different engine loads for R407c refrigerant. The maximum turbine power was determined to be approximately 1.31 MW for a turbine inlet pressure of 3.6 MPa, as for R410 fluid. Turbine power increases for increasing engine loads. For high engine load conditions, the turbine power ranges between 960 kW and 1.3 MW, while for low engine loads these values range between 300 kW and 700 kW.

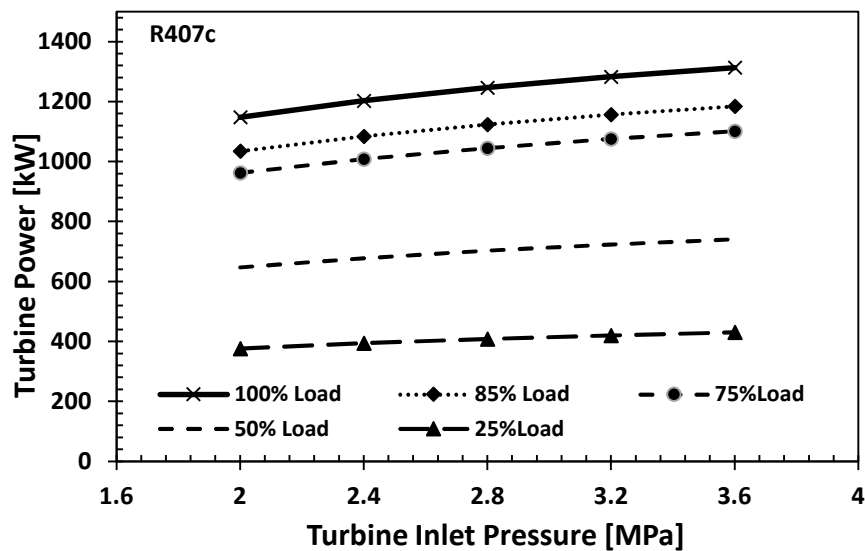


Figure 4. Turbine power versus turbine inlet pressure for R407c

Figure 5 represents the turbine power for different turbine inlet pressures of R1234yf refrigerant. Because of its comparable thermo-physical characteristics to R134a, R1234yf with GWP 4 was specifically selected as an alternative refrigerant for mobile air-conditioning among the low GWP refrigerants (Wang et al., 2024). The maximum turbine power was determined to be approximately 1.21 MW for a turbine inlet pressure of 3.6 MPa for refrigerant R1234yf. As with other refrigerants, it is determined that the turbine power of R1234yf refrigerant gas is higher at high engine loads.

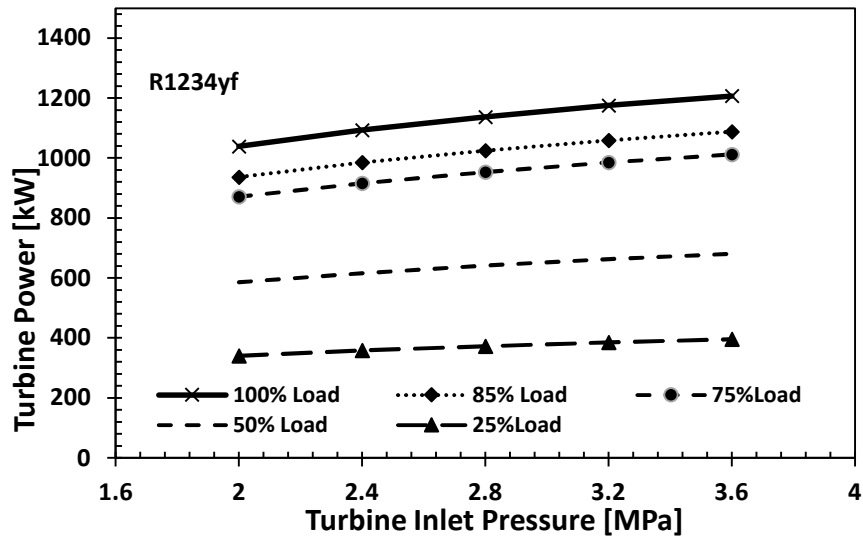


Figure 5. Turbine power versus turbine inlet pressure for R1234yf

The system efficiency at different turbine inlet pressures for different refrigerants is given in Figure 6. When the system efficiency is examined, it is obtained that the maximum system efficiency is approximately 22.6% for R410a fluid with 3.6 MPa turbine inlet pressure. The maximum system efficiency for R1234yf refrigerant is approximately 18.8% for a turbine inlet temperature of 3.6 MPa. It is clearly seen in the figure that the efficiencies for different refrigerants show parallel characteristics. The main reason for this difference for different refrigerants is directly related to the thermodynamic properties of the fluids.

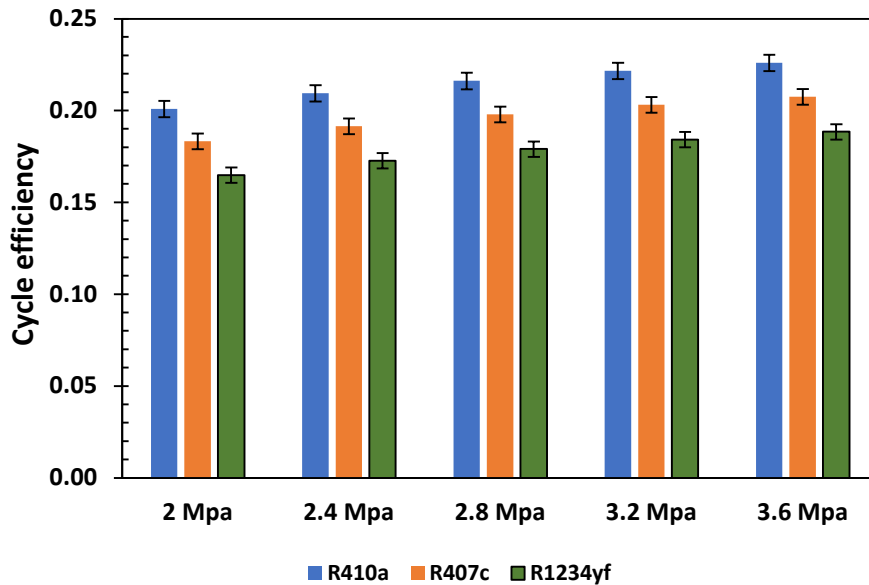


Figure 6. Cycle efficiency for variable refrigerants

Figure 7 shows the turbine power depending on the turbine inlet pressure for 85% engine load at different pressures for different refrigerants. It is seen that the turbine power increases with increasing turbine inlet pressure. It is noted that the turbine power is proportional for each pressure value.

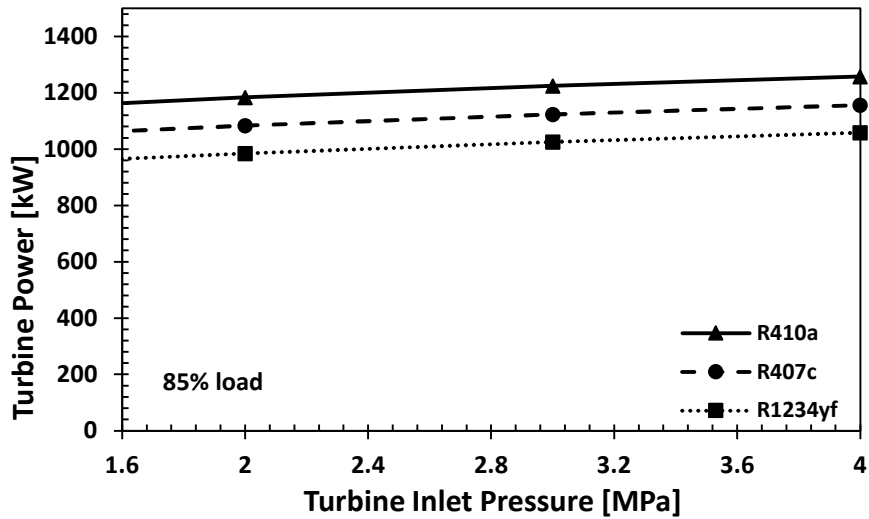


Figure 7. Turbine power for variable refrigerants at %85 engine load

The EEXI value, which is used as the basic indicator in determining carbon emissions from ships, expresses the amount of carbon emitted per unit load and speed. The reduction of this value varies in relation to the reduction of fuel consumption under the same load conditions. Therefore, one of the most effective methods used in reducing carbon emissions is WHRS systems. It should not be forgotten that carbon emissions are reduced as much as the power value obtained with this system (Mondejar et al., 2018). Figure 8 shows the effect of WHRS on EEXI value for different refrigerants. It is clearly seen that the use of waste heat reduces the EEXI value for each pressure and refrigerant. For high turbine pressure values, the reduction in the EEXI value is greater than for low turbine inlet pressure.

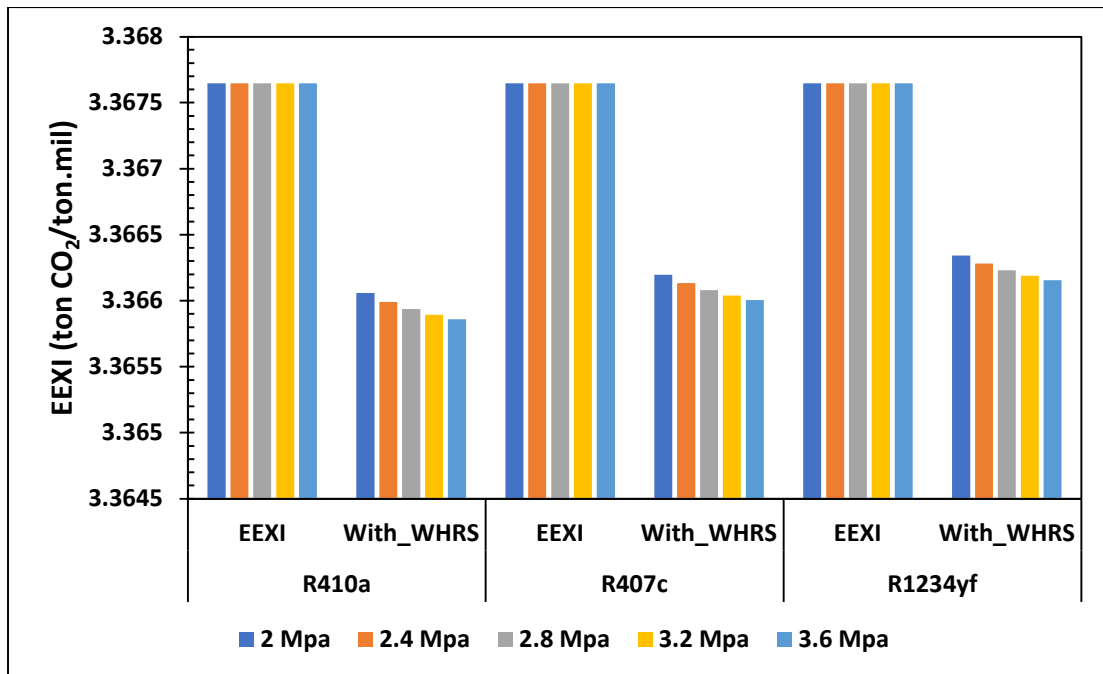


Figure 8. EEXI for WHRS and non-WHRS

Conclusion and Recommendations

WHRs systems are widely used to reduce emissions from ships and to utilise waste heat as an energy source. In this study, the effect of turbine power on system efficiency and EEXI value for different turbine inlet and

different refrigerants of a waste heat recovery system installed on a ship exhaust stack is parametrically analysed. As a result of the study, with increasing turbine pressure, turbine power and system efficiencies increased and the EEXI value decreased. Additionally, R410a, R407c and R1234yf refrigerants were used. The highest turbine power was determined to be 1.43, 1.31 and 1.21 for R410a, R407c and R1234yf gases, respectively. System efficiencies were determined as 22.6%, 20.7% and 18.8% for R410a, R407c and R1234yf gases, respectively. As a result of the study, it was determined that the use of the WHRS system reduced the EEXI value. The reduction rates were highest in R410 gas and lowest in R1234yf gas.

In future studies, different refrigerants and the global warming potential of these gases can be examined. In addition, WHRS system efficiency can be evaluated for different engine loads. Furthermore, a holistic concept that encompasses all components could be developed on various cycle types.

References

- Akman, M., & Ergin, S. (2018). An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(2), 586–601. <https://doi.org/10.1177/1475090218770947>
- Bayramoğlu, K. (2023). Application of post-combustion carbon capture process in marine diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(4), 10909–10925. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2252671>
- Bayramoğlu, K. (2024a). Energy and Exergy Analysis of Diesel-Hydrogen and Diesel-Ammonia Fuel Blends in Diesel Engine. *Journal of Eta Maritime Science*, 12(2), 128–135. <https://doi.org/10.4274/jems.2024.46503>
- Bayramoğlu, K. (2024b). The effects of alternative fuels, cruising duration and variable generators combination on exhaust emissions, energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity rating (CII). *Ocean Engineering*, 302(January). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117723>
- Bayramoğlu, K., Bahlekeh, A., & Masera, K. (2023). Numerical investigation of the hydrogen, ammonia and methane fuel blends on the combustion emissions and performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.079>
- Bayramoğlu, K., Yilmaz, S., & Nuran, M. (2022). Energy and exergy analyses of hydrogen addition in a diesel engine. *International Journal of Exergy*, 37(4), 377. <https://doi.org/10.1504/ijex.2022.10046104>
- Czermański, E., Oniszczyk-Jastrzabek, A., Spangenberg, E. F., Kozłowski, Ł., Adamowicz, M., Jankiewicz, J., & Cirella, G. T. (2022). Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy*, 145(August). <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105259>
- DNV. (2023). *IMO MEPC 80: Shipping to reach net-zero GHG Emissions by 2050*.
- IMO. (2022). *Marine Environment Protection Committee (MEPC) – 79th session, 12-16 December 2022*.
- IMO. (2023). *EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>.
- Lebedevas, S., & Čepaitis, T. (2024). Complex Use of the Main Marine Diesel Engine High- and Low-Temperature Waste Heat in the Organic Rankine Cycle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 1–27. <https://doi.org/10.3390/jmse12030521>
- Lee, S., Yoo, S., Park, H., Ahn, J., & Chang, D. (2021). Novel methodology for EEDI calculation considering onboard carbon capture and storage system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105(January), 103241. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103241>
- Liu, Q., Duan, Y., & Yang, Z. (2013). Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids. *Energy*, 63, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.035>
- Liu, X., Nguyen, M. Q., Chu, J., Lan, T., & He, M. (2020). A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine. *Journal of Cleaner Production*, 265,

121502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121502>

- Man, B. (2004). MAN B&W low speed engines. *Pounder's Marine Diesel Engines*, 280–346. <https://doi.org/10.1016/b978-075065846-1/50011-0>
- Mondejar, M. E., Andreasen, J. G., Pierobon, L., Larsen, U., Thern, M., & Haglind, F. (2018). A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91(April), 126–151. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.074>
- Ng, C. W., Tam, I. C. K., & Wu, D. (2019). System modelling of organic Rankine cycle for waste energy recovery system in marine applications. *Energy Procedia*, 158, 1955–1961. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.451>
- Pashchenko, D. (2021). Thermochemical waste-heat recuperation as on-board hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 28961–28968. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.108>
- Wang, L., He, Y., Ren, J., Wang, D., Dai, B., & Zhang, Z. (2024). Simulation of diffusion of combustible refrigerants R1234yf and R290 leakage in automotive air conditioning. *International Journal of Refrigeration*, 168(409), 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.09.012>
- Wei, Z. guo, Qiu, Z. qiang, Xiao, Q., & Shao, W. (2022). Simulation and optimization of the waste heat recovery system of the ship power system based on the heat current method. *Energy Science and Engineering*, 10(12), 4566–4579. <https://doi.org/10.1002/ese3.1289>
- Wiliyan, R., Made Ariana, I., & Widhi, D. (2023). Evaluation of Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) on Container Ship in Indonesian Shipping. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1198(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1198/1/012025>
- Yuan, Q., Wang, S., & Peng, J. (2023). Operational efficiency optimization method for ship fleet to comply with the carbon intensity indicator (CII) regulation. *Ocean Engineering*, 286(P1), 115487. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115487>



BİR KENTSEL SAĞLIK MERKEZİNDE KAZAN DAİRESİ HAVALANDIRMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ÇALIŞMASI

Fatih OĞUZ

Yüksek Lisans Öğrencisi, Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye, ORCID: 0009-0008-0066-9632

Cemil KOYUNOĞLU

Assistant Prof. Dr., Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6309-1569>

Özet

Bu çalışma, bir kentsel sağlık merkezinin kazan dairesindeki havalandırma sisteminin performansını artırmak amacıyla yapılan bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) analizini içermektedir. Mevcut havalandırma düzeninin hava akışı, sıcaklık dağılımı ve basınç profilleri üzerindeki etkilerini simüle etmek için üç boyutlu bir CFD modeli oluşturulmuştur. Analizler sonucunda kazan dairesindeki hava akışının yetersiz olduğu belirlenmiş ve bu durumu iyileştirmek için yeni havalandırma tasarımları önerilmiştir. Önerilen tasarımların performansı, orijinal sistemle karşılaştırılmış ve enerji verimliliği ile maliyet avantajları değerlendirilmiştir. Çalışma, sağlık merkezlerinde kazan dairesi havalandırmasının etkin bir şekilde iyileştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kazan dairesi, havalandırma, hesaplamalı akışkanlar mekaniği, CFD, sağlık merkezi.

IMPROVEMENT OF BOILER ROOM VENTILATION IN AN URBAN HEALTH CENTER IN A COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS STUDY

Abstract

This study involves a computational fluid dynamics (CFD) analysis aimed at enhancing the ventilation system performance of a boiler room in an urban health center. A three-dimensional CFD model was created to simulate the effects of the current ventilation arrangement on airflow, temperature distribution, and pressure profiles. The analysis revealed insufficient airflow in the boiler room, prompting new ventilation designs to address this issue. The performance of the proposed designs was compared to the original system, with evaluations on energy efficiency and cost benefits. This study aims to contribute to the effective improvement of boiler room ventilation in health centers.

Keywords: Boiler room, ventilation, computational fluid dynamics, CFD, health center.

Giriş

Hızla büyüyen ve nüfus olarak kalabalıklaşan dünyamızda, fazlasıyla ihtiyacını hissettiğimiz kentsel sağlık merkezlerinin en önemli bölümlerinden olan kazan daireleri, kuruluşun hizmet sürekliliği ve konforu için en az merkezin içindeki donanım kadar önemlidir.

Kazan dairelerinde kullanılan havalandırma sistemleri de, sistemin verimliliği ve güvenliği açısından önem arz etmektedir. Enerjiyi verimli kullanmak her geçen gün daha da dikkate alınması gereken bir konu olarak gündemimize gelmektedir.

Havalandırma sistemi ayrıca; kazan dairesi içerisinde uygun hava akışı, yeterli miktarda taze hava girişi, ortamda biriken ve süpürülmesi gereken zararlı gazların uzaklaştırılması, sürekli çalışan kazanların zarar görmemesi için ortamın sıcaklığını dengede tutma, korozyon oluşmaması için nem miktarını optimize etme gibi koşulları yaratmamızı sağlayan sistemlerdir.

Bu sistemlerin sıfırdan kurulması ve deneme yanılma yöntemiyle uygun hale getirilmesi oldukça maliyet, iş gücü ve zaman problemi yaratacaktır. Aynı durum mevcutta çalışan sistemler için daha büyük problem anlamı taşımaktadır. Bu sistemlerin optimizasyonu, sanal ortamda simüle edilerek analiz ve sonuçların yorumlanması ile daha güvenli ve çok çok daha düşük maliyetlerle mümkündür.

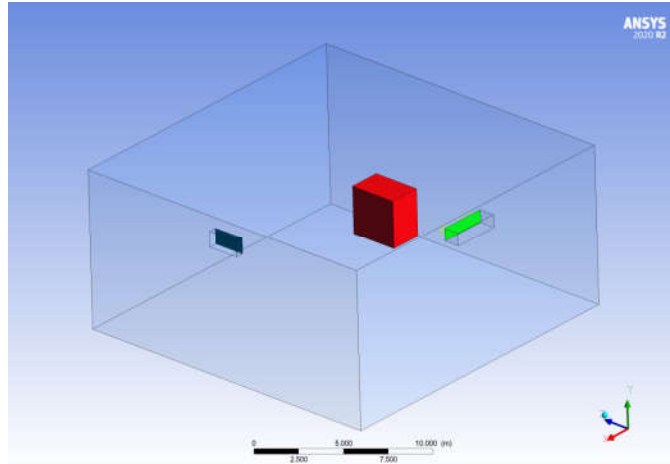
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(CFD) Analizi yöntemi kullanılarak yapılan bu optimizasyonlar dünyada; inşaat, otomotiv ve havacılık, Enerji sektörleri, HVAC sistemleri, sürdürülebilir mühendislik dallarında kullanılmakta ve dünyamızın hızla gelişmesine yardımcı olmaktadır.

Materyal ve Metod

Bu çalışmada, bir kentsel sağlık merkezine ait kazan dairesi havalandırması için ANSYS FLUENT 2020 R2 versiyon yazılım ile CFD analizi yapılarak ortamın hava koşulları birçok yönden ele alınmış, mevcut sistemin daha verimli ve homojen hava koşullarında işlemesi için gerekli analizler oluşturulmuş ve sisteme etkileri yorumlanmıştır.

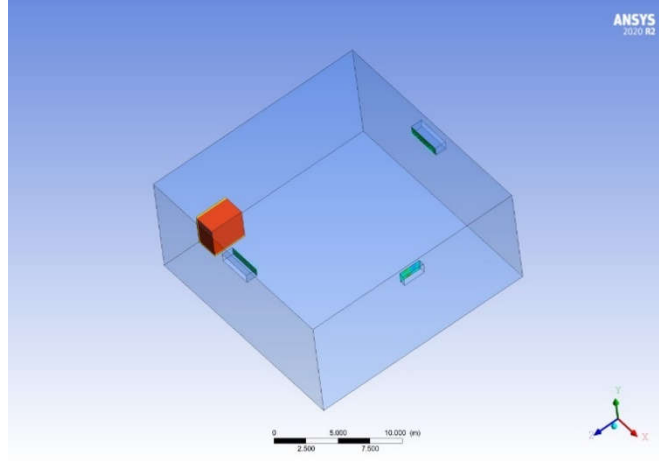
• Geometri Oluşturma

ANSYS Fluent programı için mevcut bulunan kazan dairesi “Model-1” olarak tanımlanmış olup şekil 1’de gösterilmiştir. Mevcutta bulunan sistemde sınır koşulları birer adet 1.18 m/s üfleme hızına ve 24 °C sıcaklığa sahip Temiz hava fanı ve egzos fanı, 1 adet yüzey sıcaklığı 50 °C ve çelik yüzeye sahip Kazan, Ortam ve Duvar sıcaklıkları ise 35 °C olarak belirlenmiştir.



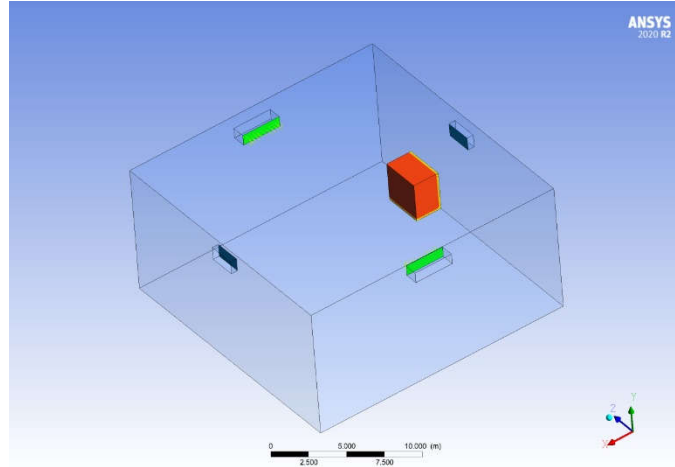
Şekil 1. Model-1 Kazan Dairesi Geometrisi

Mevcut sisteme alternatif olarak; 2 adet 0.59 m/s üfleme hızına ve 24 °C sıcaklığa sahip Temiz hava fanı ve 1 adet 1.18 m/s üfleme hızına sahip egzos fanı, 1 adet yüzey sıcaklığı 50 °C ve çelik yüzeye sahip Kazan, Ortam ve Duvar sıcaklıkları ise 35 °C olarak belirlenen “Model-2” isimli sistem Şekil-2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Model-2 Kazan Dairesi Geometrisi

Son olarak; 2 adet 0.59 m/s üfleme hızına ve 24 °C sıcaklığa sahip Temiz hava fanı ve 2 adet 1.18 m/s üfleme hızına sahip egzoz fanı 1 adet yüzey sıcaklığı 50 °C ve çelik yüzeye sahip Kazan, Ortam ve Duvar sıcaklıkları ise 35 °C olarak belirlenen “Model-3” isimli sistem Şekil-3’de gösterilmiştir.

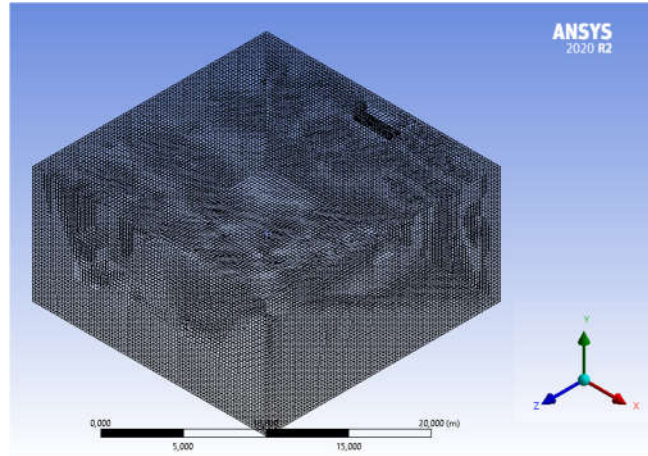


Şekil 3. Model-3 Kazan Dairesi Geometrisi

- **Mesh Oluşturma**

Mesh oluşturma; genel anlamda modeli daha küçük parçalara bölerek, bölünen parçaların her bir bölümünde akışkan dinamiklerini ve matematiksel hesaplamaları daha kolay analiz etmemize olanak tanır. Bu bölünme ne kadar küçük olur ise sonucun kesinliği o kadar doğru olacaktır. Ancak bu işlem kullanılan bilgisayarın bellek ve işlemci gücüne göre hesaplama sürecinin uzamasına da neden olacaktır. (Giraldo, 2024)

Yapılan çalışmada sistemin Mesh uygulanmış hali Şekil-4’de gösterilmiş ve bölünme miktarı 0.25m olarak seçilmiştir.



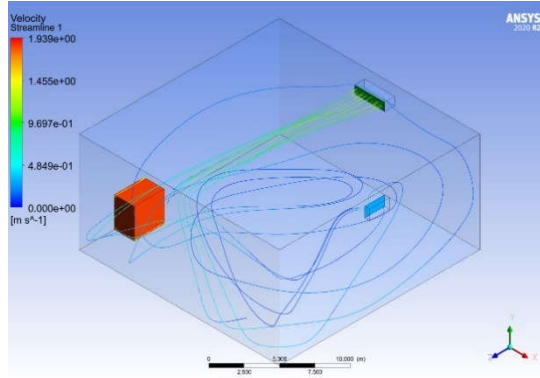
Şekil 4. Mevcut Geometri Mesh Bölünmüş Hali

- **Bilgi Girişleri**

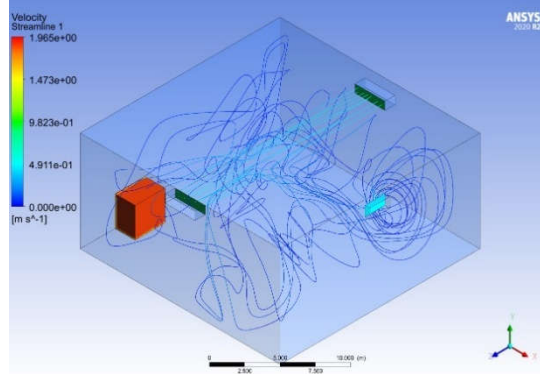
Mesh oluşumunun ardından Sisteme tanımlanması gereken tüm veriler programa girilmiştir. Bu anlamda; Gravity parametresi Y ekseninde -9.81 , Energy Equation tanımlı, Viscous Model olarak k-epsilon seçilmiş, ortamdaki tüm cihazlara tanımlamaları yapılmış ve Sistemin hesaplama sürecine geçilmiştir. Yaklaşık olarak 10.000 üzeri Iteration sonucunda yakınsamalar tamamlanmış ve Model-1, Model-2, Model-3 için bulunan sonuçlar kayıt altına alınmıştır.

Bulgular ve Tartışma

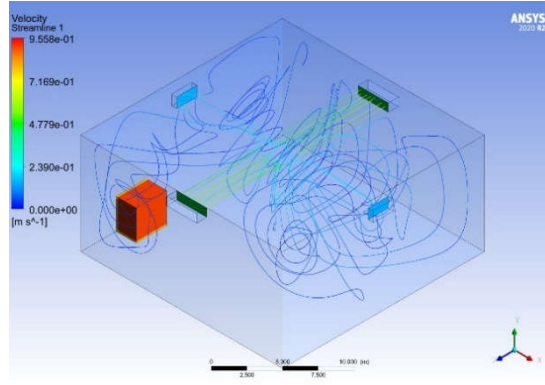
Modeller için ortamdaki havanın akış dağılımı Şekil-5, Şekil-6 ve Şekil-7'deki gibi simüle edilmiştir;



Şekil 5. Model-1 Hava Akış Çizgisi Dağılımı

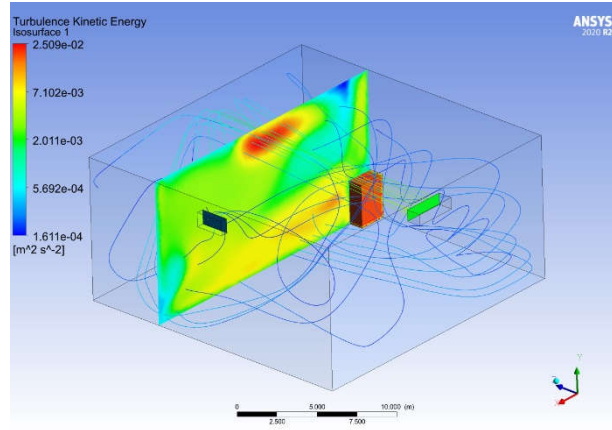


Şekil 6. Model-2 Hava Akış Çizgisi Dağılımı

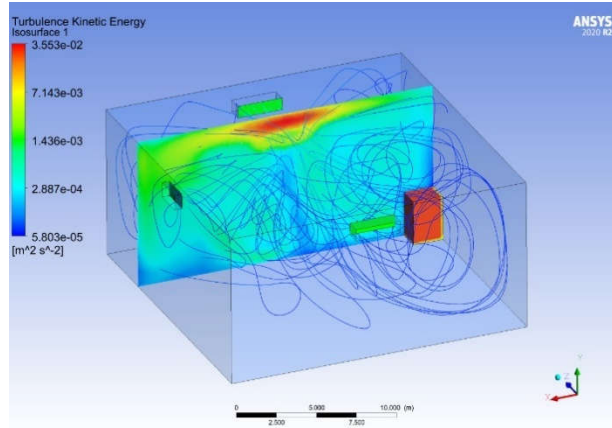


Şekil 7. Model-3 Hava Akış Çizgisi Dağılımı

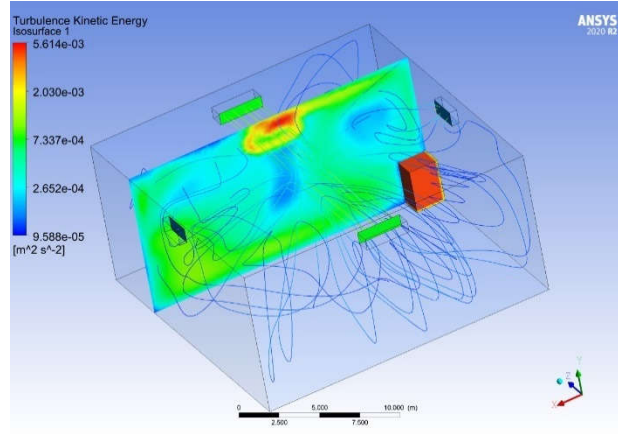
Kazanın bulunduğu bölgede, odadan kesit alınarak birim kütle başına atmosferik hareketin kinetik enerjisi olarak ifade edilen Turbulance Keenetic Energy modeli Şekil-8, Şekil-9 ve Şekil-10'da gösterilmiştir (Albornoz, M.A., Rivera, & Rivero, 2022)



Şekil 8. Model-1 Turbulance Keenetic Energy



Şekil 9. Model-2 Turbulance Keenetic Energy



Şekil 10. Model-3 Turbulance Keenetic Energy

Sonuçlar ve Tartışma

Yapılan analizler sonucunda Kazan Dairesine ait hava koşulları için, her bölümdeki basınç dağılımı, hava yoğunluğu dağılımı, Eddy Viscosity, Turbulance Keenetic Energy, Turbulance Eddy Dissipation analizleri simüle edilmiştir.

Bu sonuçlar ele alındığında kazan dairesi hava oranının her birimkarede homojen olarak dağıldığı, Fan hızlarının yarı yarıya düşürülerek daha sessiz çalışma ortamı ve daha az rahatsız edici hava akışının olacağı tespit edilen Model-2, bulunan mevcut sistemde karşılıklı 1 adet temiz hava kanalı eklenerek çok az maliyetle ortamın daha ideal hava kalitesine ulaşabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak her bir modeli ayrı ayrı kurularak harcanacak maliyet, zaman ve iş gücü yerine ANSYS Fluent programı kullanılarak sistemlerin çok daha hızlı ve daha ekonomik bir şekilde analiz edilmesi mümkündür. Gelişen dünya düzeninde, enerji verimliliğinin ve çevresel etkilerinin her geçen gün daha da önem arz ettiği çağımızda mevcutta kullanılan veya yeni kurulmak istenilen her çalışma için sanal analizlere daha çok ihtiyacımız olacaktır.

Kaynakça

- Albornoz, C. P., M.A., E. S., Rivera, R., & Rivero, M. (2022, 7). Review of atmospheric stability estimations for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, s. 163.
- Giraldo, G. (2024, 03 14). CFD Modeling, Analysis, and Online Simulation For Beginners: https://www-simscale-com.translate.goog/blog/cfd-analysis-for-beginners/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=tr&_x_tr_hl=tr&_x_tr_pto=tc adresinden alındı

POTENTIAL OF YOZGAT GRAPHITE DEPOSITS AND CONTRIBUTION TO ENERGY TECHNOLOGIES

Berna YAVUZ PEHLİVANLI¹⁻³

Assoc. Prof. Dr. Yozgat Bozok University, Department of Geological Engineering, 66900, Atatürk Road, Yozgat, Türkiye¹; (Responsible Author) ORCID: 0000-0003-0127-8525

Hatice KANBUR ÇAVUŞ²⁻³

Prof.Dr., Yozgat Bozok University, Institute of Hemp Research, Department of Material and Energy, Yozgat-Türkiye², ORCID: 0000-0001-8525-0313

Yozgat Bozok University Erdoğan Akdağ Campus, Bozok Technopark Inc., 219/1, Hadid Energy, Industry and Trade Ltd. Co. 66100 Yozgat, Türkiye³

Abstract

Graphite mining in Türkiye began in 1941 and graphite deposits of economic value have been identified in more than 20 regions. Although Türkiye has the largest natural graphite resources in the world with a reserve of 90 million tons, actively operated graphite deposits are quite limited. These deposits are located in the provinces of Kastamonu, Yozgat, Kütahya, Muğla, Adıyaman, İzmir, İstanbul, Aydın and Artvin. The mineralization in Yozgat is especially organic-origin and high-carbon graphite, and has great potential. The commercial value of graphite depends on the carbon content and the purity of its crystal structure. Samples taken from the field are observed in the form of Graphite Veins, Graphite Marbles and Disseminated graphite. These samples were examined with XRD and XRF techniques and the results were evaluated. The most important component in natural graphite is carbon. There are also elements such as oxygen, sulfur, aluminum, iron, silicon in graphite. These graphites can be made suitable for industrial use with purification processes (flotation, chemical washing, thermal treatment). Purified graphite provides high performance especially in applications such as lithium-ion batteries, graphene production, electronics and energy storage systems. Graphite is a critical component in the anode section of lithium-ion batteries and the high electrical conductivity, chemical stability and capacity providing properties of these batteries increase the efficiency of energy storage systems. In addition, graphite can be used in alternative energy storage solutions such as sodium-ion batteries. High-quality graphite in Yozgat can support domestic production by increasing Turkey's independence in the field of energy technologies and contribute to innovative energy technologies. As a result, Yozgat graphite deposits offer an important opportunity to strengthen Turkey's energy storage capacity and increase domestic resources to be used in renewable energy systems.

Keywords: Graphite mining, Natural resources, Industrial use, Energy storage, Lithium-ion batteries, Yozgat-Türkiye.

Introduction

Graphite mining in Turkey began in 1941 and graphite deposits of economic value have been identified in more than 20 regions. Turkey has the largest natural graphite reserve in the world, with a reserve of 90 million tons. Active and operated graphite resources are quite scarce. It is located in Kastamonu, Yozgat, Kütahya, Muğla, Adıyaman, İzmir, İstanbul, Aydın and Artvin. Akdağmadeni and its surroundings in Yozgat Province have high potential in terms of graphite. The graphites in Yozgat are of organic origin and have a high purity rate (Figure 1)

The metamorphic rocks in the Yozgat Akdağmadeni region are part of the Central Anatolian Crystalline Massif. The metamorphic rocks in this region consist of types such as flist, calc-clist, amphibolite and marble. These rocks were shaped by the effect of dynamothermal regional metamorphism.

The metamorphic rocks in the Akdağmadeni region are covered by Neogene rocks. These rocks were formed as a result of deformation phases and tectonic movements.

The region has a very dense tectonic structure. Faults of various sizes are encountered in almost every direction. It is noteworthy that the large faults are generally in the NE-SW direction. If a generalization is made, we can accept them as faults dependent on the Alpine movement.

According to the thickness determinations made at various distances from the Graphite ore, which was determined to have an extension of 2700 m, it is seen that the vein has thicknesses varying between a minimum of 0.7 m and a maximum of 4.0 m (Figure 2).

Metamorphic rocks in the Yozgat Akdağmadeni region are part of the Central Anatolian Crystalline Massif. Metamorphic rocks in this region consist of types such as flist, calc-clist, amphibolite and marble. These rocks were shaped by the effect of dynamothermal regional metamorphism. Metamorphic rocks in the Akdağmadeni region are covered by Neogene rocks. These rocks were formed as a result of deformation phases and tectonic movements (Figure 3)



Figure 1. Türkiye graphite deposits map [İlhan 2020].



Figure 2. Field image of Yozgat graphites.

AGE	UNIT	LITHOLOGY	DESCRIPTION
QUATERNARY			Alluvial Unconformity
NEOGENE	Kızılırmak Formation		Conglomerate, lacustrine limestones, sandy clayey and gravelly unconsolidated sediments Unconformity
PALEOZOIC	Akdağ Metamorphics		White, grey beige colored thick marbles
			Yellow brown dark grey and green toned calcschist
			Quartz mica schist muscovite schist, garnet and biotite schist
			Scaleless

Figure 3. Generalized stratigraphic columnar section of the study area (Akıl 2005) .

Materials and Methods

Multi-Purpose X-Ray Diffractometer (MP-XRD) and Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry (WD-XRF) analyses were performed in the laboratories of Yozgat Bozok University Science and Technology Application and Research Center (BILTEM).

Findings and Discussion

Composition of Graphite

The main component of natural graphite is carbon, and elements such as oxygen, sulfur, aluminum, iron and silicon are also found. The commercial value of graphite depends on the ratio of these elements and the purity of its crystal structure. High carbon content and low foreign element content produce higher quality graphite.

In Yozgat samples, the elements are found in the order of abundance Ca > Si > Al > K > Fe > Mg > Ti > Sr > Mn > Na > V > Cr > Pu > Au > Rb > S > Zr > Zn > Pt > Bi > Cu > Ni. The total element content is 61.2663 and the carbon content varies between 30-40. As a result of laboratory examinations, approximately 20% fixed carbon was determined in the samples, and X-Ray examinations confirmed that it was graphite. Ca, Si and Al are major elements. Potassium, Fe, Mg and Ti elements are minor elements. The remaining elements Sr, Mn, Na, V, Cr, Pu, Au, Rb, S, Zr, Zn, Pt, Bi, Cu and Ni are trace elements (Figure 4-5)

The elements in graphite are generally classified as major, minor and trace elements. The range of these elements is as follows:

Major elements are elements that are found in high concentrations in a material or mineral and form the basic composition of the material. These elements play a key role in determining the chemical and physical

properties of the material. For example, the major element in graphite is carbon (C), which is the main component of graphite and the main determinant of its properties. These elements are usually found in concentrations greater than 1% and form a significant part of the chemical formulation of the material.

Minor elements are elements that are found in low concentrations in a material or mineral, but still affect the overall composition and properties of the material. They are usually found in amounts less than 1% of the total composition of the material, but this amount is sufficient and plays a significant role in determining the physical and chemical properties of the material.

Trace elements are elements that are found in very low concentrations (usually ppm or parts per million or less) in a material or mineral. These elements make up a very small percentage of the total composition, but can have significant effects on the properties and behavior of the material. Trace elements are usually found at ppm (parts per million) or ppb (parts per billion) levels.

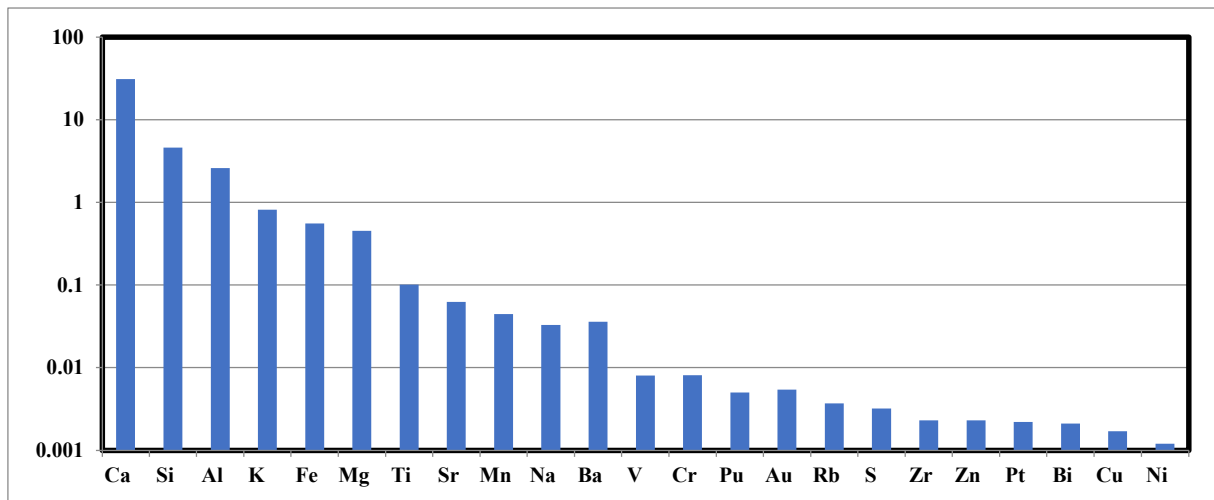


Figure 4. Main and trace elements content of graphite of samples in Yozgat area.

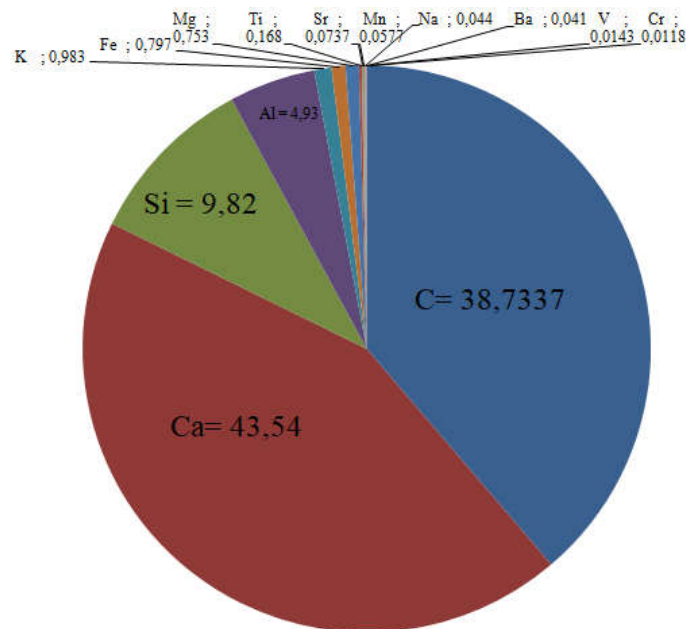


Figure 5. Main element content of graphite of samples in Yozgat area.

Importance of Trace Elements

Chemical Properties: Trace elements can affect the role and behavior of a material in chemical reactions.

Physical Properties: Trace elements can also have an effect on the physical properties of the material, such as hardness, melting point, or electrical conductivity.

Industrial and Commercial Value: The presence of trace elements can increase the industrial and commercial value of the material. For example, some trace elements may be necessary for high-tech applications.

Major Elements

Carbon (C): Carbon, the main component of graphite, is usually more than 90%.

Oxygen (O): Can be between 0.1% and 1%.

Sulfur (S): Can be between 0.01% and 0.1%.

Minor Elements

Aluminum (Al): Can be between 0.01% and 0.1%.

Iron (Fe): Can be between 0.01% and 0.1%.

Silicon (Si): Can be between 0.01% and 0.1%.

Magnesium (Mg): Can be between 0.01% and 0.1%.

Potassium (K): It can be between 0.01% and 0.1%.

Titanium (Ti): It can be between 0.01% and 0.1%.

Trace Elements

Calcium (Ca): It can be between 0.01% and 0.1%.

Sodium (Na): It can be between 0.01% and 0.1%.

Copper (Cu): It can be between 0.01% and 0.1%.

Molybdenum (Mo): It can be between 0.01% and 0.1%.

Vanadium (V): It can be between 0.01% and 0.1%.

The amounts of these elements are important to determine the chemical structure and commercial value of graphite. High carbon content and low foreign element content make graphite a high quality and valuable material.

Other trace elements found in graphite are generally elements such as oxygen (O), sulfur (S), aluminum (Al), iron (Fe), silicon (Si), magnesium (Mg), potassium (K) and titanium (Ti). These elements are considered trace elements that affect the chemical structure and commercial value of graphite. The amounts of these elements are generally very low and are important for determining the properties of graphite. Especially the high carbon content and low foreign element content make graphite a high quality and valuable material.

X-ray diffraction (XRD) spectrum of graphite

In the X-ray diffraction (XRD) spectrum of graphite, two main peaks are seen. The peak on the 002 axis: This peak represents the distance between the planes of graphite and is usually seen at 26.5° . The peak on the 101 axis: This peak represents the distance between the planes of graphite and is usually seen at 54.7° . These peaks are used to determine the crystal structures of graphite and the distance between the planes. In the XRD spectrum of graphite, several other peaks are seen besides the 002 and 101 axes. These are usually of lower intensity and represent different aspects of the crystal structure of graphite. For example, peaks on the 004, 100, and 110 axes can also be seen. These peaks are used to analyze the crystal structures of graphite in more detail (Figure 6). In addition to graphite, the sample includes Quartz, Pyrite, Illite, Anatase (Figure 7).

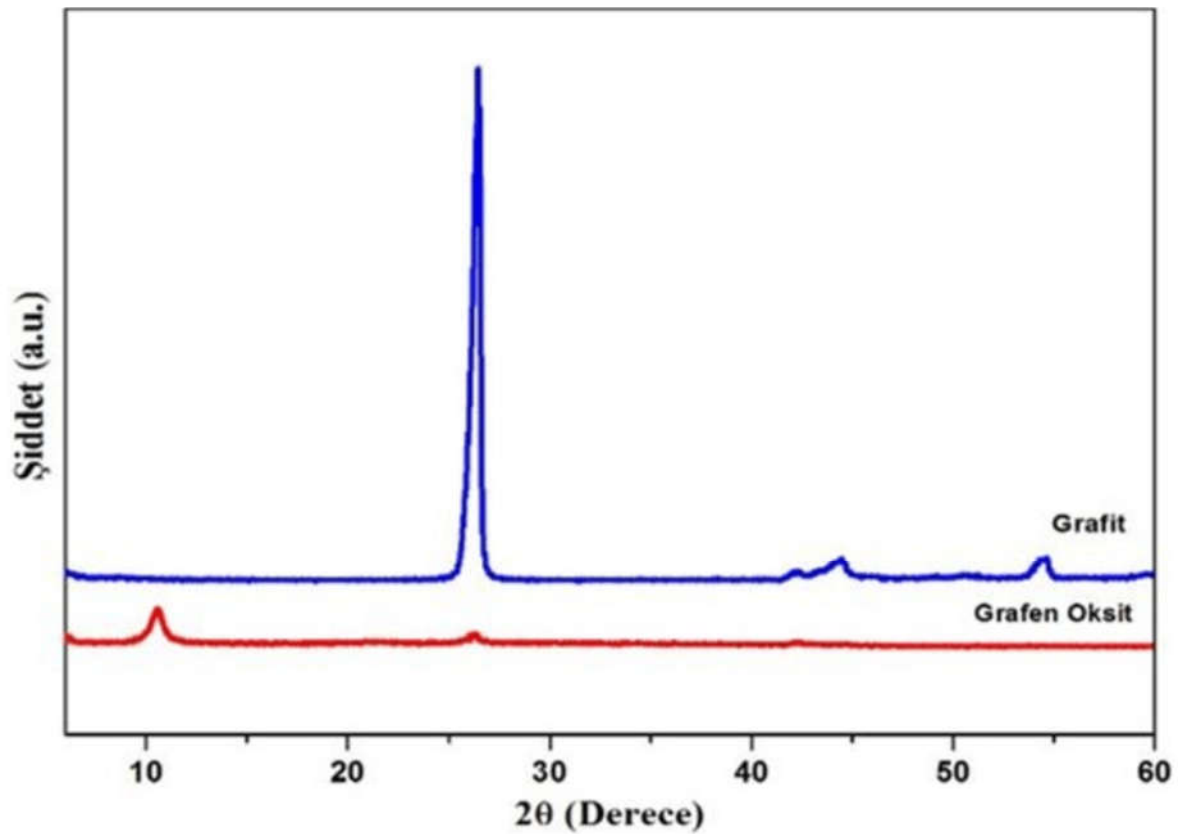


Figure 6. XRD Graphes for Graphite and GO (Yazıcı vd. 2016).

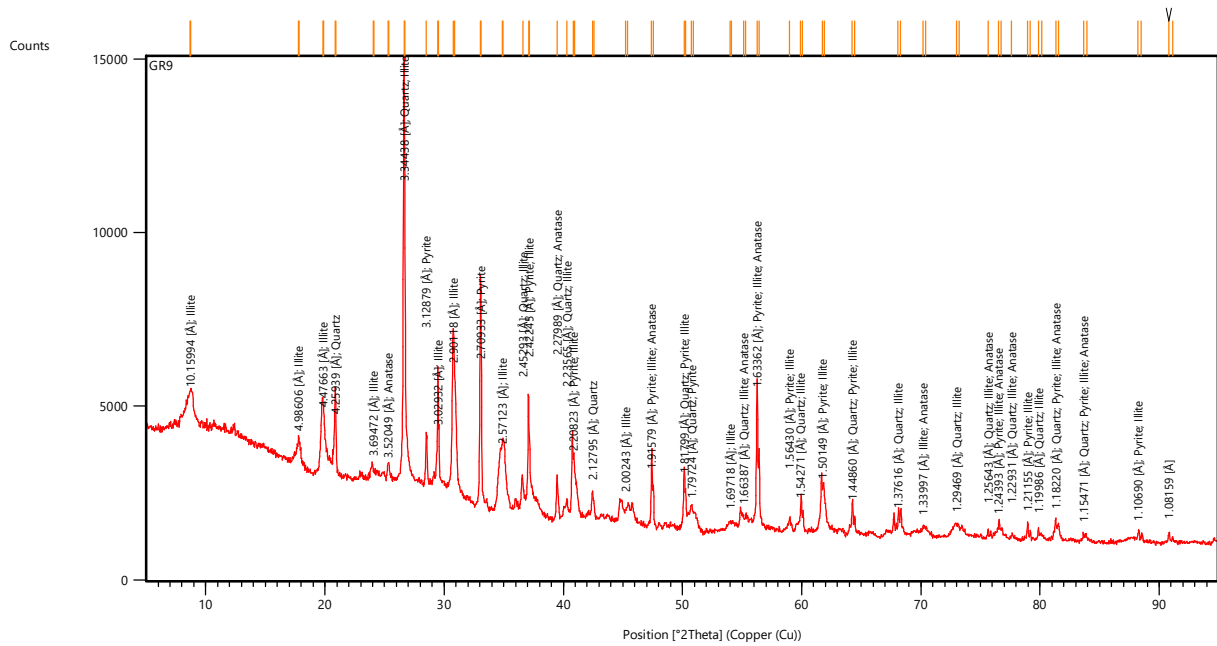


Figure 7. XRD peaks of Akdağmadeni graphites

Purification Processes

Mineral Enrichment; Flotation and magnetic separation methods are used. Chemical Washing; Acid and basic washing methods are applied. Thermal Purification; It is done with high temperature processes. Ion Exchange; It is another method used in purification processes.

Area of use of natural graphite

Natural graphite is used in many different industrial and technological areas. Especially in the Electrical and Electronics sector, it is used as an anode material in lithium-ion batteries, especially in battery production, and offers high electrical conductivity and chemical stability. It is used as an electrode in electric arc furnaces and other electrochemical applications in electrode production. In metallurgy, it is used in refractory bricks, molds and linings resistant to high temperatures in the production of refractory materials. It is used in the production of casting molds in metal casting processes in casting molds. In chemical and industrial production, it is used as a lubricant, especially as a solid lubricant for mechanical parts operating under high temperatures and pressure. In pencil production, graphite is widely used in the cores of pencils. It is also used in the production of high-quality graphene in innovative and advanced technologies. It is used as a moderator and retarder in nuclear reactors in the Nuclear Industry. As a Construction and Building Material, Graphite is used as an additive in some heat insulation materials. In Flame Retardant Materials, materials containing graphite provide fire resistance. In the extreme, it is used in various drawing and art materials. In Paints and Coatings It is used in special paints and coatings to provide electrical conductivity. These wide areas of use of graphite make it an indispensable material in many industries.

Conclusion and Recommendations

It shows that graphite formation is possible in samples rich in Ca (calcium). Especially in the subduction zone close to the waterfall, calcium carbonate (CaCO_3) carbonate becomes unstable and graphite formation is observed. This situation can also occur in relatively oxygenated conditions.

Such graphites generally consist of aragonite crystal structures, showing the effect of the crystal structure of calcium carbonate on graphite formation.

There is no direct subduction zone in Yozgat. However, Yozgat and the surrounding regions contain a foreland basin formed as a result of tectonic activities between the Kırşehir Block and the Sakarya Continent and the Anatolian Continent. Volcanic activities and metamorphic changes related to the Eocene period are observed in this region. The geological structures in this region are related to the İzmir-Ankara-Erzincan suture zone formed by the union of the Kırşehir Block and the Sakarya Continent. Such regions may generally be related to some tectonic events similar to the subduction zone on the seashores. However, it is not a direct subduction zone. It can be said that it is an important geological process for the formation of calcium-rich graphite. (Akçay and Beyazpirinç, 2017).

It provides high performance in electronics, battery production, graphene production and furnace lines.

It is used as a basic component in lithium-ion batteries. Graphite offers high electrical conductivity and chemical stability.

It is also being investigated for use in other energy storage systems such as sodium-ion batteries.

Thanks and Information Note

This study was supported by the Hadid Energy Industry Trade Limited Company”

References

- Akçay A. E. and Beyazpirinç M. (2017). The Geological Evolution Of Sorgun (Yozgat)-Yildizeli (Sivas) Foreland Basin, Petrographic, Geochemical Aspects And Geochronology Of Volcanism Affecting The Basin. Bull. Min. Res. Exp. (2017) 155: 1-31.
- Akıl B. 2005. Investigation of the geological and structural features of the Akdağmadeni Massive Metamorphites (Söbeçimen village-Yozgat). Journal of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University, Yerbilimleri, 26 (2), 41-53. ,
- İlhan, A., Sarı, R. ve Y. Çörtlenlioğlu. Y. 2020. “Avrupa İçin Yeni Bir Kaynak: Türkiye Grafit Oluşumları”, Madencilik Türkiye.

[www. sciencealpha.com/tr/graphite-types-grades-structure-properties-and-applications](http://www.sciencealpha.com/tr/graphite-types-grades-structure-properties-and-applications)

Yazıcı, M., Tiyek, İ., Ersoy, M. S., Alma, M. H. , Dönmez, U., Yıldırım B. , Salan T., Karataş, Ş., Uruş, S, Karteri, İ., ve Yıldız, K. 2016. Modifiye Hummers Yöntemiyle Grafen Oksit (GO) Sentezi ve Karakterizasyonu (Synthesis Of Graphene Oxide (GO) By Modified Hummer's Methods and Its Characterization). Gazi University Journal of Science GU J Sci Part C 4(2):41-48 (2016).

**TURKEY'S OIL SHALE POTENTIAL AND ENERGY FUTURE; SORGUN BASIN (YOZGAT)****Berna YAVUZ PEHLİVANLI** ¹⁻²

Yozgat Assoc. Prof. Dr. Bozok University, Department of Geological Engineering, 66900, Atatürk Road, Yozgat, Türkiye¹; (Responsible Author) ORCID: 0000-0003-0127-8525

Yozgat Bozok University Erdoğan Akdağ Campus, Bozok Technopark Inc., 219/1, Hadid Energy, Industry and Trade Ltd. Co. 66100 Yozgat, Türkiye²

Abstract

Turkey imports about 98% of its energy needs. To reduce dependence on foreign energy, Turkey can leverage both traditional and unconventional resources. Turkey's geological formations and tectonic activity provide significant potential, with estimated oil shale reserves of 1.641 billion tons, including 555 million tons of proven reserves.

Globally, oil shale has substantial energy potential, with world reserves estimated at around 4,000 billion tons, capable of producing 2 trillion barrels of oil. Oil production from oil shale utilizes techniques like in-situ and ex-situ retorting, enabling extraction of oil and natural gas.

Turkey has large potential oil shale reserves, but this resource has not yet been fully developed. However, it could play an important role in future energy strategies. Estonia, on the other hand, has smaller reserves but has been actively using oil shale for years. However, there are plans to reduce this use due to environmental concerns.

Sorgun Basin consists of Paleozoic, Campanian-Maastrichtian, Eocene, Miocene and Quaternary units. The oldest unit in the region is the granitic rocks known as Central Anatolian Granitoids. The Lower Eocene Çeltek Formation is layered on these granitoids. The Çeltek Formation consists of alternations of sandstone, claystone, coal and oil shale. The oil shale deposits in the Sorgun Basin are rich in organic matter and are considered to be rocks with high hydrocarbon content and can potentially be used for oil production. Geological studies and field samplings in this region show that the Çeltek Formation constitutes an important raw material source for oil and natural gas production.

Keywords: Energy independence, Oil şeyl, Çeltek Formation, Sorgun Basin, Türkiye

Introduction

Turkey's energy consumption relies heavily on imported resources, covering about 98% of its needs. This high dependence on foreign energy sources makes it crucial for Turkey to explore and develop both traditional and unconventional energy resources. One of the promising unconventional resources is oil shale, which has significant potential in Turkey due to its unique geological formations and active tectonic processes.

Globally, oil shale is recognized for its substantial energy potential, with estimated reserves of around 4,000 billion tons, capable of producing approximately 2 trillion barrels of oil. Countries like the United States, China, Brazil, and Estonia have harnessed oil shale for energy production. For example, the United States has vast oil shale deposits, primarily in the Green River Formation, while China has been investing heavily in oil shale technology. Brazil's Irati Formation and Estonia's Ordovician deposits are also noteworthy examples.

In comparison, Turkey's oil shale reserves are estimated at 1.641 billion tons, with 555 million tons being proven reserves. Despite having smaller reserves compared to global giants like the United States, Turkey has the potential to utilize these reserves to bolster its energy supply. Techniques such as in-situ and ex-situ retorting can be used to extract oil and gas from oil shale, making it a viable energy resource. The development of these reserves could play an essential role in Turkey's future energy strategy, providing a domestic source of oil and gas and reducing the need for imports.

Estonia, with its smaller reserves, has successfully integrated oil shale into its energy mix for years. However, due to environmental concerns, there are plans to reduce the use of oil shale in Estonia. Turkey can learn from Estonia's experience and implement sustainable practices in developing its oil shale resources.

Material and Method

Pyrolysis Device: The pyrolysis device used by TPAO is designed for the thermal decomposition of hydrocarbon-containing rock samples. The device is a fixed-bed system that includes all the components required for heating and analysis. The pyrolysis process is carried out in a nitrogen gas atmosphere using a temperature-controlled furnace.

Pyrolysis Process: The pyrolysis process involves the thermal decomposition of rock samples obtained from the Çeltek Formation. During this process, several parameters are obtained:

Total Organic Carbon (TOC): Determines the total amount of organic carbon present in the rock sample.

Tmax: The temperature at which the maximum hydrocarbon production occurs during pyrolysis, indicating the thermal maturity of the organic matter.

S1 Peak: Measures the amount of free hydrocarbons naturally present in the sample.

S2 Peak: Measures the amount of hydrocarbons generated by pyrolysis of kerogen.

S3 Peak: Measures the oxygen content of kerogen through CO₂ production.

Analysis and Tests: The pyrolysis data is used to evaluate the quantity and thermal maturity of the organic matter. These analyses help determine the hydrocarbon production potential of the rock samples. The TOC, Tmax, S1, S2, and S3 peak values are critical for assessing the quality and potential of the samples.

The results obtained from the pyrolysis process are essential for hydrocarbon exploration and development. Determining the organic content and hydrocarbon production potential of rocks provides valuable information for future energy strategies.

Geological Characteristics of the Sorgun Basin

The Sorgun Basin in Yozgat is an area of particular interest due to its rich oil shale deposits. The basin consists of geological units ranging from the Paleozoic to the Quaternary periods. The oldest rocks in the region are the Central Anatolian Granitoids, which form the foundation of the basin. Above these granitoids lies the Lower Eocene Çeltek Formation, which comprises sandstone, claystone, coal, and oil shale layers. These formations are rich in organic matter and high in hydrocarbon content, making them ideal for oil production (Erler and Bayhan, 1993; Dönmez et al., 2005) (Figure 1).

Geological studies and field samplings have shown that the Çeltek Formation in the Sorgun Basin holds significant potential as a raw material source for oil and natural gas production. The organic-rich layers of the formation indicate the presence of high-quality oil shale, which can be efficiently processed to extract hydrocarbons. This potential makes the Sorgun Basin a key area for future exploration and development in Turkey's energy sector.

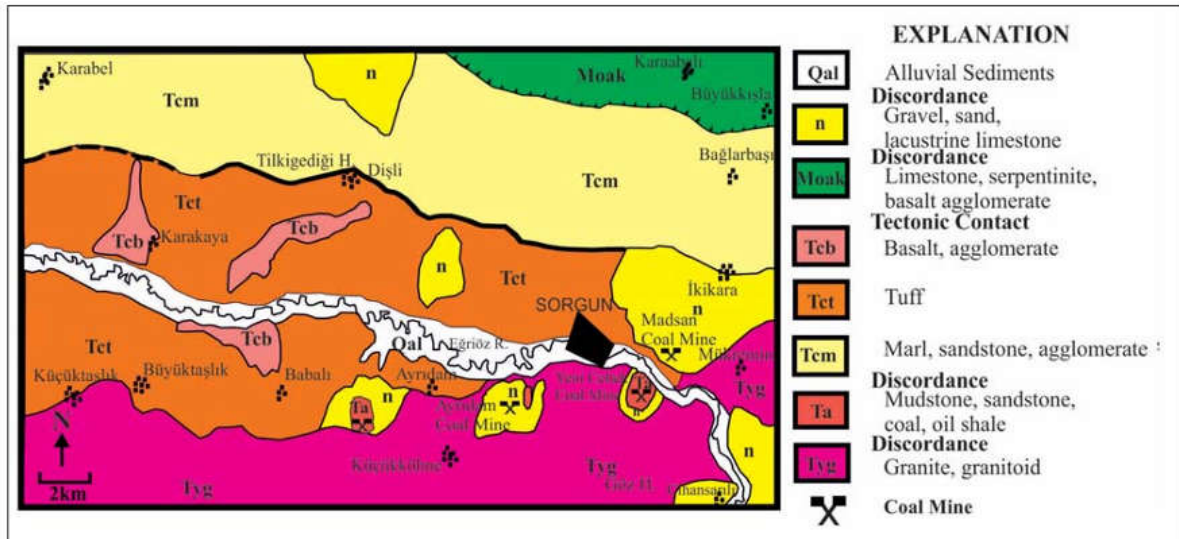


Figure 1. Geological map of the study area (Cicioğlu, 1995).

Detailed Geological and Organic Geochemical Analysis

The Sorgun Basin's geological complexity is characterized by the presence of various sedimentary sequences, which provide valuable insights into the paleoenvironmental conditions and depositional history. The Paleozoic units are primarily composed of granitic rocks that form the basement, which is overlain by sedimentary sequences from different geological periods, including the Campanian-Maastrichtian and Eocene epochs.

The Lower Eocene Çeltik Formation is particularly noteworthy due to its alternating layers of sandstone, claystone, coal, and oil shale. These sedimentary layers indicate a dynamic depositional environment with varying energy levels, suggesting periods of both marine and continental influence. The presence of coal and oil shale within the Çeltik Formation points to anoxic conditions during deposition, which are essential for the preservation of organic matter.

Organic geochemical analyses of the oil shale deposits in the Sorgun Basin reveal a high content of kerogen, predominantly of Type I and Type II, which are excellent precursors for oil generation. The hydrogen index (HI) and oxygen index (OI) values further support the high hydrocarbon potential of these shales. The thermal maturity of the organic matter, assessed through vitrinite reflectance measurements, indicates that the oil shale in the Sorgun Basin has reached the optimal window for oil generation.

Moreover, the basin's structural features, such as fault systems and folds, have played a significant role in the migration and accumulation of hydrocarbons. These tectonic activities have created traps and reservoirs that enhance the economic viability of oil and gas exploration in the region.

In conclusion, the detailed geological and organic geochemical characteristics of the Sorgun Basin underscore its potential as a significant source of oil shale and hydrocarbons. The Çeltik Formation, with its rich organic content and favorable depositional environment, stands out as a key target for future energy exploration efforts in Turkey.

Geological Formation of Oil Shales in the Çeltik Formation, Yozgat Sorgun Area

The Çeltik Formation, located in the Yozgat Sorgun area, is a geological formation that dates back to the Lower Eocene epoch (Yavuz Pehlivanlı 2019).. This formation is characterized by a sequence of sedimentary rocks, including sandstone, claystone, coal, and oil shale layers (Kök, 2024). The oil shale deposits within this formation are of particular interest due to their high organic content and potential for hydrocarbon production.

Depositional Environment

The oil shales in the Çeltek Formation were deposited under anoxic conditions, which are essential for the preservation of organic matter (Yavuz Pehlivanlı 2019). During the Eocene epoch, the region experienced variable paleo-environmental conditions, including periods of both marine and continental influence (Yavuz Pehlivanlı 2019). The presence of coal and oil shale within the formation indicates that the depositional environment alternated between high and low energy levels (Kök, 2024).

Organic Matter and Hydrocarbon Potential

The organic matter in the Çeltek Formation oil shales is predominantly of Type I and Type II kerogen, which are excellent precursors for oil generation (Kök, 2024). Geochemical analyses, such as Total Organic Carbon (TOC) measurements, reveal high organic content in these shales, with TOC values ranging from 1.97 to 16.17 wt% (Yavuz Pehlivanlı 2019). The high TOC values indicate a significant potential for hydrocarbon production (Figure 2) (Table 1).

Thermal Maturity and Hydrocarbon Generation

The thermal maturity of the organic matter in the Çeltek Formation oil shales is assessed through parameters such as Tmax and vitrinite reflectance. Tmax values indicate the temperature at which maximum hydrocarbon production occurs during pyrolysis, while vitrinite reflectance measurements provide insights into the thermal maturity of the organic matter (Kök, 2024). The oil shales in this formation have reached the optimal window for oil generation, making them suitable for hydrocarbon extraction.

Structural Features and Hydrocarbon Migration

The structural features of the Çeltek Formation, including fault systems and folds, play a significant role in the migration and accumulation of hydrocarbons. These tectonic activities have created traps and reservoirs that enhance the economic viability of oil and gas exploration in the region (Kök, 2024).

Type II kerogen is very important in terms of oil generation potential. This type of kerogen is found in rocks containing organic matter and is generally detected in bituminous rocks and organic-rich sediments. Type II kerogen contains carbon, hydrogen and nitrogen among the main elements and this composition provides a suitable potential for oil formation.

Oil Generation Potential of Type II Kerogen

Organic Matter Content: Type II kerogen is known for its high organic matter content. This makes rocks very valuable in terms of oil generation potential. Organic matter content is usually measured by Total Organic Carbon (TOC) value and this value is critical for determining the oil potential of rocks.

Thermal Maturity: The oil generation potential of Type II kerogen depends on the thermal maturity level. Parameters such as vitrinite reflectance and Tmax values determine the thermal maturity level of kerogen. The optimal thermal maturity level provides the highest efficiency in oil generation.

Hydrocarbon Generation: Type II kerogen, pyrolysis and gas chromatography (GC) analyses are used to evaluate the hydrocarbon production potential. The analysis of S1, S2 and S3 peaks measures the hydrocarbon production of rocks. Especially the S2 peak value means that kerogen contributes to oil formation.

Depositional Environment: The formation environment of Type II kerogen also affects the oil generation potential. Generally, rocks formed in anoxic (not rich in oxygen) conditions preserve organic matter better and increase the oil generation potential.

Economic Viability: The oil generation potential of Type II kerogen should also be evaluated economically. Oil productivity determines the economic exploitability of rocks. This is evaluated with factors such as oil prices, costs and technological capacities.

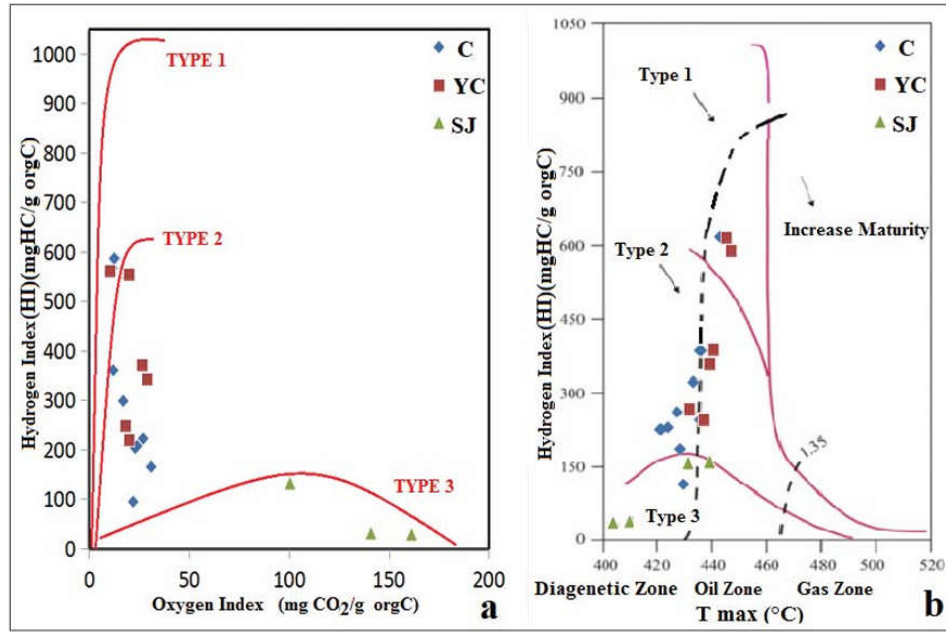


Figure 2 a- Characterization of organic matter in HI vs. OI diagram (Espitalie et al., 1977); **b-**Plot of Hydrogen Index (HI) vs. Tmax of the ÇFOS samples (Mukhopadhyay et al., 1995, Yavuz Pehlivanlı 2019).

Table 1. Tmax limit values of Sorgun oil shales according to kerogen types (Espitalie et al., 1984, Yavuz Pehlivanlı 2019).

Type I	Type II	Type III	Degree of Maturation	Sample	TMAX (°C)
	<425 °C	<435 °C	Immature-Early Mature	C	418-436
440-448 °C	425-450 °C	435-465 °C	Oil window	YC	427-439
	>450 °C	>465 °C	Gas window	SJ	404-433

Conclusion

The Çeltek Formation in the Yozgat Sorgun area emerges as a significant geological formation for oil shale exploration and production. Its high organic content, favorable depositional conditions, and optimal thermal maturity make it a prime candidate for future hydrocarbon extraction. The detailed geological and geochemical studies indicate that this region holds substantial potential for energy resource development, positioning it as a key target for Turkey's energy strategy.

Furthermore, Turkey's considerable oil shale reserves, estimated at 1.641 billion tons with 555 million tons being proven, offer a promising avenue to bolster the country's energy independence. By harnessing these reserves, Turkey can significantly reduce its reliance on imported energy, thus enhancing its energy security. The Sorgun Basin, with its rich deposits of oil shale, provides an excellent opportunity for exploration and production activities. Utilizing advanced extraction techniques, such as in-situ and ex-situ retorting, and drawing lessons from global leaders in oil shale utilization, Turkey can sustainably develop this resource.

Type II kerogen is very important in terms of oil generation potential. High organic matter content, optimal thermal maturation level and suitable depositional conditions provide high potential for oil production of this kerogen. Therefore, rocks containing Type II kerogen play an important role in energy exploration and development projects.

Investing in the development of oil shale resources not only supports Turkey's energy needs but also contributes to economic growth by creating jobs and reducing energy import costs. Sustainable practices and modern technologies will ensure that this development aligns with environmental considerations, making it a viable long-term strategy.

In summary, the Çeltek Formation and the broader Sorgun Basin hold the key to unlocking Turkey's oil shale potential. By effectively leveraging these resources, Turkey can achieve a more secure and independent energy future, paving the way for sustainable economic and industrial development.

References

- Dönmez, M., Bilgin, Z. R., Akçay, A. E., Kara, H., Yergök, A. F., Esentürk, K. 2005. Türkiye Jeoloji Haritaları, Kırşehir-İ31 Paftası, No: 46, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- Erler, A., Bayhan, H. 1993. Orta Anadolu Granotoidleri, Hacettepe Üniversitesi, Yer Bilimleri 25. Yıl Sempozyumu, Tebliğ, 20. Sayfa, Ankara.
- Espitalie, J., Madec, M., Tissot, B., Mennig, J.J., Leplat, P. 1977. Source rock characterization method for exploration: Proceedings, Ninth Annual Offshore Technology Conference, Vol. 3, p. 439-444.
- Espitalie, J., Marquis, F., Borsony, I. 1984. Geochemical logging, in Voorhees, K. J., ed., Analytical pyrolysis: London, Butterworth and Co., Ltd., p. 276-304.
- Kök, MV. (2024). Geochemical and thermal characterization and kinetics of oil shale samples from Çeltek, Türkiye. *Oil Shale*, 2024, Vol. 41, No. 2, pp. 103–114
- Mukhopadhyay, P. K., Wade, J. A., Kruger, M. A. 1995. Organic Facies and Maturation of Jurassic/ Cretaceous Rocks and Possible Oil-Source Rock Correlation Based on Pyrolysis of Asphaltenes, Scotian Basin, Canada. *Organic Geochemistry*, Vol. 221, pp. 85-104.
- Yavuz Pehlivanlı, B. 2019. Factors controlling the paleo-sedimentary conditions of Çeltek oil shale, Sorgun-Yozgat/Turkey. *Bull. Min. Res. Exp.* (2019) 158: 251-263.

THERMOMECHANICAL STRESS ANALYSIS OF A MOTORCYCLE BRAKE DISC UNDER PREDEFINED CONDITIONS USING FINITE ELEMENT METHOD**Ahmet DAYANÇ**

Research Assistant, Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya-Turkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0002-5214-9021

Feridun KARAKOÇ

Assistant Professor, Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya-Turkiye, ORCID: 0000-0002-6210-4070

Abstract

Thermomechanical stresses refer to the stresses and deformations that materials experience under thermal and mechanical loads. In this study, a motorcycle brake disc was designed using the implicit modeling method with the “nTop” software. Thermal stress analyses of the brake disc were performed under predefined conditions with various parameters such as disc rotation speed, braking pressure, and braking temperature. For thermal stress analysis, the temperature scalar field (that is output from linear or non-linear thermal analyses) was used, and the material’s isotropic thermal expansion property was necessary and defined for this analysis. As a result of the study, thermomechanical effects were measured, and values such as temperature, displacement, and Von Mises stress were obtained. These outputs are critically important for evaluating the performance and reliability of the brake disc. The temperature distribution helps in understanding the impact of thermal loads on the disc, while displacement data allows for determining the extent of deformations. The von Mises stress indicates how close the material is to its yield limit, thereby assessing whether structural integrity is maintained. Through these analyses, optimizations can be made in the design of the brake disc, thereby enhancing safety and performance. Accurate and detailed thermomechanical analyses are of vital importance, especially in applications where high temperatures and mechanical loads are involved.

Keywords: Implicit Modeling, Motorcycle Brake Disc, Thermomechanical Stress Analysis**INTRODUCTION**

In modern times, regardless of whether one uses a car, motorcycle, or bicycle, the design of braking systems plays a critical role in terms of safety and driving comfort (Preda & Bleotu, 2022). Brake discs, in particular, operate under highly complex thermomechanical loads due to factors such as high rotational speeds, sudden decelerations, and repeated braking cycles (García-León, Quintero-Quintero, & Rodríguez-Castilla, 2020). These loads challenge the structural integrity by combining both thermal and mechanical effects. The resulting temperature increases cause expansion, deformation, and structural stresses within the material, which directly affect the service life, performance, and safety of the brake disc. Consequently, effective analysis of thermomechanical stresses forms the foundation of a multifaceted process ranging from the initial design and material selection to manufacturing methods and performance optimization of brake discs.

Computational Engineering methods, particularly the Finite Element Method (FEM), offer a widely used and effective tool for evaluating thermomechanical loads (ANSYS Innovation Courses, 2024). Through FEM-based analyses, detailed examinations of temperature distributions, mechanical stresses, and displacements can be carried out on brake discs with various geometries and material properties. In this study, we utilized the nTop software, which employs “implicit modeling” technology, thereby surpassing traditional CAD-based modeling approaches (nTop, 2022). By defining the thermal expansion coefficient of the material and applying the necessary boundary conditions within the nTop software, it becomes possible to conduct thermomechanical stress analyses (nTop Support, 2024). In this way, it is feasible to create parametric, repeatable, and optimizable models that encompass the entire process from design to analysis.

Motorcycle brake discs are typically manufactured from materials such as stainless steel, which exhibit high strength and tolerance to elevated temperatures (Brembo, 2024). Considering the thermal expansion properties of these materials is critical to maintaining structural integrity and achieving a long-lasting design. Identifying temperature fields under predefined conditions—such as the disc’s rotational speed, braking pressure, ambient and braking temperatures—reveals potential weak points in the design. The resulting temperature distributions enable the detection of high-stress regions on the disc, guiding improvements ranging from material selection to geometric optimization in order to maintain structural integrity.

This study examines thermomechanical stress analyses on a motorcycle brake disc designed using the implicit modeling techniques of nTop software under defined conditions. By specifying various boundary conditions on the prepared model, the displacements and Von Mises stresses induced by thermal and mechanical effects on the disc were investigated. In light of the obtained results, the critical role of thermomechanical effects on the behavior of the disc has been clearly demonstrated. Thus, this research offers a detailed assessment of how the reliability, performance, and design optimization of brake discs, operating under high temperature and mechanical load conditions, can be evaluated. Such an approach can serve as a guiding principle for developing more efficient, safer, and longer-lasting brake discs at the early stages of the design cycle.

MATERIALS AND METHODS

The first stage of this study involved designing the 3D model necessary for the thermomechanical stress analysis. Motorcycle brake discs vary in terms of diameter, thickness, material, and mounting holes. In the initial design phase, after defining the basic dimensions of the disc, an “Array” function block was employed to create a specified number of mounting holes and perforations on the disc at defined angle intervals. In Figure 1 below, the gray models represent the stages of the design process, while the yellow models show the final geometry from various angles.

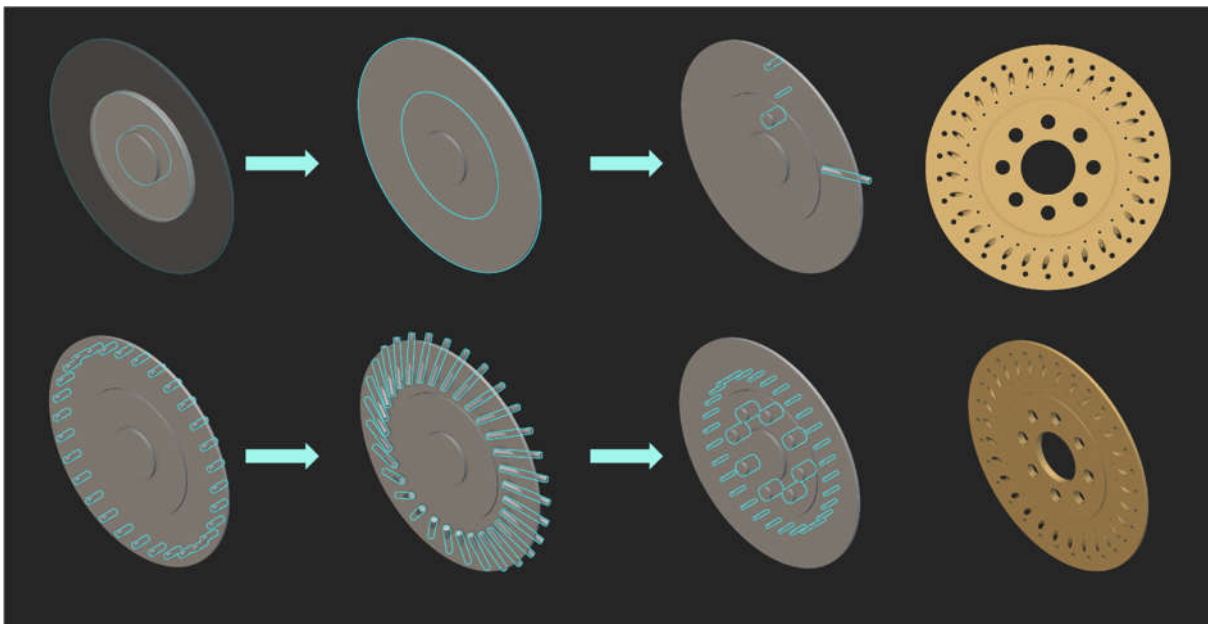


Figure 1. Design Steps of Motorcycle Brake Disc

After completing the design, it is necessary to set up the model for analysis. As a first step, a surface mesh must be generated for the prepared implicit model (nTop Support, 2023). The surface mesh should then be evaluated based on mesh metrics (Prasad, 2022). Additionally, to ensure that results are independent of the mesh size, the mesh parameters must be carefully selected. Naturally, a higher number of mesh elements increases the time required for analysis completion. Once the surface mesh is created, a volume mesh should be generated, and nodes should be assigned to create a Finite Element (FE) Volume Mesh. In this study, 316 Stainless Steel was selected as the material, and in addition to the predefined thermal properties and linear

elastic properties available in the material library, the thermal expansion coefficient was defined (Prasad, 2024). For the boundary conditions, “Forced Convection Coefficient,” “Disc Rotational Speed,” “Ambient Temperature,” “Brake Temperature,” “Brake Pressure,” “Applied Temperature Load,” and “Displacement Restraint” were specified. The values for these boundary conditions are listed below:

- Forced Convection Coefficient: 97 W/m²K
- Disc Rotational Speed: 145 rad/s
- Ambient Temperature: 293.15 K
- Brake Temperature: 453.15 K
- Brake Pressure on Disc: 1e+06 Pa
- Applied Temperature Load: Input is “Temperature Field” from Steady-State Linear Thermal Analysis Result
- Displacement Restraint: “Mounting Holes”

For comparison purposes, two different sets of boundary conditions were utilized, and two separate analyses were performed.

RESULTS AND DISCUSSION

The purpose of conducting two different analyses was to determine the effect of thermal loading. In the scenario without thermal loading, where only mechanical effects were considered, it was observed that the displacement in the disc was approximately 55 microns. However, when thermal loading was taken into account together with mechanical effects, the displacement in the disc reached approximately 520 microns. Figure 2 below presents the analysis results.

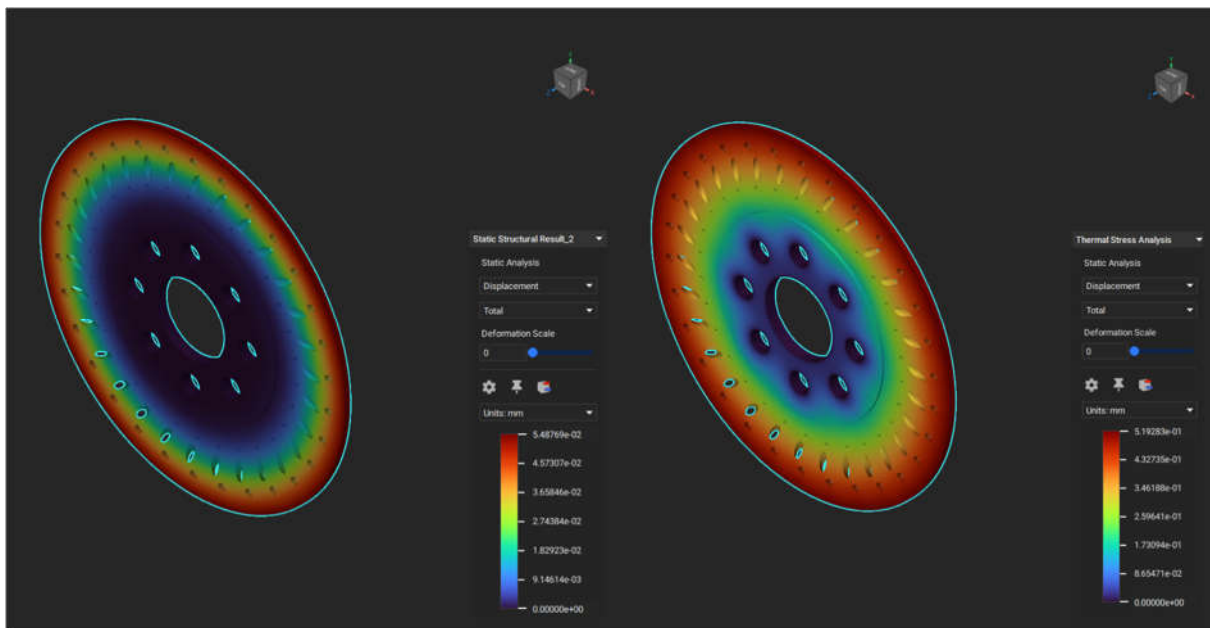


Figure 2. Thermal Analysis Results (without Thermal Loads (left) vs. with Thermal Loads (right))

Moreover, when the results of the mathematical calculations were compared with the analysis results, consistency was observed. By assuming linear expansion of the disc along a single axis—based on the material’s expansion coefficient, temperature difference, and disc radius—and adding this calculated expansion to the deformation resulting from mechanical effects, the final values obtained from the analysis proved to be consistent (OpenStax, 2021). Consequently, the necessity for more detailed analyses in scenarios involving thermal loads becomes evident, underscoring the importance of thermomechanical stress analysis

for predicting potential issues in real-life applications. Otherwise, the coherence of the analyses would be significantly reduced, and the likelihood of forecasting potential problems in advance would decrease.

THANKS AND INFORMATION NOTE

This study was carried out using the workstation made available through the DPU BAP 2023-27 Scientific Research Project. We express our deepest gratitude to the nTop team for providing the license.

REFERENCES

- ANSYS Innovation Courses. (2024). Performing a Thermal-Stress Analysis - Lesson 6. Retrieved December 11, 2024, from <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/structural-boundary-conditions/lessons/performing-a-thermal-stress-analysis-lesson-6/>
- Brembo. (2024). Bike Discs. Retrieved December 11, 2024, from <https://www.brembo.com/en/bike/replacement/discs>
- García-León, R. A., Quintero-Quintero, W., & Rodriguez-Castilla, M. (2020). Thermal analysis of three motorcycle disc brakes. *Smart and Sustainable Built Environment*, 9(2), 208–226. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2019-0098/FULL/PDF>
- nTop. (2022). Next-Gen Engineering Design Software. Retrieved December 8, 2024, from <https://www.ntop.com/>
- nTop Support. (2023). What is a mesh? Retrieved December 11, 2024, from <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/1500002958561-What-is-a-mesh>
- nTop Support. (2024). How to run a thermal analysis. Retrieved December 11, 2024, from <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/360052704313-How-to-run-a-thermal-analysis>
- OpenStax. (2021). 1.3 Thermal Expansion - University Physics Volume 2. Retrieved December 11, 2024, from <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-3-thermal-expansion>
- Prasad, A. (2022). nTopology 3.24 - What's New? – nTop. Retrieved August 20, 2023, from <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/5810013175699-nTopology-3-24-What-s-New->
- Prasad, A. (2024). How to create a material. Retrieved December 11, 2024, from <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/360063644233-How-to-create-a-material>
- Preda, C., & Bleotu, R.-M. (2022). Modeling and Analysis of Thermal Behaviour for Brake Discs. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine Constructions Section*, 68(2), 25–40. <https://doi.org/10.2478/BIPCM-2022-0012>

DESIGN OF A DIAMOND TPMS HEAT SINK USING IMPLICIT MODELING: COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES**Ahmet DAYANÇ**

Research Assistant, Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya-Turkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0002-5214-9021

Feridun KARAKOÇ

Assistant Professor, Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya-Turkiye, ORCID: 0000-0002-6210-4070

Abstract

A heat sink is a component designed to transfer heat from electronic devices to the surrounding environment, thereby preventing overheating. Typically manufactured from materials with high thermal conductivity, heat sinks are designed to maximize surface area for enhanced heat dissipation. In this study, a Diamond TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) heat sink was designed using nTop software, leveraging the software's implicit modeling approach. This approach enables the creation of complex geometries with smooth transitions and optimized structures, which are difficult to achieve using traditional modeling techniques. By utilizing implicit modeling, the Diamond TPMS structure was tailored to maintain the same design volume as the Alutronic PR218 standard heat sink while significantly improving its thermal performance. The designed Diamond TPMS heat sink is 3.72% lighter and offers 54% more surface area compared to the PR218. Although radiation heat transfer typically requires non-linear thermal analysis, this study focuses solely on heat transfer through convection to simplify the analysis. The simulation results indicate that at thermal equilibrium, the temperature drop is 15°C for the Diamond TPMS heat sink and 18°C for the PR218. However, despite the slightly smaller temperature drop, the Diamond TPMS heat sink provides a significantly larger cold surface area. This larger surface area enables a more uniform heat flux distribution, enhancing the overall thermal performance of the system. In conclusion, the integration of implicit modeling via nTop software allowed for the design of a heat sink with superior surface characteristics and optimized weight. The findings suggest that TPMS-based designs hold significant potential for applications requiring efficient thermal management in compact and lightweight configurations.

Keywords: Diamond TPMS, Heat Sink, Implicit Modeling, Thermal Analysis**INTRODUCTION**

Heat sinks are developed to prevent overheating by transferring heat from electronic components to the surrounding environment. These structures, produced from materials with high thermal conductivity, focus on improving heat dissipation by maximizing surface area. Traditional designs typically consist of relatively simple geometries with limited complexity within a given material volume. However, the increasing demands for higher performance, more compact sizes, and more efficient cooling in electronic systems have led to new research avenues in heat sink design (Rahman, Hasnain, Paramasivam, & Ayanie, 2024). In this context, Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)-based structures offer significant advantages compared to conventional fin-like designs. TPMS geometries are cellular structures composed of complex surfaces that repeat periodically in three-dimensional space (Parametric House, 2024). By achieving a substantially large surface area within a unit volume, TPMS structures can enhance convective heat transfer conditions. As a result, the surface area-to-volume ratio is significantly increased, allowing for optimized heat transfer performance. For the design of TPMS geometries, implicit modeling software such as “nTop” can be employed (nTop Support, 2024).

Unlike traditional CAD software, implicit modeling represents geometries in a distance field (nTop Blog, 2019). This approach facilitates defining TPMS geometries via parameters. Implicit modeling software like nTop allows for very rapid design iterations on models that automatically update when parameters are changed. Adjustments to various TPMS unit cell types (such as Gyroid or Diamond), cell sizes, or thicknesses can be achieved by simply modifying a few parameters. Thus, a wide range of design variants can be produced in a

short time. Moreover, the time and cost required for experimental prototyping and testing design variations can be reduced. Complex topological transitions, multi-layer functional gradients, and intricate cellular structures can be modeled more efficiently using the implicit modeling approach. In this study, a Diamond-type TPMS heat sink was designed using the implicit modeling technology of nTop software. Figure 1 presents the appearance and mathematical equation of a single Diamond TPMS unit cell.

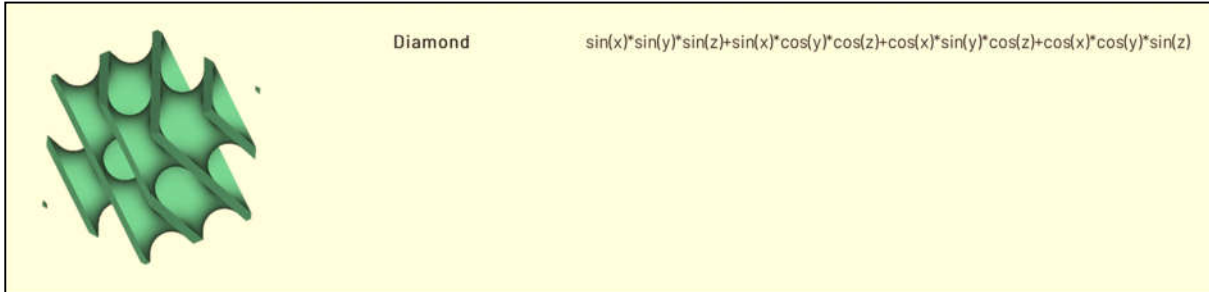


Figure 1. Diamond TPMS with Equation

Since TPMS structures inherently possess a high surface area-to-volume ratio, they can increase convective heat transfer. In such structures, as the thermal load is distributed over a wide surface area within a given volume, cooling efficiency is enhanced. The ability to parametrically adjust porosity ratios and cell sizes provides significant design freedom to achieve the desired convection performance. Consequently, the use of TPMS-based elements is being considered for a wide range of applications, from electronic cooling devices (such as CPU/GPU coolers) to industrial heat exchangers (Dayanç, Canlıdınç, & Karakoç, 2023).

Additionally, metal additive manufacturing technologies enable the production of complex internal geometries that are difficult or impossible to realize using conventional methods. TPMS heat sinks can surpass traditional planar fins, featuring extensive and intricate surfaces as well as a porous structure. Thus, using 3D printing technology, TPMS heat sinks can be produced from aluminum or copper alloys with high thermal conductivity. This development opens new design horizons in aerospace, aviation, automotive, and high-performance electronic component cooling applications, making it possible to achieve high cooling performance despite weight and space limitations. Moreover, TPMS structures are inherently self-supporting (Chouhan & Gunji, 2023). As a result, the additional support structures commonly required for metal additive manufacturing can be minimized or even completely eliminated. Consequently, the need for post-processing operations is significantly reduced. This leads to less material waste, lower labor costs, and cleaner surface quality, ensuring an efficient production process at an industrial scale.

Overall, this approach facilitates the straightforward definition of complex transitions, topological variations, and parametric changes that are difficult to achieve with conventional methods. Alutronic PR218 is a standard heat sink used in the industry (Alutronic, 2022). In this study, while maintaining the same design volume as the Alutronic PR218 standard heat sink, a Diamond-type TPMS structure achieved a larger surface area, a relatively lighter weight, and optimized thermal performance. As a result, combining implicit modeling and TPMS geometries introduces innovations in the design of electronic cooling components. This approach may serve as an effective solution for applications that require high performance, confined design volumes, and a focus on lightweight structures. The findings obtained in this study indicate that TPMS-based designs hold significant potential for future cooling technologies.

MATERIALS AND METHODS

The design and analysis process of this study consisted of several stages. The CAD model for the PR218 standard heat sink is available from the manufacturer and is openly accessible. A cylindrical arrangement and spatial modifications were applied to the Diamond TPMS heat sink. The volume in which the TPMS unit cells were designed is equivalent to that of the PR218, and they are placed on a plate around a central column. Figure 2 presents both the Diamond TPMS design and the PR218 design.

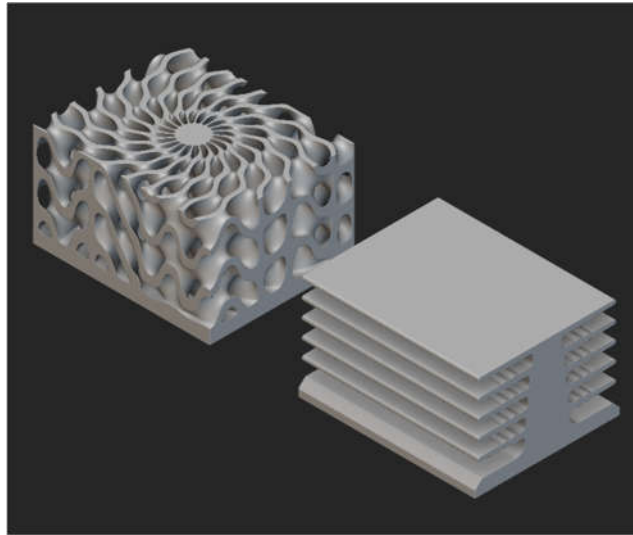


Figure 2. Diamond TPMS Heat Sink and PR218 Standard Heat Sink

For the analysis, both implicit models were meshed, and careful parameter adjustments ensured mesh independence. Approximately 10,000,000 volumetric mesh elements were used. A temperature of 120°C was defined as a boundary condition, and convection surfaces were selected in the designs with a convection coefficient of 15 W/m²K. Additionally, the meshes of the heat source component and the heat sink were separate, and the contacting surfaces were connected using an FE Connector for the analysis. Due to the limited surface emissivity values of the selected AlSi10Mg material, radiation effects were neglected, and only convection boundary conditions were considered. Thus, a steady-state linear thermal analysis was sufficient, simplifying the process and reducing computation time despite the high number of mesh elements.

RESULTS AND DISCUSSION

Heat sinks are designed to prevent overheating by transferring heat from electronic components to the surrounding environment. Typically manufactured from materials with high thermal conductivity, these devices require a large surface area to enhance heat dissipation. In this study, a Diamond-type TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) heat sink—featuring complex topological properties that are extremely difficult to create with conventional geometric modeling techniques—was designed using the implicit modeling approach provided by nTop software. With this approach, while maintaining the same design volume as the standard Alutronic PR218 heat sink, the surface characteristics and thermal performance could be significantly improved.

Compared to the PR218, the resulting Diamond TPMS heat sink is 3.72% lighter and offers a 54% increase in surface area. This enhancement and geometric design enabled a more evenly distributed heat flow across the cooling surface. In this study, due to the low emissivity value and the exclusion of radiation-based heat transfer, only convective heat transfer was considered, thereby simplifying the calculations. Under thermal equilibrium, the temperature drop measured was 15°C for the Diamond TPMS heat sink and 18°C for the PR218. Although the Diamond TPMS structure's temperature drop was slightly lower than that of the PR218, the increased availability of cooler surface area improves the system's overall thermal performance and enables a more uniform distribution of heat flux. Figure 3 shows the temperature fields.

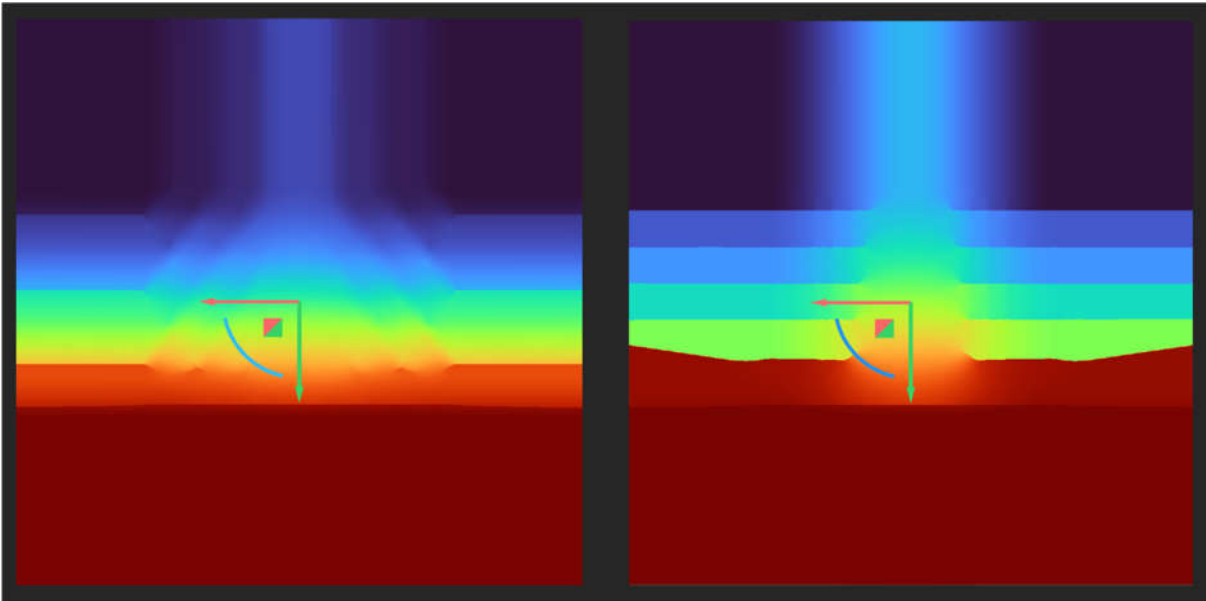


Figure 3. Temperature Fields (Diamond TPMS (left) vs. PR218 (right))

The integration of implicit modeling software with analysis software (e.g., Ansys) and metal additive manufacturing printers (e.g., EOS) accelerates the design-analysis-production cycle. Design alternatives obtained through parametric variations can be analyzed immediately and then converted into production data for rapid prototyping. Feedback from test results can be used to optimize the input parameters in the design. This end-to-end integration creates seamless information flow among designers, analysts, and manufacturing engineers, enabling innovative solutions to be developed at lower cost, shorter lead times, and with higher accuracy.

In conclusion, the freedom provided by the implicit modeling approach enabled the design and analysis of the Diamond TPMS heat sink. The capabilities of additive manufacturing, in turn, can facilitate its production and implementation. These findings indicate that TPMS heat sink designs hold significant potential for applications requiring compact form factors and effective thermal management. Indeed, this approach may pave the way for high-performance, flexible, and versatile thermal management solutions in the future.

THANKS AND INFORMATION NOTE

This study was carried out using the workstation made available through the DPU BAP 2023-27 Scientific Research Project. We express our deepest gratitude to the nTop team for providing the license.

REFERENCES

- Alutronic. (2022). PR 218. Retrieved December 11, 2024, from <https://alutronic.de/en/products/standardprofile/pr-218/>
- Chouhan, G., & Gunji, B. M. (2023). Additive manufacturing TPMS lattice structures: Experimental study on airflow resistivity. *Results in Materials*, 20, 100478. <https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2023.100478>
- Dayanç, A., Canlıdınç, M., & Karakoç, F. (2023). AN INNOVATIVE METHODOLOGY TO DESIGN GYROID HEAT EXCHANGERS FOR METAL ADDITIVE MANUFACTURING. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(3), 478–484. <https://doi.org/10.46519/IJ3DPTDI.1365189>
- nTop Blog. (2019). B-rep vs. implicit modeling: Understanding the basics. Retrieved December 11, 2024, from <https://www.ntop.com/resources/blog/understanding-the-basics-of-b-reps-and-implicit/>
- nTop Support. (2024). How to create a TPMS from an equation. Retrieved December 11, 2024, from <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/4403371438611-How-to-create-a-TPMS-from-an-equation>

Parametric House. (2024). Periodic Minimal Surface. Retrieved December 11, 2024, from <https://parametrichouse.com/periodic-minimal-surface/>

Rahman, M. A., Hasnain, S. M. M., Paramasivam, P., & Ayanie, A. G. (2024). Advancing thermal management in electronics: a review of innovative heat sink designs and optimization techniques. *RSC Advances*, 14(43), 31291–31319. <https://doi.org/10.1039/D4RA05845C>

**RARE EARTH ELEMENT RECOVERY FROM KEMIKLITEPE (KARAMAN-TURKEY)
BAUXITE ORE BY WATER LEACHING****Turan UYSAL**

Doç. Dr., Gümüşhane University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mining Engineering,
Gümüşhane-Türkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0003-1643-6725

Esra ÇIRAK

Graduate Student, Gümüşhane University, Faculty of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety,
Gümüşhane-Türkiye, ORCID: 0009-0000-7781-8482

Abstract

High-silica bauxite ores are not technically suitable for the Bayer process. Various methods exist for processing these ores, with acid leaching being one of the most promising approaches. This study investigated the recoverability of Rare Earth Elements (REE) from Kemiklitepe bauxite ore (Karaman, Türkiye), which is rich in REE and unsuitable for the Bayer process due to its high silica content. The ground bauxite ore was subjected to roasting with Na_2CO_3 as an alkali at temperatures ranging from 800-1000 °C, followed by water leaching processes on the roasted bauxite. At 950 °C roasting temperature, total-REE recovery and Al_2O_3 recovery from the roasted ore were found to be 67% and 90%, respectively. The findings suggest that bauxite ores with high silica content can be effectively utilized through alkali roasting and water leaching processes.

Keywords: Bauxite, Roasting, Leaching, Alumina, Rare Earth Element.

1. Introduction

The mass ratio between the amount of alumina (Al_2O_3) and reactive silica (SiO_2) content, known as the silica modulus, is of critical importance in the Bayer process for metallurgical-quality bauxite ores. If the silica modulus is too high, it results in serious loss of alumina and caustic soda, making it economically unviable for the Bayer process. Therefore, it is essential to maintain the silica modulus of the ore entering the process at an optimal value. Although the optimum modulus varies depending on the bauxite type and technical economic conditions, the lower limit average is generally accepted as approximately 7-8. Good quality bauxites typically have a modulus value of over 10, but these deposits are limited in number, and their reserves are decreasing. In contrast, low-modulus bauxite ores are more abundant and create larger reserves. However, because of their high silica content, their direct use in the Bayer process is not feasible. Some researchers have developed methods to address the problems caused by the high silica content in bauxite; however, the application of these methods poses technical and economic challenges that have yet to be fully resolved. Consequently, efficient development and utilization of high-silica bauxite has become an urgent and important challenge for the alumina industry (Sun et al., 2023).

Considering global commodity supply and demand, REEs are among the most critical raw materials (EC, 2023). REEs are widely used in the production of many advanced technological devices and equipment such as permanent magnets (electric vehicles, solar panels, and wind turbines), electronic devices, rechargeable batteries (NiMH batteries), and modern medical devices (Krishnamurthy and Gupta, 2016; USGS, 2021; Ünal et al., 2023). Therefore, countries use red mud with low U and Th contents (Borra et al., 2016) and thermal power plant residue fly ashes (Jha et al., 2016), especially ionic clays (Yang et al., 2013; Papangelakis et al., 2014) have sought REE production from secondary geological sources, such as bauxite (Valeev et al., 2023) and bauxite-related ores (Öztürk et al., 2019; Uysal et al., 2023). In this study, the recovery of REE from bauxite ores, which cannot be technologically used in the Bayer process because of their high silica content, was investigated. In this context, Kemiklitepe bauxite ore was evaluated in terms of sustainable resource use using the water leaching method.

2. Material and Method

2.1. Material

Bauxite ore was obtained from the Kemiklitepe (Ayrancı, Karaman) deposits located in the Bolkaradağları section of the Taurus Mountains between Mersin and Karaman. Kemiklitepe bauxite ore was taken as a representation from the crushing-screening facility of Demireller Mining Inc.

2.2. Methods

2.2.1. Size reduction process

Owing to the high hardness of the approximately -2 mm sized ore taken from the crushing-screening facility, it was ground to 300 µm in size using a steel ball mill. The ground ore was sieved using ASTM E-11 type test sieves. The ore, whose size reduction process was completed, was divided into six homogeneous equal amounts using a rotary sampler and stored in bags for use in experiments.

2.2.2. Alkali roasting

To obtain significant Al extraction from diasporitic bauxites, high temperature (>250 °C) and high alkali concentration (>200 g/L Na₂O) are required. Alkaline roasting reduces the sintering temperature, resulting in a lower sintering energy consumption. Na₂CO₃ is very economical and is generally used in the industry. The ore samples were mixed with Na₂CO₃ before alkaline roasting to contribute to ore dissolution. Dosage of sintering additives is generally determined according to the content of the main components in bauxite. In the traditional lime-soda sintering process, the Na₂CO₃ and CaO dosages are controlled by the molar ratios of Na₂O/Al₂O₃ ~1 and CaO/SiO₂ ~2, respectively, to ensure the formation of NaAlO₂ and Ca₂SiO₄ (Le et al., 2019; Pei et al. 2021). In this study, both Al₂O₃ and SiO₂ reacted with Na₂CO₃ in the absence of CaO. Therefore, the Na₂O/(Al₂O₃ + SiO₂) molar ratio was used as an indicator to control Na₂CO₃ dosage. The mixture was prepared with a Na₂O/(Al₂O₃ + SiO₂) molar ratio of 1, based on a previous study (Sun et al., 2023).

2.2.3. Acid leaching

The leaching process was carried out in a 500 cm³ glass flask placed in a flask heater device (Weightlab) with a bed volume of 500 cm³, using a 200±10 cm³ solution that could be mixed with a magnetic stirrer under reflux, with a mechanism set up in a fume hood, where the solution temperature was constantly monitored. Because the balloon heater also has magnetic stirring, an external stirrer is not required for the mixing process. At the end of the leaching period, the heating and mixing mechanisms were stopped immediately, and solid-liquid separation was performed by vacuum filtration of the loaded leaching solution. After the volume of liquid samples was recorded, they were placed in lidded plastic containers and stored in a refrigerated cabinet, whereas solid samples were placed in another lidded plastic container after weighing. The metals recoveries calculated based on following Equation 1.

$$R = \frac{C_1 \times V}{C_f \times M} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Where C₁ is the metal concentration in PLS (g/l), V is the volume of leaching test (l), C_s is metal content in concentrate and w is weight of metal concentration used in leaching experiment (g).

3. Findings and Discussion

3.1. Characterization of Kemiklitepe Bauxite Ore

The mineralogical content of the Kemiklitepe bauxite ore was determined by XRD analysis, as shown in Fig. 1. Accordingly, the main minerals found in the ore were diasporite (α-AlOOH), quartz (SiO₂), albite (NaAlSi₃O₈), and anatase (TiO₂). ICP analysis of Kemiklitepe bauxite ore was carried out in ALS Global Analysis Laboratories which is a combination of ICP-AES for major oxides (%) and ICP-MS analyzes for REE (ppm) analysis, was applied. The ICP-AES and ICP-MS analysis result is given in Table 1.

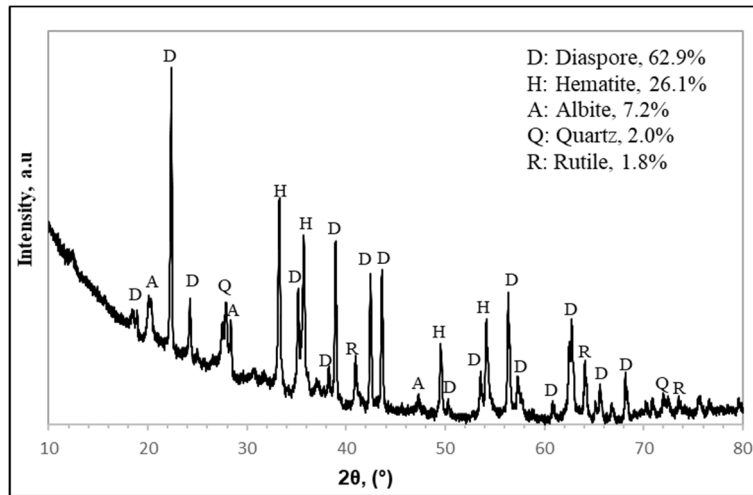


Figure 1. XRD pattern of Kemiklitepe bauxite ore

From the results of the mineralogical analysis, it is clear that the source of Al_2O_3 is diaspore and the source of albite SiO_2 is quartz. It is also clear that the source of TiO_2 is anatase and the source of Na_2O is albite. In addition, the reason for the presence of Fe_2O_3 in the ore is hematite, as well as the abundance of iron oxides in primary or secondary formation in the parts of the Earth's crust close to the surface.

Table 1. Main oxide content of Kemiklitepe bauxite ore

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	LOI
15.6	47.8	22.4	0.40	0.06	1.50	0.63	2.43	9.62
Ce	La	Y	Nd	Sc	Pr	Dy	Er	Gd
307	202	148	143	60.9	38.1	23.8	15.2	21.70
Sm	Yb	Ho	Lu	Eu	Tb	Tm	Total	Th
24.80	15.40	5.03	2.40	4.83	3.70	2.36	1018.22	50.2

In Table 1, the total REE content is 1018 ppm, which is very close to the content of the study carried out by Hepvidinli (2019) on this deposit (1043 ppm). In addition, it can be seen that the silica modulus of the ore ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$: 3.06) is not suitable for the Bayer process and its silica content is high. Thus, the ore was found to be of a quality that can be evaluated as a source of REE. The particle size distribution of the ground ore is shown in Fig. 2. According to the results in Fig. 2, the d_{25} , d_{50} and d_{75} values of the sample with a particle size of -0.212 mm are 0.005 mm, 0.019 mm and 0.114 mm respectively.

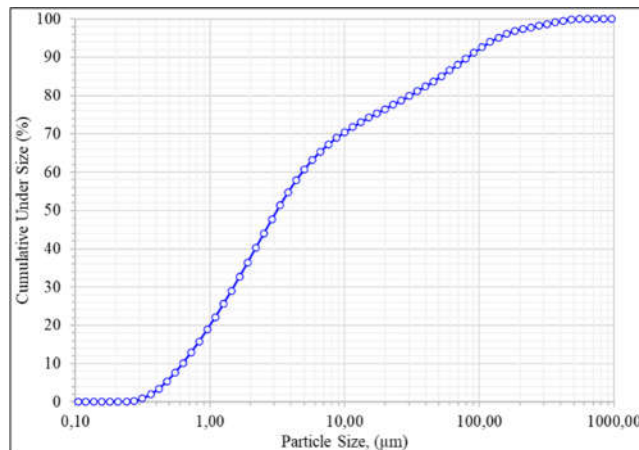


Figure 2. Particle size distribution curve of Kemiklitepe ground ore sample

The investigation revealed that through alkaline roasting of the ore, diaspore and kaolinite $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ (x : 0, 0.05 and 0.25) were initially formed and subsequently transformed into an amorphous phase via reaction with Na_2CO_3 .

3.2. Water Leaching Tests

The chemical analysis results of the residue formed as a result of water leaching are given in Table 2. T-REE and Al_2O_3 recovery values are given in Fig. 3.

Table 2. REE and major oxide recovery values from Kemiklitepe bauxite ore

	Ce, ppm	La, ppm	TREE, ppm	SiO_2 , %	Al_2O_3 , %	Fe_2O_3 , %	CaO, %	MgO, %	K_2O , %	TiO_2 , %
Raw ore	307	202	1018	15.60	47.80	22.40	0.40	0.06	1.50	0.63
0 °C	318	185	1004	14.55	47.50	22.30	0.38	0.07	1.58	0.60
800 °C	310	181	979	14.65	40.80	21.70	0.39	0.07	11.85	0.28
900 °C	373	211	1156	17.65	20.80	26.50	0.44	0.08	13.15	0.14
950 °C	367	208	1137	16.60	16.05	25.60	0.43	0.08	14.70	0.14
1000 °C	386	222	1196	18.15	17.80	27.60	0.46	0.08	12.55	0.15

According to Table 2, the total REE content decreased up to 800 °C and increased after 800 °C. When the content is considered in conjunction with the weight feed and dissolved amount in the calculation of the recovery, an increasing recovery value is generally observed. When evaluating the recovery efficiencies in terms of water leaching, it was determined that they exhibited favorable values. Furthermore, it was ascertained that Al_2O_3 was dissolved to a substantial extent, while SiO_2 , Fe_2O_3 , and K_2O were concentrated in the residue. Specifically, while the alumina content of the raw ore was 47.8%, it decreased to 16.05% following the leaching of the alkali roasted ore at 950 °C. No significant change was observed in CaO and MgO. According to Fig. 3, REE and Al_2O_3 recovery increased with increasing roasting temperature. At 950 °C, REE and Al recovery were found to be 68.25% and 89.93%, respectively, while at 1000 °C, REE and Al recovery were found to be 72.78% and 90.89%, respectively. In this context, it would be more appropriate to determine the optimal roasting temperature by evaluating the REE, Al recovery values and the amount of thermal energy consumed together.

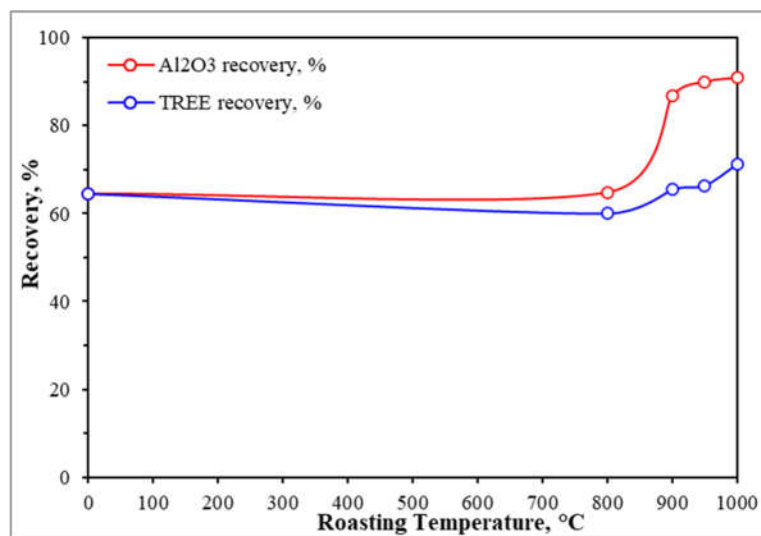


Figure 3. REE and alumina recovery values from Kemiklitepe bauxite ore

4. Conclusions

In this study, Kemiklitepe bauxite ore (Karaman-Türkiye) has been characterized mineralogically and chemically in considerable detail. Accordingly, the ore mainly contains diasporite, hematite, quartz, albite, and rutile. The average total REE content of the ore is 1018 ppm, which is an evaluable content. It also contains 47.8% Al₂O₃ and 15.6% SiO₂ and its silica content is quite high for the Bayer process. While the REE recovery of the unroasted ore through water leaching was 66.63%, it increased to 72.78% at 1000 °C, representing a 6% improvement. Similarly, a substantial increase of 26% in Al recovery was observed at the same temperature of 1000 °C. Consequently, it was determined that REE and Al could be recovered from the ore with high efficiency, aligning with the zero-waste objective, and the leach residue could be utilized as a silica source.

Thanks and Information Note

The authors thank the GÜBAP2904 Mining Specialization Support Program for financially supporting this study via Project No 24.F5118.04.02 and Demireller Mining Inc. for providing shale ore samples from Ayrancı (Karaman, Türkiye).

References

- Borra, C.R., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., Gerven, T.V. (2016). Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud): A Review. *J. Sustain. Metall.* 2:365–386, Doi 10.1007/s40831-016-0068-2.
- EC, (2023). Report on Critical Raw Materials for the EU. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en#fifth-list-2023-of-critical-raw-materials-for-the-eu. Accessed: 11.05.2024.
- Hepvidinli, B. (2019). Investigation of rare earth element contents of Kızıldağ and Kemiklitepe (Ayrancı-Karaman) bauxite mineralizations and associated source rocks. Master's Thesis, Istanbul Cerrahpaşa University Graduate Education Institute, Department of Geological Engineering, Istanbul.
- Jha, M.K., Kumari, A., Panda, R., Kumar, J.R., Yoo, K., Lee, J.Y. (2016). Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*, 165, 2-26.
- Krishnamurthy, N., & Gupta, C. K. (2016). Extractive metallurgy of rare earths (Second Edition). *CRC Press-Taylor & Francis Group*.
- Le, T., Ju H.S., Ravindra, A.V., Li, X.T., Wang, Q., 2019. Effect of microwave roasting on aluminum extraction from diasporic bauxite-sodium carbonate-calcium hydroxide mixtures. *JOM*, , 71, 831–837.
- Öztürk, H., Hanilçı, N., Altuncu, S., Kasapçı, C. (2019). Rare earth element (REE) resources of Turkey: an overview of their characteristics and origin. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 159: 143-129.
- Papangelakis, V.G., Moldoveanu, G.A. (2014). Recovery of rare earth elements from clay minerals. *In: Proceedings of the 1st Rare Earth Resources Conference*, Milos, 191-202.
- Sun, Y., Pan, A., Ma Y., Chang, J. (2023). Extraction of alumina and silica from high-silica bauxite by sintering with sodium carbonate followed by two-step leaching with water and sulfuric acid. *RSC Adv.*, 13, 23254.
- U.S. Geological Survey, (2021). Mineral Commodity Summaries 2021. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Ünal, E.C., Karacahan, M., Uysal, T. (2023). Hydrometallurgical roadmaps and future strategies for recovery of rare earth elements. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, <https://doi.org/10.1080/08827508.2022.2073591>.
- Uysal T., Kiyak T., Erüst Ü. C., Sis H., Erdemoğlu M., Kiyak T. (2023). Characterization of Kızıldağ (Karaman-Turkey) shale ore for REE recovery. *9th International Congress Of Mining Machinery And Technologies*, İzmir.

Valeev, D., Shoppert, A., Dogadkin, D., Romashova, T., Kuz'mina, T., Cristian Salazar-Concha, (2023). Extraction of Al and rare earth elements via high-pressure leaching of boehmite-kaolinite bauxite using NH_4HSO_4 and H_2SO_4 . *Hydrometallurgy*, Volume 215, 105994.

Yang, X.J., Lin, A.J., Li, X.L., Wu, Y.D., Zhou, W.B., Chen, Z.H. 2013. China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development*, 8, 131-136.

A PHYSICAL SEPARATION METHODOLOGY AND ITS EFFECTS ON THE WASTE ANIMAL FAT CONTENT PRIOR TO BIODIESEL PRODUCTION PROCESS

Cemre YILMAZ

Konya Technical University, Graduate School of Education, Department of Environmental Engineering, Konya, Türkiye., ORCID: 0000-0003-0643-6991

Dilek ERDİRENÇELEBİ

Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Environmental Engineering, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0268-3549

Abstract

Biodiesel is evaluated as an eco-friendly fuel alternative to fossil fuels. Waste animal fat which is a by-product of many food processing industries can be used in the recovery of energy from waste. However these wastes contain various contaminants, solid materials and water, as impurities that may complicate the process and reduce the final biodiesel quality. In the present study physical separation processes were applied to waste animal fat from integrated meat and dairy wastewater prior to biodiesel production. Initially a phase separation reactor was designed for raw fatty material as waste animal fat separated from the wastewater containing solids and water. The solid fatty matter was heated in a steam separator to achieve a liquid form allowing solids to settle while water remained below. Usable waste animal fat accumulated and was separated in the upper phase for which optimal yield at 50% (w:w) was obtained by settling at 100°C for 1.5 hours. The fat sample was then transferred to a decanter centrifuge to separate residing impurities. Centrifugal force enabled separation of triglycerides, fatty acids, water and other components based on density differences. Upper phase separated by density was transferred to a constructed filter where solid and liquid forms at room temperature were separated during filtration. The filtered liquid fat represented the lower density and viscose fraction while the solid fat represented the denser fatty acids and solid components of the animal fat. Through the physical separation/purification processes performed the fatty acid content in raw fatty sample was reduced from 28.2% to 5.7% in the filtered sample, resulting in a removal efficiency of 80%.

Keywords: Biodiesel, wastewater, waste animal fat, pretreatment, physical separation.

Introduction

A significant portion of global energy consumption is attributed to fossil fuels. Widely utilized across various sectors and influencing national economies fossil fuels are projected to lose their prominence in the coming years due to their inherent disadvantages due to greenhouse gases released into the environment still increasing the atmosphere's average temperature (Bond, 2020). This temperature, which has already risen by 1.2°C, is predicted to increase further to between 2°C and 6°C by the end of the 21st century if no measures are taken. Consequently this scenario is anticipated to bring about catastrophic outcomes (Lowry, 2017).

Several solutions exist to reduce fossil fuel consumption and pollution. Governments and businesses can invest in renewable energy sources such as wind, solar, biofuels, and hydroelectric power to decrease dependence on fossil fuels (Yameen et al., 2023). Moreover global energy demand is expected to increase by over 25% by 2040. This necessitates a transition to renewable and carbon-neutral fuels to ensure environmental and economic sustainability (König et al., 2020).

Biomass one of the renewable energy sources is an energy resource derived from plant-based and animal-based materials containing carbohydrate compounds. Fuels such as bioethanol, biodiesel, and biogas are produced from biomass energy sources (Erdem & Kadir, 2015). Since its primary raw material is vegetable oil or animal fat biodiesel is generally considered a renewable fuel. Compared to fossil fuels biodiesel contributes significantly less to global warming. Diesel engines running on biodiesel produce lower emissions of carbon monoxide, unburned hydrocarbons, particulate matter and air toxins compared to petroleum-based diesel fuel (Van Gerpen, 2005).

The most critical parameters defining the raw material composition of biodiesel are water content, particulate matter, free fatty acids, sulfur, phospholipids, and iodine value. The presence of water in the raw material can hinder the completion of the esterification reaction and lead to soap formation. Particulate matter present in the raw material must be filtered out prior to processing (Eryılmaz, 2009). Kirubakaran et al. (2023) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they melted chicken fat at 90–100°C and filtered and centrifuged it to separate collagenic materials from the fat. Akgün et al. (2009) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they procured tallow from a slaughterhouse and heated 100 kg of tallow at 100°C removing impurities to obtain 45 kg of usable animal fat. Mata et al. (2014) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they melted animal by-products collected from slaughterhouses at 110°C removing approximately 70% of the moisture. They then separated the solids in the liquid fat (protein residues and suspended particles) through percolation and filtration. Additionally they boiled fish waste collected from local markets in hot water and placed the fat that rose to the top into a separating funnel for further processing. Here they washed the material with distilled water at 60°C separating it from the water and solid particulates. Afterward the mixture was pressed to obtain crude fish oil. Since the crude fish oil still contained some solid impurities it was centrifuged and placed into a separating funnel for further washing. Finally to remove all remaining impurities in the fish oil they subjected it to vacuum filtration. Arnaud et al. (2006) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they heated the chicken fat between 90–100°C to melt it and then filtered and centrifuged it to separate the collagenic materials. Lin & Tsai (2015) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they first shredded the waste chicken fat into small pieces and then melted it at 110°C. Next they filtered and centrifuged the fat to separate the solid materials from the extracted fat.

The aim of this study is to improve the fat content by applying simple physical separation operations on the complex waste animal fat produced in an integrated meat and dairy production industry wastewater prior to biodiesel production. Since the fat recovered from wastewater contains numerous contaminants/impurities, several separation stages are required and need to be applicable for real-stage refinery and biodiesel production. The efficiency of the operational stages and the quality of the refined waste fat was evaluated based on the recovery in weight and free fatty acid content.

Materials and Methods

Sample collection:

The raw material as fatty wastewater was generated from cleaning processes in the integrated dairy and meat production factories.

A separation pool was constructed at the first point the wastewater facility entered the sewer system.

The waste animal fat in the wastewater is accumulated on the surface in the fat separation pool and is transferred to the reactor in the next stage.

Table 1. Composition of the Raw Waste

Parameter	Unit (w/w)	Raw Fatty Waste
Water Content	%	7
Fat Content	%	50
Solid Content	%	43

Separation by density:

A 35 kg capacity reactor was constructed steel to separate the fat from the impurities and water in the waste fat collected from the floating pool at the raw material collection point (Figure 1). The special reactor had been designed with heating and mixing devices to let the fat rise to the upper phase while the water, solids and particulate matter to remain in the lower and middle phases. This reactor was equipped with a thermometer to monitor the melting temperature of the fat a mixer to ensure proper mixing and a motor to operate the mixer. To ensure more efficient settling of the solids a funnel has been placed at the bottom of the reactor. Additionally sampling and control valves to monitor the phase separation process and a steam jacket for heating the content

have been incorporated into the reactor design. The phase separation reactor experiments were conducted with 12 repetitions.

After the raw material was introduced into the reactor the steam line was opened to heat it and once the raw material began to soften the motor was activated and the mixer was put into operation. The same steps were followed for each trial. Phase separations were observed for raw material samples at reactor temperatures of 40°C, 60°C, 80°C and 100°C respectively. The upper phase obtained through this process was sent to the decanter centrifuge.

Resulting in 3 phases as (Figure 2):

- the partitioning of settleable solids in the lower phase,
- non-settling particulates and water in the intermediate phase,
- and the sample to be used in the study in the upper phase.



Figure 1. Reactor for the separation by density of fatty waste, Outlets A: The upper-phase sample collection valve, B: Non-settling particulates and water in the intermediate valve, C: Solids in the lower valve

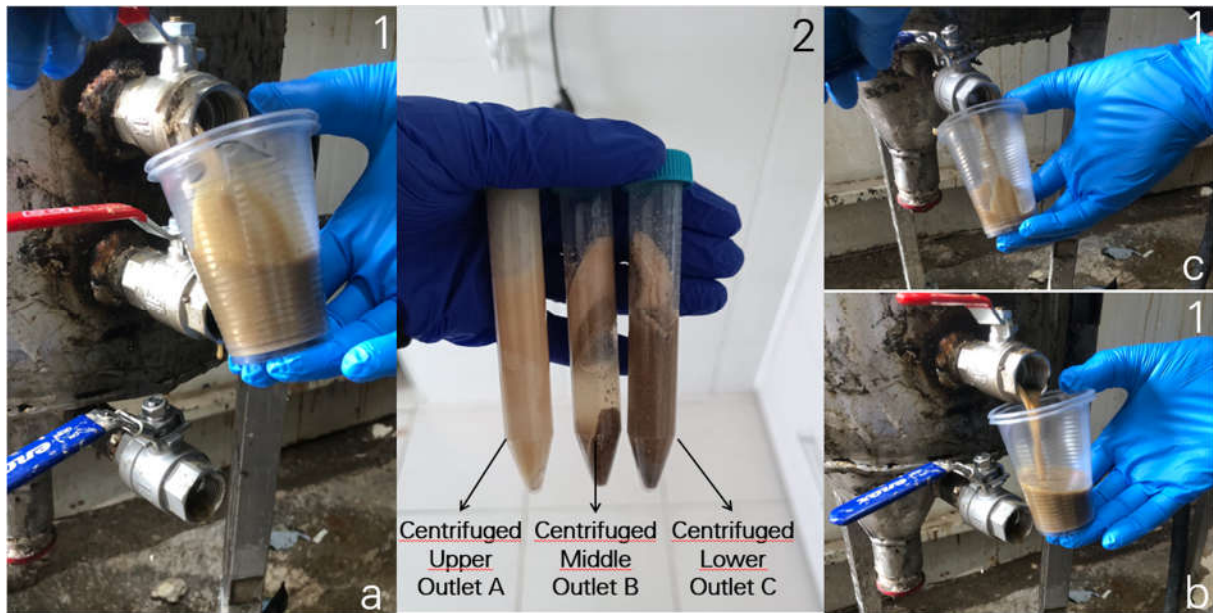


Figure 2. Settled (1) and centrifuged (2) samples after separation by density, (a)A: Upper Outlet, (b)B: Middle Outlet, (c)C: Lower Outlet

Table 2. Duration and fat recovery in phase separation reactor

T (°C)	Melting Time (min)	Post-Melting Sedimentation Time (hr)	Raw Fatty Waste (kg)	Range for Usable Upper Phase Amount Extracted from Raw Fatty Waste (kg)	Reference
100	39	1,5	35	8,75-17.75	This study
80	36	2	35	5,6-13.85	This study
100	-	-	100	45	(Akgün et al., 2009)

Decanter Centrifuging:

The sample obtained from the upper outlet of the reactor was transferred to the decanter centrifuge (Figure 3).

The decanter used in the study is biphasic with the first phase giving the sample the supernatant to be used for input material for biodiesel and the second phase giving the solid residue.

The decanter used in the study is biphasic with the first phase being the lighter material to be used for the next step and the second phase being the solid residue. The animal fat subjected to centrifugal force in the decanter centrifuge enabled the separation of triglycerides+fatty acids and water+other components of the fat based on their densities.

The two main phases obtained after the filtration of the sample from the decanter centrifuge are:

1. The liquid fat phase is the lowest-density phase separated by the decanter centrifuge.
2. The solid phase is the denser phase where heavier components accumulate. This phase consists of fatty acids in a more solid form such as stearic acid and palmitic acid. These acids are solid at room temperature and appear as a white solid material when separated in the decanter centrifuge.

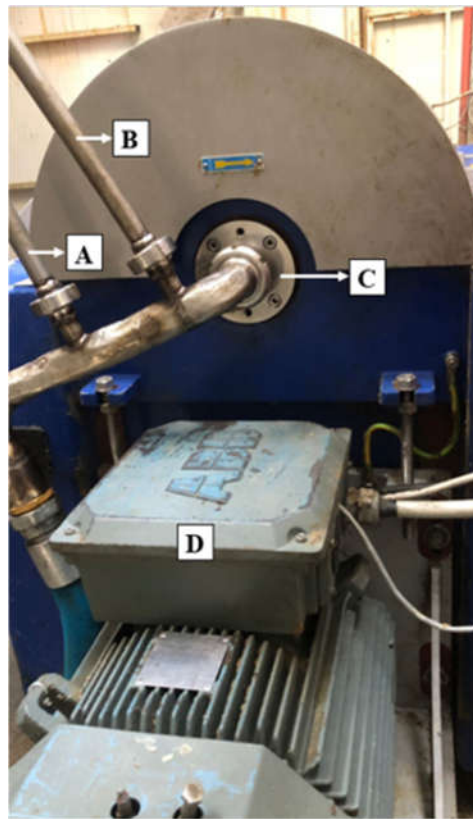


Figure 3. Decanter centrifuge raw material inlet point A: Slow wash of the inner chamber, B: High-speed wash of the drum wall, C: Material inlet, D: Main drum motor



Figure 4. Solid Residue and Outlet Point

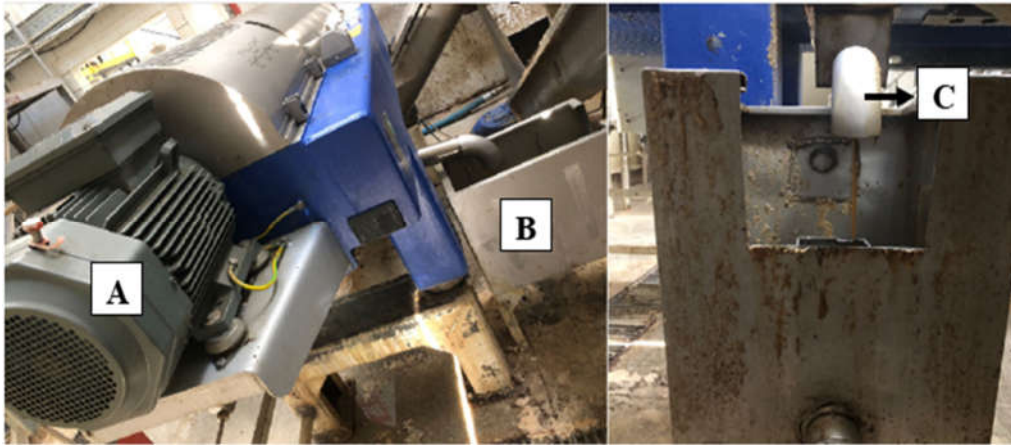


Figure 5. Raw material outlet in the decanter A: Inner screw motor, B: Liquid raw material outlet collection tank, C: Liquid raw material flow pipe

Filtration:

The sample extracted from the decanter centrifuge was subjected to a filtration process at room temperature to obtain the pre-treated sample.

The filtration process was carried out by placing the sample into a filter allowing the liquid phase to pass through under the influence of gravity.

The first/supernatant phase extracted from the decanter centrifuge was subjected to a filtration process at room temperature to obtain an appropriate sample. The filtration process was carried out by placing the decanted fat sample into a filter allowing the liquid phase to pass through under the influence of gravity (Figure 6). After the filtration process the sample was obtained in liquid form at room temperature.

After the filtration process the sample was obtained in liquid form at room temperature.



Figure 6. Filtration Process A: Filtration setup, B: Filter used for raw material filtration, C: Section where the liquid phase drains through filtration

Result

Table 3. Average quantities throughout the physical separation stages

Raw Fatty Waste Mass (kg)	Mass of Fatty Material Obtained After Reactor Separation (kg)	Mass of Fat Obtained After Centrifugation (kg)	Mass of Liquid Fat Obtained After Filtration (kg)
35	17	16	5

Table 4. Fatty Acid Composition of Raw Material and Sample

Parameter	Unit	Raw Fatty Waste	Liquid Fat
Water Content	%	7	0,57
Fat Content	%	50	99,43
Saturated Fat	%	67,27	44,48
Unsaturated Fat	%	31,06	54,22
Trans Fat	%	1,67	1,3
Free Fatty Acid	%	28,2	5,74

Table 3 shows that 35 kg of raw fatty waste yielded 17 kg of fatty material after reactor separation. Of this material 94% was purified through centrifugation and 31.3% of this purified fat was separated as liquid fat after filtration.

Table 4 shows that the purification process effectively transforms raw waste animal fat into a more refined and usable liquid fat. Water content decreased from 7% to 0.57% while fat content increased from 50% to 99.43%. Additionally the increase in unsaturated fat content (from 31.06% to 54.22%) and the reduction in free fatty acids (from 28.2% to 5.74%) indicate improved quality and stability of the fat. This process demonstrates significant success in refining and enhancing the usability of the fat.

Analyses

-The fatty acid composition of the raw material and the sample obtained from the raw material was determined using gas chromatography (GC) in accordance with the TS 4504 EN ISO 5509 method.

-The fat determination analysis was performed using the gravimetric method in accordance with the TS 2664 standard.

-The free fatty acid analysis was performed using the titrimetric method in accordance with the TS EN ISO 660 standard.

Findings and Discussion

At 100°C the melting time was 39 minutes slightly longer than the 36 minutes observed at 80°C. This suggests that higher temperatures don't drastically reduce melting time indicating the process is not significantly temperature-dependent for this parameter. The settling time was shorter at 100°C (1.5 hours) compared to 80°C (2 hours). This demonstrates that higher temperatures facilitate faster settling likely due to reduced viscosity and better phase separation dynamics. At 100°C 17.75 kg of the upper phase was recovered from 35 kg of raw material accounting for 50.7% of the total raw material.

The separation by density process had a profound impact on the composition of the waste animal fat leading to substantial improvements in its suitability for biodiesel production:

- Saturated fat content decreased significantly from 67.27% to 44.48% suggesting the removal of heavier more solid components, which are less desirable for biodiesel due to their higher melting points.

- Unsaturated fat content increased notably from 31.06% to 54.22% enhancing the biodiesel feedstock chemical reactivity and overall quality particularly in terms of achieving better combustion properties.
- Trans fat content decreased slightly from 1.67% to 1.3% which, while a small change aligns with the goal of reducing less desirable fat types.
- The most significant change was observed in free fatty acid (FFA) content which dropped drastically from 28.2% to 5.74%. According to the EN 14214 standard an acid value of <0.5 is required while the ASTM D6251 standard specifies an acid value of <0.8. Therefore the FFA value of 5.74% must be reduced to meet the required acid value standards.
- This reduction was targeted as high FFA levels often lead to soap formation during transesterification, negatively impacting biodiesel yield and quality.

This significant difference suggests that higher temperatures improve the efficiency of phase separation resulting in a higher yield of usable upper phase. Higher temperatures (100°C) not only improve settling efficiency but also lead to a higher recovery rate of the upper phase which is the desired material for biodiesel production. While 80°C may be advantageous in terms of energy savings the reduced yield of the usable phase and longer settling time could make it less efficient overall.

Unsaturated fats are more susceptible to chemical deterioration such as autoxidation and polymerization under certain conditions. Some studies have indicated that high levels of unsaturation in fuel lead to the formation of deposits in the engine and contribute to the degradation of engine lubricating fat (Altun & Öner, 2010). Therefore due to the lower unsaturated fatty acid content at 100°C the biodiesel production study from animal waste fat at the integrated meat and dairy production facility continued with the upper phase sample obtained at 100°C.

Kirubakaran et al. (2023) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they melted chicken fat at 90–100°C and filtered and centrifuged it to separate collagenic materials from the fat.

Akgün et al. (2009) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they procured tallow from a slaughterhouse and heated 100 kg of tallow at 100°C removing impurities to obtain 45 kg of usable animal fat.

Mata et al. (2014) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they melted animal by-products collected from slaughterhouses at 110°C removing approximately 70% of the moisture. They then separated the solids in the liquid fat (protein residues and suspended particles) through percolation and filtration.

Arnaud et al. (2006) in their pre-treatment process prior to biodiesel production they heated the chicken fat between 90–100°C to melt it and then filtered and centrifuged it to separate the collagenic materials.

The separation of waste animal fat from wastewater through density differences combined with decanter centrifuge and gravity filtration processes offers significant advantages for biodiesel production. In the initial stage separation by density removes water and solid particles making the fat suitable for processing. The decanter centrifuge enhances fat quality by eliminating emulsified water and fine impurities. Gravity filtration facilitates the extraction of fat with a low free fatty acid content resulting in a more fluid and biodiesel-compatible feedstock. The combination of these methods enables a highly efficient biodiesel production process with reduced energy consumption and cost.

Conclusion and Recommendations

In biodiesel production physical separation processes applied to waste animal fats are crucial for optimizing the cost feedstock quality and reaction efficiency.

Applied operations were phase separation with melting, settling, centrifuging and filtration.

Melting was most successful at 100°C and facilitated the removal of settleable solid particles by converting the fat into a liquid state while phase separation enabled the settling out of the solids fixing suspended particles and water in the middle phase and purified fat in the upper phase.

The decanter centrifuge removed residual particles and water that was not eliminated through sedimentation.

Filtration enabled the recovery of the fat in liquid form with reduced saturated fatty acid and free fatty acid composition for further biodiesel production.

These results highlight the effectiveness of the physical separation process in refining the raw material. By reducing impurities and optimizing the fatty acid profile the process not only improves reaction efficiency but also ensures a higher-quality biodiesel product. This underscores the importance of physical separation in transforming low-grade fats into viable high-performing biodiesel feedstocks.

References

- Altun, Ş., & Öner, C. (2010). Hayvansal Yağların Dizel Motor Yakıtı Olarak Değerlendirilmesi. *Electronic Journal of Vehicle Technologies/Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(3).
- Bond, K. (2020). vision: Why you should see peak fossil fuels coming. *Carbon Tracker, London*.
- Eryılmaz, T. (2009). *Hardal yağı biyodizelinde farklı karışım oranlarının dizel motorlarda performansa etkisi*.
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36–47.
- König, A., Marquardt, W., Mitsos, A., Viell, J., & Dahmen, M. (2020). Integrated design of renewable fuels and their production processes: recent advances and challenges. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 27, 45–50.
- Lowry, J. (2017). *Avoiding Carbon Apocalypse Through Alternative Energy. Palomar Library, 1*.
- Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>
- Yameen, M. Z., AlMohamadi, H., Naqvi, S. R., Noor, T., Chen, W.-H., & Amin, N. A. S. (2023). Advances in production & activation of marine macroalgae-derived biochar catalyst for sustainable biodiesel production. *Fuel*, 337, 127215.

THE EFFECT OF REACTION TIME ON BIODIESEL QUALITY FROM WASTE ANIMAL FAT USING ETHANOL

Cemre YILMAZ

Konya Technical University, Graduate School of Education, Department of Environmental Engineering, Konya, Türkiye., ORCID: 0000-0003-0643-6991

Dilek ERDİRENÇELEBİ

Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Environmental Engineering, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0268-3549

Abstract

Ethanol is a commonly used alcohol in biodiesel production preferred due to its low toxicity and its derivation from renewable resources. Biodiesel production from waste animal fats using ethanol provides an environmentally friendly and sustainable alternative energy source. Reaction time is one of the critical factors directly affecting the efficiency of the transesterification process and the quality of the biodiesel product. Proper adjustment of the reaction time is crucial to optimize the yield. If the reaction time is insufficient for complete esterification of the fat molecules with ethanol the reaction remains incomplete resulting in reduced biodiesel yield. In the study, biodiesel was produced using utilizing ethanol and waste animal fat separated from the wastewater of an integrated meat and dairy processing facility. The obtained biodiesel was evaluated in accordance with the EN14214 standard. In the transesterification process using ethanol, reaction times of 2, 4 and 6 hr were investigated at an alcohol to fat molar ratio of 30:1. At a reaction time of 2 hr a yield of 88% was achieved where the density of 0.905 g/cm³ and the viscosity of 5.40 mm²/s did not conform to the EN14214 standards. At a reaction time of 4 hr, the yield increased to 89.5%, a reduction in the density was obtained to 0.895 g/cm³ conforming to the EN14214 standards but the viscosity of 5.30 mm²/s remained above the acceptable range. Increased reaction time at 6 hr provided increased yield at 92% and density of 0.893 g/cm³ meeting the EN14214 standard while the viscosity of 5.2 mm²/s exceeded the standard limit by 0.2 mm²/s. Nevertheless, the biodiesel quality obtained at 4 and 6 hr reaction times met the universal ASTM D6751 standard with its viscosity and density values. The positive effect of the reaction time on the biodiesel quality was supported by the findings of the study.

Keywords: Biodiesel, wastewater, ethanol, transesterification, waste animal fat, quality.

Introduction

Renewable energy sources are of vital importance for the future of humanity. The accumulation of carbon dioxide released by fossil fuels into the atmosphere leads to global warming causing temperature increases that result in climate change and the melting of glaciers. An efficient solution to reduce the rise in greenhouse gas emission is the transition from fossil fuels which contribute to carbon dioxide accumulation to renewable energy sources (Keleş & Hamamcı, 2002).

Converting waste into energy is an effective method to meet the growing global energy demand and reduce the negative impacts on the environment. This transformation is achieved by generating energy from waste resulting in significantly lower CO₂ emissions compared to fossil fuels. Since petroleum-based diesel is the most widely used fuel in the transportation sector replacing it with biodiesel can significantly reduce greenhouse gas emissions (Tan et al., 2019). Additionally, the energy produced from organic wastes reduces dependence on fossil fuels while also limiting methane emissions from landfills (Galadima & Muraza, 2020). Producing biofuels such as biodiesel from waste sources can provide a sustainable energy supply (Javed et al., 2019).

Short-chain alcohols that can be used in biodiesel production include methanol, ethanol, propanol, and butanol. However methanol and ethanol are the most commonly preferred in practice. Ethanol offers environmental advantages over methanol due to its renewability as a raw material derived from agricultural sources and its

better ecological compatibility. On the other hand methanol is favored for its lower cost and the chemical and physical advantages provided by its shorter-chain structure. The reaction can employ alkali, acid or enzyme-based catalysts whose primary function is to enhance the reaction rate and yield (Fukuda et al., 2001).

Ethanol, being derived from agricultural renewable sources has the potential to completely eliminate dependence on petroleum-derived alcohols. Additionally ethanol offers a significant advantage over methanol due to its much higher solubility capacity for oils. Beyond its agricultural origin the extra carbon atom in ethanol molecular structure slightly increases the fuel calorific value and cetane number. These properties make the production of ethyl esters more appealing compared to methyl esters (Vicente et al., 2007). From an environmental perspective the use of ethyl esters is more advantageous compared to methyl esters (Anastopoulos et al., 2015). Fatty acid ethyl esters (FAEE) offer several advantages over methyl esters including higher cetane numbers, calorific values, oxidation stability and lubrication properties while also producing lower exhaust emissions. Additionally their lower Cloud Point and Pour Point indicate superior performance in colder regions (Verma et al., 2015). Tashtoush et al. (2004) reported that in biodiesel production from animal waste fats via transesterification ethanol provides higher conversion rates and lower viscosity compared to methanol. Tashtoush et al. (2004) conducted experiments to determine the optimal conditions for converting animal fats into ethyl and methyl esters. These experiments demonstrated that pure ethanol outperformed pure methanol in terms of performance.

The aim of this study is to investigate biodiesel production using ethanol and methanol with high free fatty acid (FFA) content waste animal fats. The study seeks to enhance feedstock diversity by utilizing low-cost fats considered as waste. Additionally it aims to compare the efficiency and performance of ethanol and methanol in biodiesel production to determine the most economically and environmentally favorable method.

The study involves the evaluation of the alkali transesterification efficiency of waste animal fat from integrated meat and dairy industry wastewater using ethanol and methanol as yield, viscosity and density properties of the resulting biodiesel. This approach aims to contribute to the integration of waste management and renewable energy production for sustainable biodiesel production to reduce environmental impacts.

Materials and Methods

In the study, methanol (CH₃OH) from Merck with a molecular weight of 32.04 g/mol, 99.8% purity, a density of 0.792 g/cm³ (20°C) and a boiling point of 64.5°C, ethanol (C₂H₅OH) from Merck with a molecular weight of 46.07 g/mol, 99.8% purity, a density of 0.790–0.793 g/cm³ (20°C) and a boiling point of 78.3°C and Merck potassium hydroxide pellets with a density of 2.04 g/cm³ (20°C) and a molecular weight of 56.11 g/mol were utilized.

Waste animal fat separated from wastewater and pretreated was used. The following steps were implemented to produce biodiesel from the animal waste fat sample obtained from the integrated meat and dairy production process:

1. Sample preparation from the raw material an fat separation pool was constructed at the initial point where the wastewater generated from process cleaning in the integrated meat and dairy production facility enters the sewer system. The waste animal fat present in the wastewater from the process was accumulated on the surface of the water in the fat separation pool and prepared for transfer to the reactor. The sample to be used in biodiesel production was obtained through the following steps:

- 1.1. Heating+settling
- 1.2. Decanting by centrifuge
- 1.3. Filtration

2. The sample's molecular weight of 857.28 g/mol was calculated based on the fatty acid profile of the sample.

3. Transesterification:

- The fat sample was placed in a beaker and heated to 78°C using ethanol and 64.7°C for methanol.
- Using a digital heater and stirrer the temperature was maintained constant and controlled.
- The fat was stirred to ensure uniform temperature distribution.

- A mixture of 0.8% KOH catalyst by weight and alcohol was slowly added to the heated fat sample.
- The closed reflux system was set up and the reaction was initiated by maintaining the conditions at 78°C and 64.7°C and 1200 rpm.
- The reaction duration was set to 2, 4 and 6 hr.
- During biodiesel production 205 ml (161 g) of ethanol and 140 ml (112 gr) of methanol was used at a 30:1 alcohol-to-fat mol ratio.
- Wet washing with distilled water was performed to remove impurities such as residual alcohol and catalyst that may remain in the biodiesel.
- The transesterification reaction setup is shown in Figure 1.



Figure 1. Transesterification reaction setup

Analyses

-The fatty acid composition of the sample from the raw material was determined using gas chromatography (GC) in accordance with the TS 4504 EN ISO 5509 method.

-The fat determination analysis was performed using the gravimetric method in accordance with the TS 2664 standard.

-The free fatty acid analysis was performed using the titrimetric method in accordance with the TS EN ISO 660 standard.

-Biodiesel yield was calculated using the following formula:

$$\text{Biodiesel Yield (\%)} = (\text{Mass of Biodiesel Produced} / \text{Mass of Fat Used}) \times 100$$

-Density: TS 4959

-Viscosity: TS EN ISO 3104

Findings and Discussion

Graphs related to biodiesel produced with ethanol and methanol are presented in Figure 2.

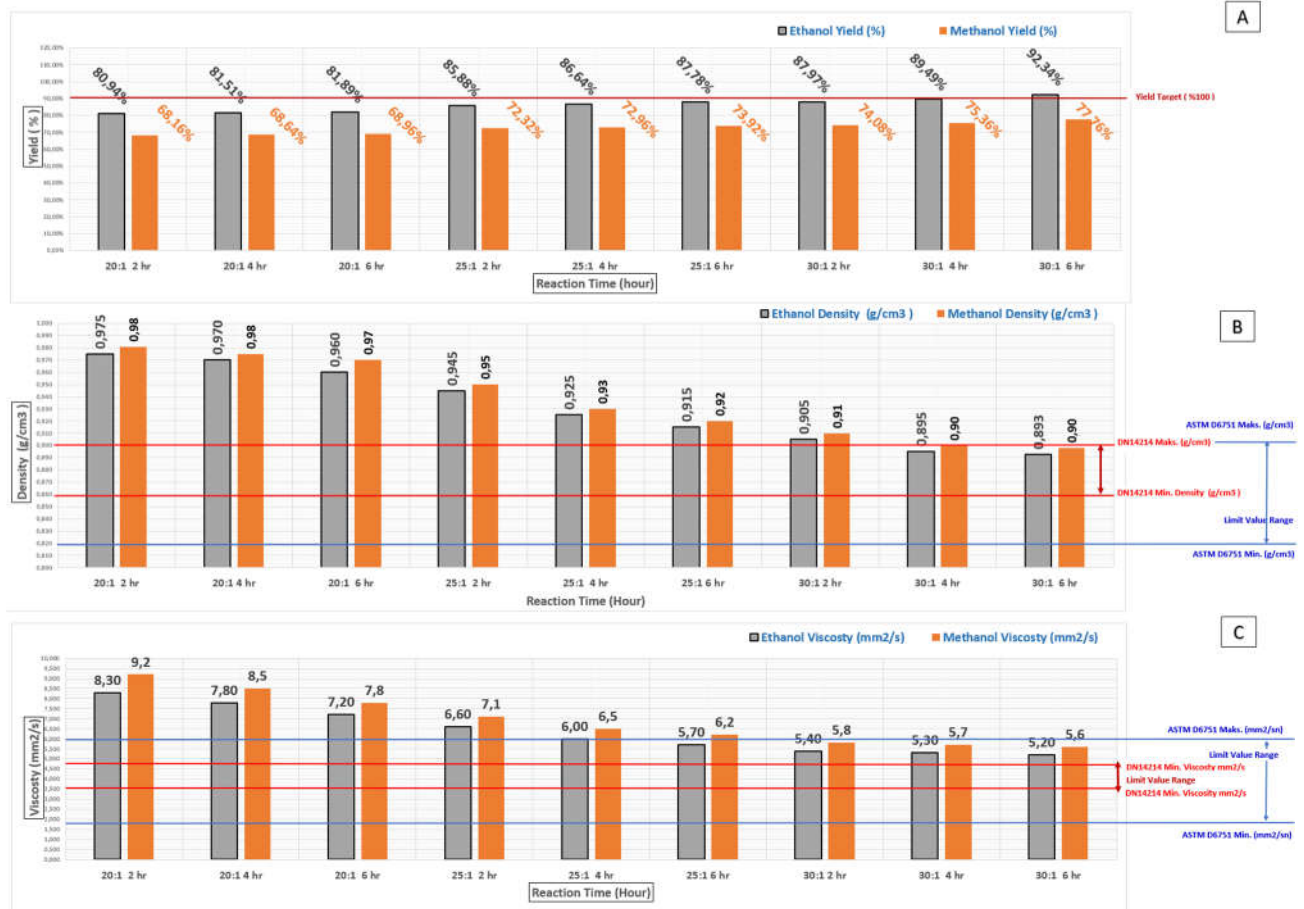


Figure 2. Graphs related to biodiesel produced with ethanol and methanol: (A) Yield, (B) Density-Reaction Time, (C) Viscosity-Reaction Time

The graphs of the results obtained from the study conducted with ethanol are presented in Figure 2. As a result of the transesterification study conducted with ethanol reaction times of 2, 4 and 6 hr were evaluated at a 30:1 alcohol-to-fat molar ratio. At a reaction time of 2 hours a yield of 88% was achieved; however the density (0.905 g/cm^3) and viscosity ($5.40 \text{ mm}^2/\text{s}$) didn't meet the EN14214 standards. At 4 hours a yield of 89.5% was obtained and while the density (0.895 g/cm^3) complied with the EN14214 standards the viscosity ($5.30 \text{ mm}^2/\text{s}$) remained outside the acceptable range. At 6 hours the highest yield of 92% was achieved with a density of 0.893 g/cm^3 meeting the EN14214 standard although the viscosity ($5.2 \text{ mm}^2/\text{s}$) exceeded the standard by $0.2 \text{ mm}^2/\text{s}$.

The results showed that although yields above 80% were achieved at 2, 4 and 6 hours of reaction time the viscosity and density values for the 2 and 4 hour reactions didn't comply with the EN14214 standard. Only at the 6 hour reaction time was the highest yield obtained along with a density value conforming to the EN14214 standard.

Biodiesel production from waste animal fats with high FFA content using ethanol offers a pathway to utilize low-cost fats and enhance feedstock diversity. Despite the challenges posed by high-FFA fats such as saponification ethanol efficiency in transesterification supports the conversion of low-quality fats into biodiesel. Additionally as a renewable alcohol ethanol can be produced from biomass and sourced locally making it a sustainable alternative to methanol. This presents a significant environmental and economic advantage.

Ethanol higher conversion efficiency compared to methanol in biodiesel production provides notable economic and environmental benefits. By reducing reliance on fossil-based methanol through biomass-derived ethanol

the process achieves a lower carbon footprint and supports the renewable energy cycle. Furthermore ethanol is less toxic and less harmful to the environment than methanol offering advantages in terms of workplace safety and environmental sustainability. Combined with its high conversion efficiency these attributes make ethanol-based biodiesel production a more eco-friendly, efficient and economically viable option.

Conclusion and Recommendations

Table 1. Comparison of ethanol and methanol in terms of yield, density and viscosity

	Ethanol			Methanol			DN14214 Min. Density (g/cm ³)	DN14214 Maks. Density (g/cm ³)	DN14214 Min. Viskozity (mm ² /s)	DN14214 Maks. Viskozity (mm ² /s)	ASTM D6751 Min. Density (g/cm ³)	ASTM D6751 Maks. Density (g/cm ³)	ASTM D6751 Min. Viskozity (mm ² /s)	ASTM D6751 Maks. Viskozity (mm ² /s)
	Alcohol/Fat mol ratio	Yield (%)	Density (g/cm ³)	Viscosity (mm ² /s)	Yield (%)	Density (g/cm ³)	Viscosity (mm ² /s)							
30:1 2 h	88	0.905	5.4	74.1	0.91	5.8	0.860	0.900	3.500	5.000	0.820	0.900	1.900	6.000
30:1 4 h	89.5	0.895	5.3	75.4	0.900	5.7								
30:1 6 h	92	0.893	5.2	77.8	0.898	5.6								

Table 1 compares the performance of biodiesel production processes using ethanol and methanol at different time durations. The data are based on a molar alcohol-to-fat ratio of 30:1 and production times of 2, 4 and 6 hours.

Ethanol, the yield shows a consistent increase with longer processing times. It rises from 87.97% at 2 hours to 92.34% at 6 hours. Methanol, although a similar upward trend is observed the yield remains lower than that of ethanol. It increases from 74.08% at 2 hours to 77.76% at 6 hours. Ethanol consistently provides higher yields than methanol at all processing times.

Ethanol, density decreases over time reaching 0.893 g/cm³ at 6 hours. Methanol, density also decreases but remains higher than that of ethanol (0.898 g/cm³ at 6 hours). Biodiesel produced using ethanol has a lower density compared to that produced with methanol which aligns better with biodiesel standards.

Ethanol, viscosity decreases over time reaching 5.2 mm²/s at 6 hours. Methanol, similarly viscosity decreases but remains slightly higher than ethanol (5.6 mm²/s at 6 hours). Biodiesel produced with ethanol has a lower viscosity compared to methanol which may enhance fuel performance.

Ethanol outperforms methanol in every parameter. At 6 hours of processing time it achieves a yield of 92.34% along with lower density and viscosity contributing to better biodiesel quality.

Using waste animal fat from integrated meat and dairy industrial wastewater, a biodiesel yield of 92.34% was achieved using ethanol and 77.76% using methanol under the conditions of a 30:1 alcohol-to-fat molar ratio and a reaction time of 6 hr.

The advantages of ethanol over methanol environmental friendliness higher yield under the same conditions and compliance with the viscosity and density limit ranges specified by the EN14214 standard.

Both biodiesels met ASTM D6751 universal biodiesel fuel standart.

ASTM D6751 (American Standard) and EN 14214 (European Standard) define quality criteria for biodiesel but differ due to geographic variations. ASTM D6751 provides a more flexible framework allowing biodiesel production from a wide range of feedstocks whereas EN 14214 incorporates stricter specifications tailored to European engine technologies. EN 14214 imposes stringent requirements on parameters such as density (860–900 kg/m³), oxidation stability (≥ 8 hours) and cold weather performance while ASTM D6751 applies more lenient rules in these areas. The European standard prioritizes environmental sustainability and low emissions whereas the American standard focuses on performance and compatibility with a broader range of engines.

These results indicate that ethanol for waste animal fat is a more effective option than methanol for biodiesel production.

Ethanol's higher performance over methanol was substantiated in the biodiesel quality by alkali transesterification of the waste animal fat from integrated meat and dairy industry wastewater.

The ethanol's potential as a superior alcohol for biodiesel production from complex industrial wastewaters needs to be investigated towards lower consumption and recovery for real-scale production of biodiesel. While ethanol offers significant advantages such as lower toxicity and renewability its high evaporation rate and associated process losses highlight the need for advanced recovery systems. Implementing efficient recovery mechanisms such as closed-loop condensation processes can reduce losses and improve overall process efficiency. These studies will provide critical data for lowering production costs enhancing environmental sustainability and making ethanol-based biodiesel production more feasible and competitive especially when using unconventional feedstocks like industrial wastewater.

References

- Anastopoulos, G., Zannikou, Y., Stourmas, S., & Kalligeros, S. (2015). Transesterification of vegetable oils with ethanol and characterization of the key fuel properties of ethyl esters. *Energies*, 2(2), 362–376.
- Bayraç, H. N. (2009). Küresel Enerji Politikaları Ve Türkiye: Petrol Ve Doğal Gaz Kaynakları Açısından Bir Karşılaştırma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(1), 115–142.
- Eryılmaz, T. (2009). *Hardal yağı biyodizelinde farklı karışım oranlarının dizel motorlarda performansa etkisi*.
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405–416.
- Galadima, A., & Muraza, O. (2020). Waste materials for production of biodiesel catalysts: Technological status and prospects. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121358>
- Javed, F., Aslam, M., Rashid, N., Shamair, Z., Khan, A. L., Yasin, M., Fazal, T., Hafeez, A., Rehman, F., & Rehman, M. S. U. (2019). Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: a pathway towards sustainable biorefinery. *Fuel*, 255, 115826.
- Keleş, R., & Hamamcı, C. (2002). Çevrebilim (4. Baskı). *Ankara: İmge Kitabevi*.
- Tan, S. X., Lim, S., Ong, H. C., & Pang, Y. L. (2019). State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. *Fuel*, 235, 886–907.
- Tashtoush, G. M., Al-Widyan, M. I., & Al-Jarrah, M. M. (2004). Experimental study on evaluation and optimization of conversion of waste animal fat into biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 45(17), 2697–2711.
- Verma, P., Sharma, M. P., & Dwivedi, G. (2015). Operational and environmental impact of biodiesel on engine performance. *International Journal Of Renewable Energy Research*, 5(4), 961–970.
- Vicente, G., Martinez, M., & Aracil, J. (2007). Optimisation of integrated biodiesel production. Part I. A study of the biodiesel purity and yield. *Bioresource Technology*, 98(9), 1724–1733.

DETERMINATION OF ENERGY POTENTIAL OF PLANT RESIDUES FROM GREENHOUSE COURGETTE CULTIVATION**Sedat BOYACI**

Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Kırşehir-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-9356-1736

Atilgan ATILGAN

Prof. Dr., Alanya Alaaddin Keykubat University, Faculty of Engineering, Department of Biosystems Engineering, Antalya- Türkiye, ORCID: 0000-0003-2391-0317

Abstract

Accumulating the residues resulting from production in open areas or disposing of them by burning will bring about negative environmental effects. However, the usability of these residues as biomass energy is important in terms of reducing the negative environmental effects of the residues. This study was carried out to determine the amount of biomass residue and energy potential formed as a result of greenhouse courgette production in Turkey. For this purpose, the amount of fresh and dry residues that can be obtained from courgette plants grown in greenhouses between 2019-2023 were determined in the study. Accordingly, the total amount of energy that can be obtained was determined and the number of households whose electricity consumption can be met was determined. According to the results obtained, the annual average planted area was 3637 ha, the production amount was 326092.4 tons and the yield was 89 tons/ha. It was determined that the amount of fresh and dry residues that can be formed as a result of production were 363698 tons and 72739.6 tons, respectively, at the end of five years. The total energy that can be obtained from these residues is 259.6 GWh and the number of households that can meet the electricity consumption in return for this energy has been determined as 111284.7 units. The results obtained from the study are examined, it is concluded that the plant residues to be obtained from greenhouse courgette cultivation will create a significant energy potential in our country, which is dependent on foreign sources for energy.

Keywords: Greenhouse residues, biomass, alternative energy sources, renewable energy sources

Introduction

Agricultural activities generate significant amounts of plant residues (Mazuela et al., 2012). Plant residues are considered to be the parts of a plant that have no commercial value. Proper waste management is necessary to prevent environmental and health problems that may arise from the parts left over from the harvested plants. This waste management is essential to ensure adequate environmental hygiene in rural areas. Poor management of residues can lead to a wide range of diseases and pests that potentially affect not only crops but also animals and humans living nearby (Reicosky & Wilts, 2005). In studies conducted to evaluate greenhouse waste in different provinces of Turkey, Atilgan et al. (2014) found that 8.7% of plant waste in Antalya province was used for compost, while 91.3% (63.3% left in the field, 8.7% thrown into a river or stream, and 19.3% waiting to self-destruct) was disposed of in a way that harms nature. Güzey & Atilgan (2015) reported that 12% of the enterprises in Denizli province disposed of the plant waste from pruning inside the greenhouse, 15% outside the greenhouse and in the field, 37% by burning and 22% by throwing into garbage bins. Boyacı & Kartal (2019) determined that 95.90% of plant waste resulting from pruning and 88.52% of post-harvest waste in greenhouse enterprises in Kumluca district of Antalya province were disposed of in a way that would harm nature and the atmosphere. Boyacı (2018) In Kırşehir province, the remaining plant waste after pruning and harvesting is disposed of by dumping it in the field, burning or throwing it in the trash in 90% of greenhouses and 100% of high tunnel enterprises. It has been determined that only 10% of greenhouses use waste as compost. However, such plant biomass wastes are thrown around the greenhouse, seaside, stream beds or garbage areas or mixed with the greenhouse soil after being broken down with a shredder. Burning the wastes after they dry naturally in these areas causes air, environmental and visual pollution. In addition, the residues of medicines and chemical fertilizers in the plant pass underground with the rains and pollute water resources. Mixing the wastes with the greenhouse soil or throwing them around the greenhouse causes pathogens and

pests to remain in the environment until the next cultivation period. Therefore, the effects of pests increase every year. Therefore, these wastes need to be added to the national economy in order to prevent these negative effects. It is possible to use greenhouse plant biomass wastes as solid fuel by briquetting them in energy production, to obtain biogas and to evaluate them in compost production (Bilgin et al., 2012). Energy consumption is an indicator of the development level of countries and is indispensable for individuals to live a comfortable life. The increase in energy consumption along with developing technology and increasing population presents energy as an important problem in our country as well as all over the world. For this reason, studies on utilizing renewable energy sources have gained even greater importance in recent years. Biologically derived sources are among the most important renewable sources used for energy production from the earliest times of humanity to the present day (Karaca & Başçetinçelik, 2014).

Turkey has a great potential in terms of renewable energy resources, but unfortunately it is an energy importing country. In order for Turkey to be independent in terms of energy, renewable energy resources need to be used more. Therefore, agricultural residues can be a very attractive choice because they are sustainable, environmentally friendly and a familiar energy source for Turkey. In addition, Turkey has many advantages and alternatives in the use of agricultural residue resources due to its regional climate (Karaca, 2015). Biomass, one of our domestic energy resources, has an important potential for Turkey and in this sense, it is obvious that the development of biomass-focused energy policies will provide serious gains in obtaining sustainable, domestic, cheap and clean energy in Turkey (Gürel, 2020). In this study, it was aimed to determine the energy potential of plant residues from greenhouse courgette cultivation in Turkey, to bring them to the country's economy and to contribute to the reduction of the environmental impacts of residues.

Material and Methods

In the study, the 2019-2023 data of the Turkish Statistical Institute (TUIK) on the greenhouse (high tunnel, plastic and glass greenhouse) areas and production amounts in Turkey were taken into account (TUIK, 2024). In the study, residues from the courgette plant (*Cucurbita pepo* L.) produced under greenhouse were used as plant material. In order to calculate the potential energy that can be obtained from plant residues in the research area, annual data were first calculated. The total amount of energy that can be obtained from plant residues for the years 2019–2023 was calculated.

The energy potential that can be obtained from greenhouse plant residues was determined by Equation 1 (Karaca et al., 2016; Atılğan et al., 2020).

$$\text{TAM} = \text{KBAM} \times \text{YYA} \times \text{KO} \quad (1)$$

In the equation; TAM= Total waste amount (tons), KBAM= Dry basis residue amount (tons/ha), YYA= Cultivation area (ha), KO= Usability rate (%)

Since all greenhouse residues can be removed from the area and collected, the usability rate of greenhouse residues is accepted as 100% (Karaca et al., 2016; Atılğan et al., 2020).

Total energy values (EP) were calculated by Equation 2 (Karaca et al., 2016; Karaca, 2017).

$$\text{EP} = \text{TAM} \times \text{ID} \quad (2)$$

In the equation; TAM= Total dry basis waste amount (tons), ID= Dry basis heating value (MWh/tons)

The values given by (Callejón-Ferre et al., 2011) were used to calculate the amount of fresh and dry biomass residue, ash contents and upper calorific values of the courgette plant (Table 1).

Table 1. Amounts of waste generated by courgette plants and their energy potential

Plant type	Ash content (%)	Upper calorific value (kJ/kg dry basis)	kWh/kg
Courgette	29.75	12849.37	3.57

The number of houses whose electricity needs can be met if the electricity that can be produced is used in homes is calculated by dividing the average electricity consumption of a house by the electricity that can be produced. The average electricity consumption of a household was used in the calculations as 2.333 MWh/year (Ertop et al., 2023).

Results and Discussion

Changes in the cultivation area and production quantities of courgette (*Cucurbita pepo L.*) grown under greenhouse conditions in Turkey over the years are given in Table 2 (TUIK, 2024).

Table 2. Change in area and production quantities over the years

Years	Planted Area, ha	Production Quantity, tons	Average yield, ha/tons
2019	27650	211953	76.7
2020	33697	309276	91.8
2021	41029	384940	93.8
2022	42669	373673	87.6
2023	36804	350620	95.3

As seen in Table 2, the average cultivated area is 3637 ha, the production amount is 326092.4 tons and the average yield is 89.0 tons/ha. The amount of residue on a fresh and dry basis that will occur as a result of the production of courgette plants produced under greenhouse conditions in Turkey is given in Table 3.

Table 3. Residue amounts on wet and dry basis resulting from greenhouse production

Years	Wet basis plant residue, tons	Dry basis plant residue, tons
2019	55300	11060.0
2020	67394	13478.8
2021	82058	16411.6
2022	85338	17067.6
2023	73608	14721.6

As seen in Table 3 is examined, it is determined that the amount of wet and dry residue that can occur in the study area is 363698 tons and 72739.6 tons, respectively, at the end of five years. Boyacı (2023) It is determined that the amount of wet and dry residue that can occur in Adana province is 3788796 tons and 757759.2 tons, respectively, for watermelon and melon at the end of five years. Similarly, it is observed in the study that more residue is formed than plant production. The total amount of energy that can be obtained from plant residues resulting from courgette production in Turkey and the number of households whose electricity consumption can be met are given in Table 4.

Table 4. The total amount of energy that can be obtained from plant residues

Years	Total energy that can be obtained, GWh	Number of households whose electricity consumption can be met
2019	39,5	16920.75
2020	48,1	20621.29
2021	58,6	25108.20
2022	60,9	26111.81
2023	52,5	22522.66

Biomass differs from other alternative energy sources in terms of resource diversity and can be converted into energy through many conversion processes (Toklu, 2017). As seen in Table 4, it was determined that the energy

that can be obtained from the plant residues resulting from courgette production in Turkey at the end of 5 years is 259.6 GWh. Accordingly, as seen in Table 4, if the total electrical energy that can be obtained from courgette residues in Turkey is used in households, the number of houses that can meet the electricity demand was calculated as 111284.7 households in 5 years. Boyacı (2023) calculated that the energy that can be obtained at the end of 5 years by utilizing the plant residues that will occur as a result of watermelon and melon production in Adana province is 2886678.7 MWh and if the total electrical energy that can be obtained is used in households, the number of houses that can meet the electricity need is calculated as 343328.7 households in 5 years. In the study conducted by Atilgan et al., (2023), it was calculated that 2884.43 MWh of electricity can be produced in Mersin province and 2218.26 MWh in Antalya province from the wastes formed during banana production for 5 years. The calculated 5-year potential electricity amount and the number of houses that can meet the need were determined as 1237 households in Mersin and 952 households in Antalya. As a result of the study, they reported that the reuse of the potential energy that can be obtained from banana wastes in agricultural production will provide a positive acceleration to agricultural activities.

Renewable energy sources do not have a wide application area in the world or in Turkey today due to some technological and economic results. Biomass can be used to meet various energy needs, including generating electricity, heating homes, refueling vehicles, and providing process heat for industrial facilities (Toklu, 2017). It is also possible to obtain heat, electricity, solid fuel, liquid fuel, gaseous fuels and other products from biomass resources through various processes (Bilgin et al., 2012). Alternative energy sources can potentially help meet acute energy demand and sustain economic growth in many regions of the world. Biogas, biofuels and woody biomass are other energy sources that can be obtained from organic waste materials. These biomass energy sources have significant potential in combating climate change (Omer, 2012). Accordingly, it can be said that the energy to be obtained from plant residues can be used in different areas, thus reducing both negative environmental effects and providing economic advantages. The comparison of the carbon dioxide emissions of the energy potential that can be obtained in the study with different fuels is given in Table 5.

Table 5. Amounts of carbon dioxide released into the atmosphere by energy sources

Years	Biyomas tons CO ₂ per kWh	Natural gas tons CO ₂ per kWh	Coal tons CO ₂ per kWh
2019	986.9	7500.5	11842.8
2020	1202.7	9140.8	14432.8
2021	1464.4	11129.7	17573.2
2022	1523.0	11574.6	18275.7
2023	1313.6	9983.6	15763.6

In the study, as seen in Table 5 for the same amount of energy equivalence, the amount of carbon dioxide released into the atmosphere by coal and natural gas, which are widely used in Turkey, is compared with biomass. Accordingly, the amount of carbon dioxide released into the atmosphere by biomass is 13.2% of natural gas and 8.3% of coal. In this case, it has been seen that in addition to energy recovery from biomass residues, it is also advantageous in terms of the amount of carbon dioxide to be released into the atmosphere.

Conclusions

As a result of the study evaluating the energy potential of plant residues resulting from harvest in greenhouse courgette cultivation, it was determined that a large amount of residue was generated on a dry basis at the end of production. It was determined that a significant amount of energy could be obtained by reducing the negative environmental effects of these residues and using them as an energy source. In our country, which is dependent on foreign sources for energy, the evaluation of agricultural residues will provide a significant amount of energy as well as positive contributions to the national economy in terms of reducing the negative environmental effects that these residues will create. In addition, as a result of the evaluation of biomass residues instead of fossil fuels, it will be possible to contribute to the goals of protecting the environment and taking precautions against the climate crisis among the sustainable development goals of the United Nations (UN). In addition, under the heading of “Good health and well-being”, it is aimed to significantly reduce the number of diseases and deaths caused by harmful chemicals and air, water and soil pollution by 2030. Under

the heading of "Affordable and clean energy", providing universal access to affordable, reliable and modern energy services, significantly increasing the share of renewable energy in global energy resources, encouraging investments in clean energy research, energy infrastructure and clean energy technology areas covering renewable energy and energy efficiency are also among these goals. Encouraging investments in renewable energy resources and increasing state incentives in order to comply with these goals will help contribute to these goals on behalf of our country.

References

- Atılğan, A., Saltuk, B., Ertop, H. & Aksoy, E. (2020). Sera atıklarından biyogaz enerji potansiyelinin belirlenerek sayısal haritalarının oluşturulması: Antalya ili örneği. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed & Refereed*, 7(12), 19-30. <https://doi.org/10.38065/euroasiaorg.270>
- Atılğan, A., Krakowiak-Bal, A., Ertop, H., Saltuk, B. & Malinowski, M. (2023). The energy potential of waste from banana production: A case study of the Mediterranean Region. *Energies*, 16, 5244. <https://doi.org/10.3390/en16145244>
- Atılğan, A., Oz, H., Yılmaz, H.I. & Uzer, H. (2014). Determination of current status in the resulting of waste materials from production of greenhouse and its environmental interaction. *Engineering for Rural Development*, 29, 120-125.
- Bilgin, S., Ertekin, C. & Kürklü, A. (2012). Türkiye'deki sera bitkisel biyokütle atık miktarının belirlenmesi. 27. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, Samsun, Turkey, 5-7 Eylül, pp. 499-508.
- Boyacı, S (2023). Bazı Örtüaltı Bitki Artıklarının Potansiyel Biyokütle ve Elektrik Enerjisi Değerlerinin Belirlenmesi: Adana İli Örneği. Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanlarına Güncel Bakış, Öğütücü, H., Karaman, M.Y.E., Editörler; Platanus Publishing, pp.236-244. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1045312>
- Boyacı, S., & Kartal, S. (2019). Determination of environmental problems caused by agricultural wastes in greenhouse enterprises and solution suggestions. *MKU. Tar. Bil. Derg.*, 24(Special Issue), 51-60.
- Boyacı, S. (2018). Environmental problems caused by agricultural wastes resulting from greenhouse and high tunnel cultivation and solution suggestions. *Fresenius Environ. Bull.*, 27(4), 2510-2517.
- Callejón-Ferre, A.J., Velázquez-Martí, B., López-Martínez, J.A. & Manzano-Agugliaro, F. (2011). Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 948-955. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.012>
- Ertop, H., Atılğan, A., Kociğcka, J., Krakowiak-Bal, A., Liberacki, D., Saltuk, B., & Rolbiecki, R. (2023). Calculation of the potential biogas and electricity values of animal wastes: Turkey and Poland case. *Energies*, 16, 7578. <https://doi.org/10.3390/en16227578>
- Gürel, B. (2020). Determination of current biomass potential in Turkey and calculation of sectoral and total combustion energy values for wastes which are a good alternative for energy production by combustion. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 407-416. <https://doi.org/10.21923/jesd.671767>
- Güzey, S. & Atılğan, A. (2015). Sera yetiştiriciliğinde kirletici faktörlerin belirlenmesi: Denizli ili örneği. *Süleyman Demirel Üniv. Zir. Fak. Derg.*, 10(2), 22-33.
- Karaca, C. & Başçetinçelik, A. (2014). Defne yaprağının briketleme ve yanma özellikleri. Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştay Bildiriler Kitabı, 28-29 Mayıs Samsun, Turkey, pp.131-138.
- Karaca, C. (2015). Mapping of energy potential through annual crop residues in Turkey. *Int J Agric & Biol Eng*, 8(2), 104-109.
- Karaca, C. (2017). Antalya'da seracılık biyokütle artıklarının potansiyelinin haritalanması ve enerji üretim amacıyla değerlendirilmesi. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 30(1): 21-25.
- Karaca, C., Öztürk, H.H. & Ekinci, K. (2016). Aydın ilinde bitkisel kökenli tarımsal biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi. 2.Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu, 27-30 Eylül, Samsun, Turkey, pp. 47-56.

Mazuela, P., Urrestarazu, M. & Bastias, E. (2012). Vegetable waste compost used as substrate in soilless culture. *Crop Production Technologies*, Sharma, P. Eds.; InTech, 2012, pp.179-198. <https://doi.org/10.5772/29221>

Omer, A.M. (2012). Biomass energy resources utilisation and waste management. *Agricultural Sciences*, 3(1), 124-145. <https://doi.org/10.4236/as.2012.31016>

Reicosky, D.C. & Wilts, A.R. (2005). Crop-Residue Management. Hillel, D., Eds.; *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, 2005, pp. 334–338. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00254-X>

Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, 235-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>

Turkish Statistical Institute (TUIK). (2024). Bitkisel Üretim İstatistikleri. Accessed on 10 October 2024, available online at: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ENERGY SAVING MEASURES ON HEAT ENERGY REQUIREMENT IN GREENHOUSES

Sedat BOYACI

Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Kırşehir-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-9356-1736

Atılgan ATILGAN

Prof. Dr., Alanya Alaaddin Keykubat University, Faculty of Engineering, Department of Biosystems Engineering, Antalya- Türkiye, ORCID: 0000-0003-2391-0317

Abstract

Although the greenhouse sector has become widespread worldwide in recent years and its increasing area every day has revealed its importance, the energy required for cultivation is quite high. For this reason, studies on energy conservation, efficient use and reduction of negative environmental effects to ensure sustainability in the greenhouse sector are gaining more and more importance every day. In this study, it was aimed to determine the effects of energy conservation in greenhouses on heat requirement, fuel amount, fuel cost and the amount of carbon dioxide released into the atmosphere. For this purpose, calculations were made for greenhouses with 6 different equipment features. According to the results obtained, if the side walls of the greenhouse were double-layered (1809735 kWh/year) instead of single-layered cover material (1925653 kWh/year), the energy to be saved was determined as 6%. If the side walls of the greenhouse were double-layered instead of single-layered cover material and well-insulated double-layered thermal curtains were used (1286937 kWh/year), the energy to be saved was calculated as 33.2%. In addition, according to greenhouse types, in case of using natural gas, the annual amount of CO₂ released into the atmosphere per unit area is calculated as 106 kg/m²/year for Type-1 and 71 kg/m²/year for Type-6. Accordingly, thanks to the technical measures taken, the amount of CO₂ released into the atmosphere per unit area will decrease by 35 kg/m²/year. In case of using imported coal, it will decrease by 89 kg/m²/year. Accordingly, it has been seen that using cover materials with low heat transfer coefficients and using well-insulated thermal curtains in greenhouses are important in terms of energy efficiency. The results of the study will contribute to the energy conservation measures to be taken and feasibility studies to be conducted in regions with continental climates where greenhouses are planned to be established.

Keywords: Greenhouse, energy efficiency, conservation, fuel amount, fuel cost, carbon dioxide

Introduction

Energy saving has become urgent due to the scarcity of energy reserves, rapid increases in energy prices, and increasingly serious environmental problems such as global warming, ozone depletion, and climate change. The use of renewable energy sources and the adoption of energy saving measures are of great importance to all sectors, such as industries, transportation, and agriculture (Cuce et al., 2016). Recent reports have shown that building construction accounts for approximately 40% of global energy consumption and 25% of greenhouse gas emissions (Hong et al., 2016). With the increasing demand for food worldwide, controlled environment agriculture is an important strategy for the production of products throughout the year. One of the important types of controlled environment agriculture is greenhouse farming (Iddio et al., 2020).

Greenhouses have attracted global agricultural interest due to their ability to meet the demand for the production of high-quality products throughout the year, ensuring efficient and sustainable use of available resources (water, energy, etc.) (Samaranayake et al., 2020). Agricultural production in greenhouses is evolving towards industrialization and scale with the modernization of facility agriculture. The greenhouse industry is heavily dependent on fossil fuels, which contribute to significant greenhouse gas (GHG) emissions (Gorjian et al., 2021). Due to their lightweight construction and inefficient operation, greenhouses consume more fossil fuel energy to operate mechanical systems and have a larger carbon footprint than other similarly sized buildings (Iddio et al., 2020). Although greenhouse cultivation provides significant benefits compared to open field cultivation, it also brings some challenges that need to be considered. The high amount of energy required

to maintain a stable growing environment remains one of the most important issues in greenhouse production, and modern greenhouse agriculture is among the most energy-intensive areas in the agricultural industry (Rasheed et al., 2018; Samaranayake et al., 2020). A large portion of this energy is consumed for heating purposes (Ahamed et al., 2019). Since greenhouses are seasonal production structures that consume a lot of energy, heating costs in the operation of greenhouses can constitute 40%-50% of total production costs, depending on external climate conditions (Shen et al., 2018; Tataraki et al., 2020). Therefore, reducing greenhouse heating costs can make greenhouse production more economical and sustainable (Ahamed et al., 2019). Increasing energy demand has become an important issue for greenhouse sectors to achieve sustainable development (Zhang et al., 2020). Sustainability in greenhouses can be achieved by increasing energy efficiency (Zaimoğlu, 2017). Reducing heating costs is a major challenge for greenhouse growers, especially in cold regions (Ahamed et al., 2019). Technical measures to be taken in greenhouses allow for serious energy savings and increased energy efficiency (Baytorun et al., 2019). At the same time, the chance of competition can be increased in regions that are disadvantaged in terms of heating costs (in cold regions) with the measures to be taken (Çaylı & Temizkan, 2018).

Given the negative impact that climate variability and change has had on outdoor crop production in recent years, growing crops in greenhouses protects crops from climatic risks and increases yields. However, while the global expansion of the greenhouse sector and the fact that it is increasing in area every day demonstrate its importance, the energy required for cultivation is quite high. For this reason, studies on energy conservation, efficient use and reduction of negative environmental impacts to ensure sustainability in the greenhouse sector are becoming more and more important. To this end, the study aimed to determine the heat requirements, fuel consumption, fuel costs and carbon dioxide emissions in greenhouses of the same size and with different equipment. The results of the study will contribute to energy saving measures and feasibility studies in regions with continental climates where greenhouses are planned.

Material and Method

In order to determine the heat energy requirement in greenhouses, calculations were made for Kırşehir province, which is located in the Central Anatolia Region of Turkey and has a continental climate. In order to eliminate the effect of greenhouse dimensions on the calculations in determining the heat requirement in the study, greenhouse features with the same dimensions were used. The dimensions of the greenhouse used in the calculation to determine the heat energy requirement are given in Table 1.

Table 1. Greenhouse dimensions used in calculating heat requirements

Structural features	Dimensions	Structural features	Dimensions
Number of compartments	10 adet	Truss spacing	3.0 m
Compartment width	8.0 m	Roof height	2.10 m
Compartment length	60.0 m	Ridge height	5.60 m
Roof slope angle	27.7°	Cover area	6810.38 m ²
Side wall height	3.50 m	Floor area	4800.0 m ²

Some technical specifications of the greenhouses used in heat requirement calculations are given in Table 2.

Table 2. Some technical specifications of greenhouses

Parameters	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
Greenhouse type	Multi-span and arched roof					
Temperature	Day : 21 °C, Night : 15 °C, Ventilation temperature: 25 °C					
Cover materials	Roof: Single Layer Plastic, Side Wall: Single Layer Plastic			Roof: Single Layer Plastic Side Wall: Double Layer Plastic		
Thermal curtain/ sealing	No Thermal Curtain	Single Layer, Aluminum Texture / Good	Multi-Layer, Aluminum Texture / Good	No Thermal Curtain	Single Layer, Aluminum Texture / Good	Multi-Layer, Aluminum Texture / Good
Heating system	Side wall, Steel pipe heating systems, 51 mm					
Water inlet temperature	70°C					
Water outlet temperature	50°C					

In greenhouses, heat energy requirement, fuel amount, fuel cost and carbon dioxide emission amount were calculated with the help of ISIGER-SERA expert system developed by Baytorun et al., (2016). In ISIGER-SERA expert system, the annual heat energy requirement in the greenhouse depending on the hours of the year was calculated using equation 1 (Rath, 1992).

$$Q = \sum_{n=1}^{8760} (((\vartheta_{in} - \vartheta_{ioHn} - \Delta\vartheta_{spn}) \times k'_a \times A_H \times (1 - EE_{ES})) \times t_{si}) \quad (1)$$

In the equation; Q= Heat energy requirement of the greenhouse (Wh), ϑ_{in} = Desired internal temperature in the greenhouse (°C), ϑ_{ioHn} = Actual temperature in the unheated greenhouse (°C), $\Delta\vartheta_{spn}$ = Temperature increase depending on the characteristics of the greenhouse (°C), k'_a = Total heat conduction coefficient of the cover material (W/m²°C), A_H = Cover surface area of the greenhouse (m²), EE_{ES} = Heat savings provided by the thermal curtain (-), n= Hours of the year, t_{si} = Time period (1 h)

The total heat transfer coefficient of the cover material was calculated with the help of Equation 2 given by Rath (1992), depending on the cover material and wind speed.

$$k'_a = k'_a + \frac{k'_a}{x_1} \times (x_2 \times v_w) + x_3 \quad (2)$$

In the equation; k'_a : Wind speed, x_1 =7.56 (-), x_2 : 0.35 (s/m), x_3 : -1.4 (-)

In the calculations, when the thermal curtain effect is taken into account, the heat increase provided by the thermal curtain used is calculated using Equation 3 in the case of $ka' \leq 10$ and $EE_{ES} \leq 0.6$ (Rath, 1992).

$$EE_{ES} = \frac{EE_{ES}}{KF_{ES}} \times k'_a \quad (3)$$

In the equation; KF_{ES} = Correction factor depending on the sealing of the thermal curtain, is taken as 6.8 W/m²°C if the thermal curtain is well insulated and tightly closed.

In order to determine the actual temperature values occurring in the greenhouse, the theoretical temperature value was calculated using Equation 4 (Rath, 1992).

$$\vartheta_{ith} = \frac{q_{GS} \times D_G \times \eta \times A_G}{k'_a \times (1 - EE_{ES}) \times A_H} + \vartheta_a \quad (4)$$

In the equation; ϑ_{ith} = Theoretically occurring temperature (°C), q_{GS} = Solar radiation (W/m²), D_G = Permeability of the cover material used (%), η = Solar energy conversion factor into heat energy, A_G = Greenhouse floor area (m²), ϑ_a = Outdoor temperature (°C)

The amount of fuel required for annual heat energy in greenhouses is found using Equation 5, and the amount of CO₂ released into the atmosphere by the fuels used to heat greenhouses is found using Equation 6 (Baytorun et al., 2016).

$$B_y = \frac{Q}{H_u \cdot \eta_{ges}} \quad (5)$$

$$SEGM_y = B_y \cdot H_u \cdot FSEG \quad (6)$$

In the equations; B_y= Fuel amount corresponding to unit area (kg/m²), H_u= Lower heating value of fuel (kWh/kg), η_{ges}= Combustion efficiency (%), SEGM_y= Annual CO₂ emission amount (kg eq. CO₂), FSEG= CO₂ emission equivalence according to fuel type (kg eq. CO₂/kWh)

The calorific values and combustion efficiency of the fuels considered in the study are given in Table 3.

Table 3. Some properties of fuels used in calculations

Fuel type	Lower calorific value of fuel, kWh	Combustion efficiency, %	Price, \$
Natural gas, m ³	8.25	0.93	0.23
Fuel-oil, kg	9.56	0.80	0.76
Imported Siberian coal, kg	7.00	0.65	0.17
Mix LPG, L	11.0	0.92	1.47
Propane, L	11.1	0.92	1.73

Results and Discussion

The required heat energy values in the calculations made for 6 types of greenhouses with the same dimensions and different measures taken for energy conservation are given in Table 4.

Table 4. Heat energy values required in greenhouses

Parameters	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-6
Annual heat energy, kWh/year	1925653	1497138	1411438	1809735	1374064	1286937
Annual heat energy per unit area, kWh/m ² year	401	312	294	377	286	268

As a result of the calculation based on hourly climate values for greenhouses, the total annual heat energy requirement for Type 1 was found to be the highest at 1925653 kWh/year and the lowest for Type 6 at 1286937 kWh/year. Kim et al. (2018) determined that the energy saving effect of the greenhouses is mainly represented by the decrease in the general heat transfer coefficient (U-value), and that a 1 W/m²°C decrease in the U-value reduces the energy consumed in the polyethylene greenhouse by 70.8 kWh. The difference between the greenhouses is the use of double-layer PE plastic on the side wall and thermal curtains in the inner environment. The technical measures taken reduce the heat transfer coefficient and the annual heating energy requirements.

Thanks to the technical measures taken in the study, the heat energy values required for the unit area of the greenhouses are given in Figure 1.

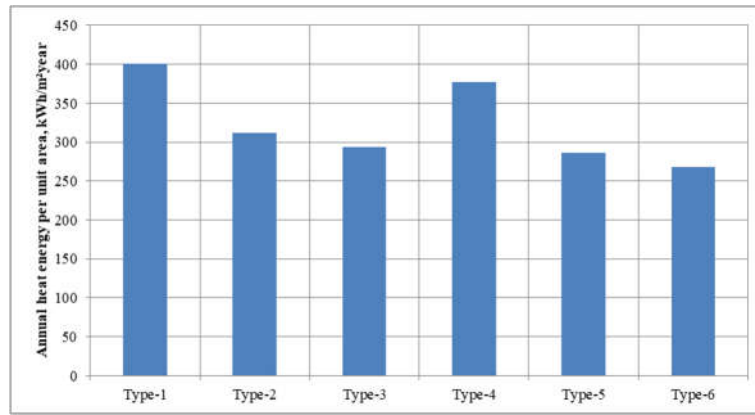


Figure 1. Change of heat energy required per unit area in greenhouses

As seen in Figure 1, in the greenhouse with roof and side walls covered with PE (Type-1), the annual heat energy required per unit area is 401 kWh/m²/year, while in case the side walls are covered with double-layer PE (Type-4), the annual heat energy required per unit area is 377 kWh/m²/year and the energy saved will be 6%. In case the side walls are double-layer PE and the sealing of the thermal curtains is good (Type-6), the required heat energy is 268 kWh/m²/year and the heating energy saved will be 33.2% compared to Type-1. Boyacı et al. (2023) reported that in case of using thermal curtains in the greenhouse, approximately 21% heat energy saving can be achieved due to the decrease in the heat transfer coefficient. Teitel et al. (2009) reported that approximately 40% energy saving can be achieved by using aluminum curtains due to lower heating demand at night. Similar to the studies conducted by the researchers, it was determined that the heat transfer coefficient would decrease with the use of thermal curtains, thus reducing the heat energy required in greenhouses. The fuel amounts required in the greenhouses calculated in the study are given in Table 5.

Table 5. Amounts of fuel needed in greenhouses

Fuel types	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-6
Natural Gas, (m ³ /m ² /year)	46.4	36.1	34.0	43.6	33.1	31.0
Fuel-Oil (kg/m ² /year)	45.8	35.6	33.6	43.1	32.7	30.6
Imported Siberian Coal (kg)	78.2	60.8	57.3	73.5	55.8	52.2
Mix LPG, (L/m ² /year)	34.9	27.1	25.5	32.8	24.9	23.3
Propane, (L/m ² /year)	34.6	26.9	25.3	32.5	24.7	23.1

As seen in Table 5 is examined, the amounts of fuel consumed per unit area depending on the heat energy required for different greenhouse types differ according to the calorific values and efficiency of the fuels used. Accordingly, the annual amounts of natural gas consumed per unit area according to greenhouse types are calculated as 46.4 m³/m²/year for Type-1 and 31.0 m³/m²/year for Type-6. Accordingly, thanks to the technical measures taken, the annual amount of natural gas required per unit area has decreased by 15.4 m³/m²/year. In the case of using imported coal, it will decrease by 26 kg/m²/year per unit area. Similarly, in the study conducted by Boyacı et al. (2023), the fuel consumption in the greenhouse heated with natural gas and using thermal curtains was 59.14 m³/night, while the fuel consumption in the greenhouse using thermal curtains was 74.11 m³/night. In this case, it is seen that the amount of fuel per unit area will decrease thanks to the technical measures to be taken, and the decreasing amount of fuel will contribute positively to fuel costs.

Fuel costs resulting from the amount of fuel consumed in the greenhouses calculated in the study are given in Table 6.

Table 6. Fuel costs per unit area dependent on fuel consumed in greenhouses

Fuel types	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-6
Natural Gas, (\$/m ² year)	10.6	8.2	7.8	10.0	7.6	7.1
Fuel-Oil, (\$/m ² year)	34.7	27.0	25.4	32.6	24.8	23.2
Imported Siberian Coal, (\$/m ² year)	13.4	10.4	9.8	12.6	9.6	9.0
Mix LPG, (\$/m ² year)	26.1	20.3	19.1	24.5	18.6	17.4
Propane, (\$/m ² year)	30.5	23.7	22.3	28.6	21.7	20.4

As seen in Table 6, fuel costs per unit area differ depending on the fuel consumed for different greenhouse types. Accordingly, the annual natural gas cost per unit area is calculated as 10.6 \$/m²year for Type-1 and 7.1 \$/m²year for Type-6 according to greenhouse types. Accordingly, thanks to the technical measures taken, the annual natural gas cost required per unit area will decrease by 3.5 \$/m²year. In case of using imported coal, it will decrease by 4.4 \$/m²year. In this case, it is seen that thanks to the technical measures to be taken, the fuel cost per unit area will decrease and the reduced fuel amount will make a positive contribution to greenhouse enterprises by reducing the share of heating in production costs.

The carbon dioxide equivalence released into the atmosphere depending on the fuel consumed in the greenhouses calculated in the study is given in Table 7.

Table 7. Carbon dioxide equivalent from fuel used in greenhouses (kg CO₂/kWh year)

Fuel types	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-6
Natural Gas	106	83	78	100	76	71
Fuel-Oil	162	126	119	152	115	108
Imported Siberian Coal	268	208	196	252	191	179
Mix LPG	116	90	85	109	83	77
Propane	116	90	85	109	83	77

As seen in Table 7, the CO₂ emission values released into the atmosphere per unit area differ depending on the fuel consumed for different greenhouse types. Accordingly, in case of using natural gas according to greenhouse types, the annual amount of CO₂ released into the atmosphere per unit area is calculated as 106 kg/m²year for Type-1 and 71 kg/m²year for Type-6. Accordingly, thanks to the technical measures taken, the amount of CO₂ released into the atmosphere per unit area will decrease by 35 kg/m²year. In case of using imported coal, it will decrease by 89 kg/m²year. In order to increase energy efficiency, it is important not to ignore the CO₂ emission released into the atmosphere in reducing the required heat energy value (Baytorun & Güğercin, 2015). Boyacı et al. (2023) reported that the CO₂ emission released into the atmosphere decreases by 29.5 kg per night when thermal curtains are used compared to greenhouses without thermal curtains. Reducing the amount of CO₂ released into the atmosphere is as important as the amount and cost of fuel consumed in heated greenhouses. Especially in today's climate change, it is important to reduce the use of fossil fuels or, if possible, to use renewable energy sources for sustainable greenhouse farming and the environment. For this purpose, it has been determined that CO₂ released into the atmosphere from a unit area can be reduced and contribute to a clean environment thanks to technical measures to be taken in greenhouses.

The changes in the amount of carbon dioxide released into the atmosphere in case of using natural gas and imported coal in greenhouses are given in Figure 2.

CO₂ emission equivalence

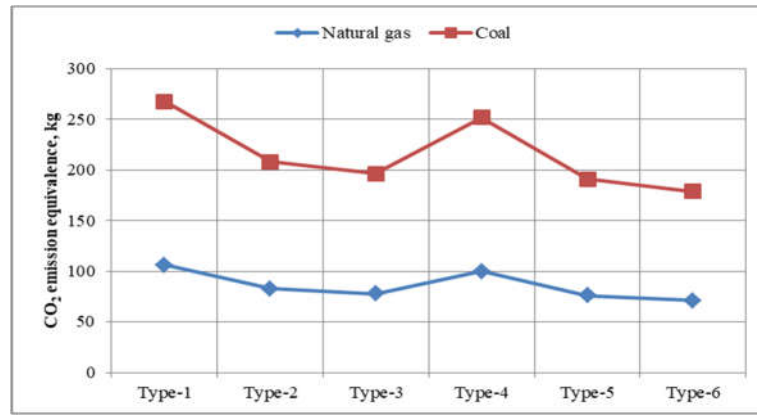


Figure 2. Change in required heat energy per unit area depending on fuel type

As seen in Figure 2, decreasing fuel amounts due to increased energy conservation measures have reduced the amount of carbon dioxide released into the atmosphere. In particular, among the fuels calculated in the study, imported coal caused the highest carbon dioxide emission, while natural gas had the lowest carbon dioxide emission. In this case, it is seen that natural gas is the most suitable fuel among the fuels calculated in cases where renewable energy sources cannot be used.

Conclusions

As a result of the study in which heat requirement, fuel amount, fuel cost and carbon dioxide amount released into the atmosphere were determined in order to increase energy efficiency in greenhouses, it was determined that the heat energy required in greenhouses decreased with energy conservation measures. The decreased heat energy will contribute to the reduction of the share of heating in production costs by reducing the amount of fuel and therefore fuel costs. It will also reduce the amount of carbon dioxide released into the atmosphere depending on the consumed energy source. In addition to the fact that the study results will contribute to feasibility studies in enterprises, the energy conservation measures to be taken will contribute to doubling the global energy efficiency progress rate under the title of “Affordable and clean energy”, which is among the sustainable development goals of the United Nations (UN). By reducing the amount of carbon dioxide released into the atmosphere, it will contribute to the significant reduction of diseases caused by air pollution under the title of “Good health and well-being”. In addition, since encouraging investments in clean energy technology fields” is also among these goals, increasing incentives for technical measures that will increase energy savings in greenhouse investments will contribute to the development of sustainable and environmentally friendly greenhouse technologies as well as reducing energy costs in enterprises.

References

- Ahamed, M.S., Guo, H. & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 178: 9-33. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017
- Baytorun, A.N. & Güğercin, Ö. (2015). Seralarda enerji verimliliğinin artırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2): 125-135. DOI: 10.21605/cukurovaummfd.242754
- Baytorun, A.N., Akyüz, A., Üstün, S. & Çaylı, A. (2019). Seralarda ısı perdesi kullanımının ısı tasarrufuna etkisinin belirlenmesi ve ekonomik açıdan bir değerlendirme. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(6): 886-895.
- Baytorun, A.N., Önder, D. & Güğercin, Ö. (2016). Seraların ısıtılmasında kullanılan fosil ve jeotermal enerji kaynaklarının karşılaştırılması. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(10): 832-839. DOI: 10.24925/turjaf.v4i10.832-839.863
- Boyacı, S., Atılgan, A., Kociğcka, J., Liberacki, D., Rolbiecki, R. & Jagosz, B. (2023). Determination of the effect of a thermal curtain used in a greenhouse on the indoor climate and energy savings. *Energies*, 16, 7744. DOI: 10.3390/en16237744

- Cuce, E., Harjunowibowo, D. & Cuce, P.M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:34–59.
- Çaylı, A. & Temizkan, Y. (2018). Determination of the effect of heat saving precautions and cladding materials on heat requirement via expert system in the Kahramanmaraş region greenhouses. *KSÜ Journal Of Agriculture and Nature*, 21(3):312-322.
- Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M.S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X.X., Aghaei, M. & Shamshiri, R.R. (2021). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 285: 124807.
- Hong, J., Shen, Q. & Xue, F. (2016). A multi-regional structural path analysis of the energy supply chain in China's construction industry. *Energy Policy*, 92: 56–68.
- Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorro, G. & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117: 109480.
- Kim, H.K., Kang, G.C., Moon, J.P., Lee, T.S. & Oh, S.S. (2018). Estimation of thermal performance and heat loss in plastic greenhouses with and without thermal curtains. *Energies*, 11: 578.
- Rasheed, A., Lee, J.W. & Lee, H.W. (2018). Development and optimization of a building energy simulation model to study the effect of greenhouse design parameters. *Energies*, 11, 2001. DOI: 10.3390/en11082001
- Rath, T.H. (1992). Einsatz wissenbasierter Systeme zur Modellierung und Darstellung von Gartenbautechnischen Fachwissen am Beispiel des hybriden Expertensystems HORTEX. Gartenbautechnische Informationen, Heft 34, Institut für Technik im Gartenbau der Universität Hannover.
- Samaranayake, P., Liang, W., Chen, Z.H., Tissue, D. & Lan, Y.C. (2020). Sustainable protected cropping: a case study of seasonal impacts on greenhouse energy consumption during capsicum production. *Energies*, 13, 4468. DOI: 10.3390/en13174468
- Shen, Y., Wei, R. & Xu, L. (2018). Energy consumption prediction of a greenhouse and optimization of daily average temperature. *Energies*, 11(65): 1-17. DOI: 10.3390/en11010065
- Tataraki, K., Giannini, E., Kavvadias, K., & Maroulis, Z. (2020). Cogeneration economics for greenhouses in Europe. *Energies*, 13: 3373. DOI: 10.3390/en13133373
- Teitel, M., Barak, M. & Antler, A. (2009). Effect of cyclic heating and a thermal curtain on the nocturnal heat loss and microclimate of a greenhouse. *Biosystems Engineering*, 102: 162–170.
- Zaimoğlu, Z. (2017). Modeling of heat requirements for agricultural greenhouse in different climate regions. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 32(4): 79-86.
- Zhang, X., Lv, J., Xie, J., Yu, J., Zhang, J., Tang, C., Li, J., He, Z. & Wang, C. (2020). Solar radiation allocation and spatial distribution in Chinese solar greenhouses: Model Development and Application. *Energies*, 13(5): 1108.

**BİYOKÜTLE TABANLI ENERJİ ÜRETİMİ İÇİN SANTRAL FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI****Yasir Tümay DOST**

Yüksek Lisans Öğrencisi, Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye, ORCID: 0009-0005-2860-1021

Cemil KOYUNOĞLU

Assistant Prof. Dr., Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Yalova-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6309-1569>

Özet

Artan küresel enerji talebi ve CO₂ emisyonlarına bağlı çevresel etkiler, fosil yakıtlara alternatif sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Biyokütle enerjisi, tarımsal, kentsel, ormansal ve endüstriyel atıklardan enerji üretme potansiyeline sahip olup, fosil yakıtların çevresel zararlarını azaltmaya katkı sağlar. Bu çalışmada, Türkiye’de biyokütle enerjisinin mevcut durumu, sürdürülebilir kalkınmaya katkıları ve kaynak çeşitliliği incelenmiş, Yalova örneğinde biyokütle tesislerinin fizibilitesi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, biyokütle enerjisinin çevreye olumlu etkilerini ve Türkiye’nin enerji güvenliğine katkısını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle enerjisi, sürdürülebilir kalkınma, çevresel etki, fizibilite, Türkiye

BIOMASS-BASED ENERGY PRODUCTION PLANT FEASIBILITY STUDY**Abstract**

Increasing global energy demand and the environmental impacts associated with CO₂ emissions have heightened interest in sustainable energy sources as alternatives to fossil fuels. Biomass energy, derived from agricultural, urban, forestry, and industrial waste, contributes to reducing the environmental damage caused by fossil fuel usage. This study examines the current state of biomass energy in Turkey, its contributions to sustainable development, and the diversity of its sources, while evaluating the feasibility of biomass facilities through a case study in Yalova. The results highlight the positive environmental impacts of biomass energy and its contributions to Turkey's energy security.

Keywords: Biomass energy, sustainable development, environmental impact, feasibility, Turkey

Giriş

Son yıllarda artan nüfus ve dünya çapındaki teknolojik gelişmeler sebebiyle hızla artan küresel enerji talebi bununla beraber açığa çıkan CO₂ emisyonu ile ciddi çevresel bozulmaya neden olan sınırlı fosil yakıt kullanımının artması, enerji için yeşil, yenilenebilir ve sürdürülebilir alternatif kaynaklar bulma konusundaki ilgiyi artırmıştır. (Wang ve ark., 2020). Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkisini azaltmak için sera gazı emisyonlarının derhal azaltılması gerekmektedir. Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü topluluğunun (IPPC) küresel ısınma artışını 2040 yılına kadar 1,5 °C’nin altında tutmak için hazırladığı rapora göre, enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının kademeli olarak azaltılması gerekmektedir (Roberts ve ark., 2019).

Gelişen teknoloji, sanayileşme ve artan nüfus nedeniyle dünyanın enerjiye olan ihtiyacı sürekli artış eğilimindedir. Günümüzde fosil yakıtlar, enerji talebinin önemli bir kısmını oluşturmakla birlikte yoğun ve kontrolsüz kullanımına bağlı olarak rezervleri hızla azalmaktadır (Stöcker, 2008).

Biyokütle, hızla yükselen nüfus ve sanayileşme ile birlikte artan enerji talebini sürdürülebilir olarak karşılayabilen önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütlenin temel kullanım alanları elektrik, ısı ve ulaşım olmakla birlikte, biyokütle işlemleri sırasında elde edilen yan ürünlerin tekrar kullanılması veya pazarlanması biyokütlenin diğer kullanım alanları arasında yer almaktadır (Çolakoğlu ve ark., 2021). Biyokütle

enerji üretiminin diğer enerji kaynaklarına karşı sera gazı emisyonlarını azaltıcı ve iklim değişikliğine yavaşlatıcı etkisinin olması da dahil olmak üzere önemli avantajları bulunmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma yalnızca çevresel kaygılarla sınırlı olmayıp, sürdürülebilirliği çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) olmak üzere üç boyutta kapsamakta ve bunlar şirketlerin gelecekteki finansal performansının daha iyi belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Çolakoğlu ve ark., 2021).

Bu çalışmada, yeni ve temiz kaynaklarla verimli ve sürdürülebilir enerji üretiminin giderek önem kazanması gerektiği düşüncesi ile biyokütle ve biyokütle enerjisi hakkında kaynak tarama çalışması yapılmıştır. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara çözüm olabilecek biyokütle enerjisi, biyokütle enerjisinin Dünya enerji profili ve Türkiye profilindeki yeri değerlendirilmiştir. Türkiye’deki yasal yapı içerisinde biyokütleden enerji üretiminin yeri ve uygulanabilirliği için gereken süreçler ile lisans alımı incelenmiştir.

Biyokütleden enerji üretimine örnek olarak Yalova ilinde biyokütle kullanarak elektrik ve ısı enerjisi üretimi yapabilecek bir tesisin yatırım fizibilitesi değerlendirilmiştir.

Araştırma ve Bulgular

Biyokütle bir insan ömrü veya kabaca yüz senelik bir periyottan daha kısa bir sürede kendini yenileyebilen, hidrokarbon içerikli, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan atıkları, gıda endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm organik maddeler olarak tanımlanmıştır. Güneş ışığı aracılığı ile fotosentez yapan yeşil bitkilerin ürettikleri kimyasal enerjiyi depolaması sonucu meydana gelen biyolojik kütle ve buna bağlı organik madde kaynakları bitkisel biyokütle olarak tanımlanmaktadır. Çevreye olan etkileri minimum düzeyde olan yenilenebilir enerji kaynakları arasında, özellikle gelişmekte olan ülkeler için uygulama alanı en geniş ve de özellikle yerel kaynak olduğu için enerji arzı konusunda dışa bağımlılıktan kurtaracak kaynakların başında Biyokütle gelir. Biyokütle yalnız yenilenebilir olması ile değil, her yerde yetiştirilebilmesi, sosyo-ekonomik gelişme sağlaması, çevrenin korumasına katkısı, ısı ve elektrik enerjisi üretimi, kimyasal madde ve içten yanmalı motorlu taşıtlar için yakıt elde edilebilmesi nedeni ile stratejik bir enerji kaynağı sayılmaktadır. Dünyada fosil enerji kaynaklarının ömürlerinin kısıtlı olması ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri düşünüldüğünde, özellikle enerji üretiminde Biyokütle kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmektedir.

Biyokütle İçerikleri

Biyokütle kaynağı olarak kullanılan ürün ve atıklar genel olarak; tarımsal ,ormansal, hayvansal, endüstriyel ve kentsel atık olarak sınıflandırılmaktadır. (IEA,FAO, 2021).

Tarımsal Atıklar

Çeşitli tarımsal ürünlerin (mısır, buğday, pamuk, şeker kamışı, vb.) gıda için kullanılan kısımlarının hasadından sonra kalan artık ve atıkları kapsamaktadır. Tarımsal atıklar bitki yaprakları, kabukları, kökleri ve gövdelerini de içermektedir. Mısır, hasat edildiğinde enerjiye dönüştürülebilir biyokütle, koçan şeklinde tarlada kalmaktadır. Benzer şekilde buğday, pamuk, soya, bezelye, şeker kamışı, zeytin, ceviz gibi tarımsal ürünlerin hasatları sonucunda da biyokütle kaynağı olarak kullanılacak kabuk, çekirdek ve lifler ortaya çıkarmaktadır.

Mevcut tarımsal uygulamalarda genellikle bu kalıntılar toprağa geri sürülmekte, yakılmakta veya çürümeye bırakılmaktadır. Bu kalıntılar, çeşitli çevrim yöntemleri ile elektrik ve ısı üretmek için de kullanılabilir. Ek olarak, biyoyakıtı dönüştürülmek üzere nişasta, şeker veya yağ kullanılması için yetiştirilen tarımsal ürünler de mevcuttur. Dünya çapında her yıl önemli miktarlarda mahsul kalıntısı üretilmektedir. Tarımsal kalıntıların biyokütle kaynağı olarak kullanılmasının bir avantajı, gıda mahsulleri ile birlikte yetiştirildikleri için ek arazi kullanımına ihtiyaç duyulmamasıdır (IEA,FAO, 2021).

Ormansal Atıklar

Ormansal atıklar, tarlaların inceltilmesi, küspe ve kereste için kök odununun çıkarılması ve doğal aşındırma gibi işlemlerle oluşmaktadır. Hasat işlemleri genel olarak hacmin yaklaşık %50’sini kaldırmakta ve kalıntılar

biyokütle olarak kullanılabilir durumda bırakılmaktadır. Orman kalıntıları nakliye maliyetleri yüksek, yoğunluk ve yakıt değerleri düşük kalıntılardır. Bu nedenle bu kalıntıların ormanın kendi içinde biyokütle olarak bırakılması daha ekonomiktir (IEA,FAO, 2021).

Hayvansal Atıklar

Balıkçılar, mezbahalar ve çiftliklerden gübre ve arıtma çamuru sağlanmaktadır. Hayvansal atıklar çeşitli yöntemler kullanılarak yakıt, elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için çok çeşitli hayvansal atık bulunmakla birlikte bunlardan en yaygın olanı gübredir. Atıklar genellikle gübre olarak satılmakta veya tarım arazilerinde kullanılmaktaydı. Ancak, koku ve su kirliliği gibi konularda çevresel kontrollerin getirilmesi atık yönetiminin önemini öne çıkarmış ve enerji dönüşümünü gerekli kılmaya başlamıştır (IEA, FAO, 2021).

Endüstriyel Atıklar

Gıda sektörü biyokütle enerji kaynağı olarak kullanılabilir çok sayıda kalıntı ve yan ürün üretmektedir. Katı atıklar; meyve ve sebze artıkları, kalite kontrol standartlarını karşılamayan gıda ürünleri, şeker ve nişasta ekstraksiyonundan elde edilen posa ve lifler, kahve telvesi gibi ürünleri içermektedir. Bu atıklar genel olarak çöp sahalarında toplanmaktadır. Sıvı atıklar; et, meyve ve sebzelerin yıkanması, kümes hayvanlarının ve balıkların pişirilmesi ve temizlenmesi gibi işlemler sonucunda oluşmaktadır. Oluşan atık sular; Şeker ve nişasta gibi organik maddeler içermekte ve enerji üretimi için kullanılabilir. Kağıt endüstrisi ise yüksek derecede enerji ve su tüketmekte olup üretim sonrasında heterojen yapıda atık su bırakmaktadır. Bırakılan atık su, sıvı biyokütle kaynağı olarak kullanılabilir (IEA, FAO, 2021).

Kentsel Atıklar

Çöpe atılan veya geri dönüşüme gönderilen atıkları kapsamaktadır. Özellikle kağıt, karton ve atılmış gıda ürünleri gibi kentsel katı atıklar, biyokütle hammaddesi için önemli kaynaklardır. Bununla birlikte, bazı kentsel atıkların (özellikle metal ve plastik atıklar) biyokütle kaynağı olarak kullanımı uygun değildir. Her yıl milyonlarca ton evsel atık toplanmakta ve çoğunlukla açık sahalarda bertaraf edilmektedir. Kentsel katı atıklar, çeşitli çevrim yöntemleriyle enerjiye dönüştürülmekte depolama sahalarında üretilen gaz ısı ve elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Arıtma çamuru, hayvansal atıklara benzer bir enerji kaynağı olarak biyogaz üretiminde kullanılmaktadır (IEA,FAO, 2021).

Biyokütle Yetiştiriciliği

Enerji üretiminde biyokütle hammaddesi olarak kabul edilen atıkların yanı sıra bitki yetiştiriciliği ile elde edilen mahsuller de biyokütle kaynakları arasında yer almaktadır. Biyokütle için hammadde elde etme amacıyla geliştirilen biyokütle yetiştiriciliğinde enerji ormanları ve enerji tarımı kullanılmaktadır. Enerji bitkileri, özellikle enerji kaynağı olarak yetiştirilen bitkiler olarak tanımlanmaktadır. Biyokütle kaynağı olarak yalnızca enerji üretimi için yetiştirilen tarımsal ürünler yüksek verimlilik ve daha düşük çevre kirliliği sunmaktadır. Enerji bitkileri arasında; kara kavak, şeker kamışı, okaliptüs ağaçları, söğüt, titrek kavaklar, fil otu, dev kamışlar gibi bitkiler yer almaktadır. Bu bitkiler periyodik olarak ekilir ve hasat edilir. Özel enerji bitkileri, enerji açısından zengin önemli bileşenler (yağ, şeker, nişasta ve lif) içermekle birlikte, normal biyokütle kaynaklarına göre daha fazla potansiyel sunmaktadır. Bunun yanı sıra, enerji bitkilerinin karbon nötr olması, var olan ormanları koruması ve çevre kirliliğini azaltması da sürdürülebilir enerji verimliliği sağlamaktadır (IEA, FAO, 2021).

Ülkemizde Biyokütle

Enerji tüketiminde ithalata olan bağılılığı azaltmakla birlikte enerji arzının çeşitlenmesini de sağlayan biyokütle, kaynak potansiyeli açısından Türkiye'nin en önemli yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Türkiye'nin coğrafik yapısı, topraklarının biyokütle üretimi için uygun olması ve tarımsal faaliyetlerin yaygın olması gibi faktörler ile birlikte özellikle kırsal bölgelerde taleplerin artması, biyokütle

enerjisinin önemini öne çıkarmaktadır. Geleneksel biyokütle kullanımının dışında modern biyokütle enerji yöntemlerinin de gelişmesi için, Türkiye’de enerji bitkileri yetiştiriciliğinin ve kullanılan alternatif atıkların artış göstermesi gerekmektedir. Biyokütle çeşitli çevrim teknolojileri kullanılarak katı, sıvı, ve gazlı yakıtlara dönüştürülmektedir. Türkiye’de yer alan biyokütle tesislerinde hayvansal atık, tarımsal atık, ormansal atık, kentsel ve endüstriyel atık kullanımının yanı sıra enerji bitkilerinin kullanımı ile de enerji üretilmektedir. Hayvan gübreleri ve ormansal atıklar gibi kaynakların doğrudan yakılması Türkiye’deki ısı üretimi içerisinde önemli bir paya sahiptir. Diğer taraftan tarımsal atıkların kullanılması ile yakıt üretilmektedir. Türkiye’de biyoyakıt, genel olarak mısır, şeker pancarı, melas ve buğdayın fermantasyonu ile üretilmekle birlikte, son yıllarda, alglerden biyodizel üretimine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmektedir. Biyodizel hammaddelerinin bulunmaması veya pahalı olması, biyodizel tesislerinin karşılaştığı en büyük sorundur (Çolakoğlu ve ark., 2021). Tablo 1’de ülkemizde biyokütle enerji potansiyeli verilmiştir.

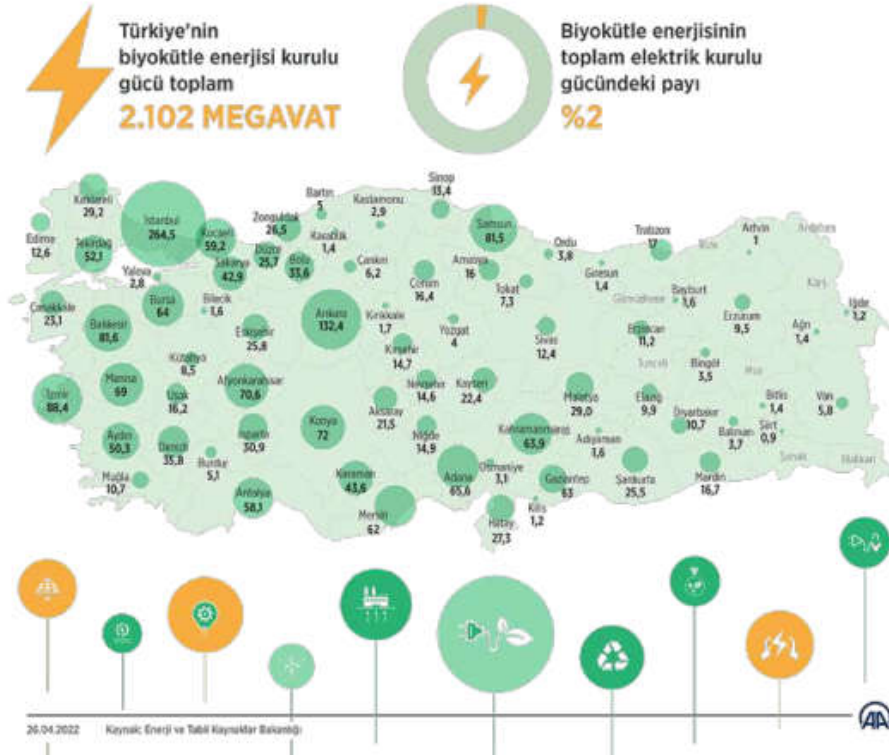
Tablo 1. Ülkemizdeki Biyokütle potansiyeli (Türkiye biyokütle enerjisi potansiyeli atlası, 2022)

Hayvan Sayısı (adet)	422.832.374
Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	193.878.079
Hayvansal Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	4.385.371
Hayvansal Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	1.084.506
Bitkisel Üretim Miktarı (ton/yıl)	171.399.002
Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	62.206.754
Bitkisel Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	25.384.268
Bitkisel Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	1.462.159
Belediye Atıkları Miktarı (ton/yıl)	32.170.975
Belediye Atıkların Teorik Enerji Eşdeğerleri (TEP/yıl)	3.373.011
Belediye Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğerleri (TEP/yıl)	485.858
Orman Varlığı Artıkları (ster/yıl)	3.914.904
Orman Varlığı Artıklarının Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	859.899
Biyodizel İşleme Lisansı Sahibi Firmalar	8
Biyoeanol İşleme Lisansı Sahibi Firmalar	5
Biyokütle Kaynaklı Elektrik Üretim Santral Sayısı	199
Atıkların Toplam Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	34.002.549
Atıkların Toplam Enerji Eşdeğeri (GWh/yıl)	394.430

Biyokütle Kaynaklarından Elektrik Üretimi: 7.501 GWh (01.01.2022- 15.12.2022 Tarihleri arasında üretilen elektrik enerjisinin %2,4’ ü Biyokütle Santrallerinde üretilmiştir.)

Türkiye’ nin Teorik Elektrik Enerji Potansiyeli: 394.430 GWh Teorik Biyokütle potansiyeline göre, mevcut üretimden 52 Kat daha fazla üretimle, güncel enerji üretimimizin tamamının, Biyokütle kaynaklardan üretilebilmesi teorik olarak mümkündür. Şekil 1’de Ülkemizde biyokütleden elektrik üreten şehirler verilmiştir.

Türkiye'nin 73 şehrinde biyokütleden elektrik üretiliyor



Şekil 1. Biyokütleden elektrik üreten şehirler (ETKB, 2022)

Sektördeki En Büyük Oyuncuların Lisanslı Kapasiteleri (MWe, Şubat 2021)

Şirket	Lisanslı Kapasite
ITC Türkiye	143
Biotrend	118
Oltan ve Köleoğlu	99
İSTAÇ	90
Ortadoğu Enerji	88
Bientaş	63
Gülsan Holding	61
İstanbul Enerji	52
Bemka Enerji	45
Panab Enerji	44
Global Yatırım Holding	41
Mutlular Enerji	41
Eren Holding	34
Era Çevre Teknolojileri	28
Arel Enerji	25

Şekil 2. Sektördeki büyük oyuncular (EPDK,2022)

Şekil 2’de görüldüğü gibi 1994 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin bir iştiraki olarak kurulan İSTAÇ, 1995 yılında ilk düzenli depolama alanı ve tıbbi atık toplama ve yakma tesisleri ile birlikte sektörde faaliyet göstermeye başlatan ilk kurum olmuştur. Türkiye’de biyokütle sektöründe faaliyet gösteren en büyük 15 şirket, toplam lisanslı kurulu gücün yarısından fazlasını oluştururken, Şubat 2021 itibariyle lisanslı kurulu güç bakımından en büyük şirketler ITC Türkiye, Biotrend ve Oltan Köleoğlu olarak gerçekleşmiştir. Diğer taraftan, Biotrend en fazla üretim tesisine sahip şirket olmuştur (EPDK,2022).

Biyokütle ve Karbon Emisyonu

Katı atıkların yanı sıra karbon emisyonu ile sera gazlarının atmosfere salınması çevreyi büyük ölçüde tehdit etmektedir. Paris Anlaşması, küresel sıcaklığın ideal olarak 1,5°C ile sınırlandırılması için net bir hedef belirlemektedir. Bu iklim hedefi, küresel enerji üretiminde bir dönüşüme işaret eder; fosil yakıt tüketiminden uzaklaşarak daha temiz yenilenebilir enerjilere geçiş ve sonrasında düşük karbon teknolojisini yaşamın her alanında uygulanabilir kılmaktır. Paris Anlaşması’nın amaçlarını karşılamak için, enerji ile ilgili CO₂ emisyonlarının 2050’ye kadar yılda minimum %3,8 azaltılması gerekmektedir. Ancak son beş yıldaki eğilimler, CO₂ emisyonlarında yıllık %1,3’lük bir büyüme göstermektedir. Bu hız korunursa, gezegenin karbon bütçesi 2030 yılına kadar büyük ölçüde tükenecek ve gezegeni potansiyel olarak felaketle sonuçlanabilecek endüstriyel öncesi seviyelerin 3°C üzerinde bir sıcaklık artışına yönlendirecektir. Bu durum aynı zamanda hükümetlerin Paris Anlaşması’nı imzalarken verdikleri taahhütleri yerine getirmedikleri anlamına da gelecektir. Biyokütle kullanımı uygun şekilde yönetilir ve düzenlenirse atmosferik CO₂ seviyelerini düşürebilir. Biyokütle enerji amaçlı kullanıldığında, yaşam döngüsü içinde CO₂ emisyonlarında olumlu etki oluşturur. Biyokütle yanması halinde atmosferden aldığı kadar karbonu CO₂ halinde saldığı için orman ve bitki varlığının yenilenmesi durumunda kuramsal olarak sera etkisini artırmayan bir yakıttır. Biyoenerji, karbon yakalama ve depolama ile kullanıldığında, karbon atmosfere geri döndürülmez ve net bir CO₂ azalmasına yol açar. Benzer şekilde, biyokütle biyo bazlı malzemelerde kullanıldığında ürünlerin kullanım ömrü boyunca malzemelerde depolanan biyojenik karbonu artırır ve bazı durumlarda ortam için CO₂ tutmanın olumlu etkisi olabilir. Döngüsel karbon ekonomisinde biyoenerji, sisteminin sadece bir parçasıdır. Biyoenerji, tedarik zinciri boyunca üretilen kalıntılar ve atıkların yakılması, israf veya imha edilmesi yerine gelir akışları oluşturarak tüm biyokütle sistemini güçlendirir. Metan emisyonları gibi çevresel sorunların da önlenmesine yardımcı olur (Çolakoğlu ve ark., 2021).

Sonuç

Enerji, her hangi bir mal ya da hizmet üretiminde kullanılması zorunlu bir girdi olarak ülkelerin refahının artırılmasında son derece önemli bir unsurdur.

Bu durum .ayrıca ülkelerin kalkınma düzeylerini gösteren temel unsurlardan biri olarak kabul edilmektedir. Eğitim, sağlık, ulaşım, altyapı hizmetlerinin sunumunda sınai ve işlenmiş tarımsal ürünlerin üretiminde, ekonomi de verimliliğin artırılmasında, beslenme, ısınma ve barınma gibi ihtiyaçların giderilmesinde sağladığı imkanlar göz önünde bulundurulduğunda enerjinin önemi daha da ön plana çıkmaktadır.

Günlük yaşamda her aşamada kullanım alanı bulan enerji; kimyasal, nükleer, mekanik (potansiyel ve kinetik), termal (ısı), jeotermal, hidrolik, güneş, rüzgar, elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde bulunabilmekte ve uygun yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir.

Kullanışlarına göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ikiye ayrılmaktadır. Yenilenemez enerji kaynakları, kısa bir gelecekte tükenebileceği öngörülen enerji kaynakları olup fosil kaynaklılar ve çekirdek kaynaklılar olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise; oldukça uzun sayılabilecek bir gelecekte tükenmeden kalabilecek, kendisini yenileyebilen kaynakları ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları yerli nitelikli oluşu, yakıt maliyetinin düşük olması, temiz ve çevreci özellikleri ile öne çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenebilir oluşları, en az düzeyde çevresel etki yaratmaları, işletme ve bakım masraflarının az olması ve ulusal nitelikleri ile güvenilir enerji sağlama özellikleri ile dünya ve ülkemiz için de önemli bir yere sahiptir.

Enerji üretimi için biyokütle kullanımının hızla artması, biyokütle zincirlerinin potansiyel olumsuz çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerinin dikkat çekmesine neden olmuştur. Geçtiğimiz yıllarda, biyoçeşitlilik kayıpları, arazi kullanım hakkı çatışmaları gibi konular dahil olmak üzere, biyokütle zincirlerinin potansiyel olumsuz

etkileri söz konusu olsa da, biyokütle kullanımının olumlu etkileri de dikkat çekmiş ve biyoenerji politikalarının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Örneğin, biyoenerji üretimi ve kullanımının, kırsal bölgelerin kalkınması, farklı gelir kaynaklarının yaratılması, fosil yakıt kullanımının azalmasıyla ithalata bağımlılığının azaltılması ve iklim değişikliğinin önüne geçilmesi gibi çeşitli olumlu etkileri bulunmaktadır. Biyoenerji, hammadde kaynakları, çevrim yöntemleri ve enerji çıktıları gibi çok çeşitli konuları kapsamaktadır ve dolayısıyla çevresel, sosyal ve ekonomik faydaları birçok farklı faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, biyokütle kullanımında biyokütle zincirinin her bir parçasının sürdürülebilirliğinin dikkate alınması gerekmektedir. Uygun olmayan politika ve uygulamaların benimsenmesi durumunda, biyokütle kullanımının neden olabileceği olumsuzluklar da bulunmaktadır (GBEP., 2022).

Yalova ili için düşünülen biyokütle tesisinde Biyokütle Enerji Tesisi Net Bugünkü Değeri % 7,13 enflasyon varsayımı ile hesaplanmıştır. Projenin ekonomik ömrü 25 yıldır. Biyokütle Enerji Tesisi yatırımının finansal açıdan uygun nitelikte bir yatırım olarak kabul edilebilmesi için Net Bugünkü Değeri sıfırdan büyük olması gerekmektedir. Biyokütle Enerji Tesisi finansal Net Bugünkü Değeri 16.380.000 ABD Doları olarak hesaplanmıştır. Finansal analiz sonucuna göre Biyokütle Enerji Tesisi finansal açıdan bugünkü regülasyonlarla kar marjı düşük bir yatırımdır. Şekil 4 te teki verilere göre bu çalışma, yalnızca ekonomik getirilerden ziyade çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği gibi stratejik faydaları göz önünde bulundurarak, uzun vadeli bir enerji çözümü sunmaktadır

Ekonomik Model Finansal Varsayımlar		
Finansal Varsayımlar	Birim	Değer
Kur	ABD Doları/TL	35
Kredi Kullanılacak Toplam Tutar	ABD Doları	60.000.000
Kredi Vadresi	yıl	8
Faiz Oranı(%)	%	9,50%
Ödemesiz Dönem	ay	42
İnşaat Dönemi	ay	36
Kurumlar Vergisi	%	25
Amortisman Süresi	yıl	17

Şekil 3. Ekonik model varsayımları

Fizibilite Sonuçları	
İç Verim Oranı (IRR)	10%
Geri Ödeme Süresi	17 yıl
Net Bugünkü Değer(25 yıl)	16.380.000 ABD Doları

Şekil 4. Fizibilite sonuçları

Kaynakça

(Wang ve ark., 2020). Wang, C., Wood, J., Wang, Y., Geng, X., & Long, X. (2020). CO₂ emission in transportation sector across 51 countries along the Belt and Road from 2000 to 2014. *Journal of Cleaner Production*, 266, 122000

(Roberts ve ark., 2019). Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., ... & Waterfield, T. (2019). Global Warming of 1.5 C. IPCC Special Report 2018. Intergovernmental Panel on Climate Change. Jenkins, C. N. & Joppa, L. (2009). Expansion of the global terrestrial protected area system. *Biological Conservation*, 142: 2166–2174. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.04.016.

(Stöcker, 2008). Stöcker, M. (2008). Biofuels And Biomass-To-Liquid Fuels In The Biorefinery: Catalytic Conversion Of Lignocellulosic Biomass Using Porous Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(48), 9200-9211. The Economist. (2004). The Rise of the Green Building, Accessed on 10 Dec 2017, available online at: http://economist.com/PrinterFriendly.cfm?Story_ID=3422965

(Çolakoğlu ve ark., 2021). M.Çolakoğlu.,S.Aslan.,E.Kumdereli.Biyokütle ve biyokütle sektörlerine genel bakış. *PWC*

(IEA,FAO, 2021).International Energy Agency.,Food and Agriculture Organization of the United National: <http://fao.org.>; <http://iea.org.>;

URL: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-biyokutle-2022>, erişim tarihi: 12.11.2024

URL: <https://bepa.enerji.gov.tr/>, erişim tarihi: 12.10.2024

URL: <https://www.epdk.gov.tr/>, erişim tarihi: 02.11.2024



ENERGY PRODUCTION POTENTIAL FROM AGRICULTURAL RESIDUES IN KAYSERİ PROVINCE

Cengiz KARACA

Prof. Dr., Hatay Mustafa Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Hatay-Türkiye, ORCID: 0000-0001-5161-1512

Abstract

The aim of this study is to determine the amount of agricultural residues in Kayseri province and the amount of energy that can be produced from these residues. Kayseri province is a province in the Central Anatolia Region of Turkey with a total of 16 districts, of which five are central districts. The amount of residues obtained from some agricultural products commonly grown in Kayseri province was calculated using production data and tree presence data for the year 2023. The annual potential of agricultural residues was calculated using the residue rate and the amount of crops or number of trees. The energy potential of residues for each district was calculated by multiplying the calorific value of agricultural residues by the amount of usable residues. The total amount of agricultural residues based on the products commonly cultivated in the province was determined as approximately 297.52 kt per year. The total calorific value of these agricultural residues was calculated as 5,074.24 TJ. When the districts are ranked according to the amount of agricultural residues, the first three districts are Kocasinan (47.99 kt), Pınarbaşı (47.58 kt) and Yeşilhisar (43.61 kt). According to the total heating values, the main crop residues were wheat straw (32.4%), barley straw (22.9%), sunflower stalks (16.9%) and vineyard pruning waste (7.2%).

Keywords: Biomass Energy, Agricultural Residues, Kayseri

KAYSERİ İLİNDE TARIMSAL ARTIKLARDAN ENERJİ ÜRETİM POTANSİYELİ

Özet

Bu çalışmanın amacı Kayseri ilinde tarımsal artıkların miktarını ve bu atıklardan üretililecek enerji miktarının belirlemektir. Kayseri ili, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde beş adet merkez ilçe olmak üzere toplam 16 ilçesi bulunan bir ilidir. Kayseri ilinde yoğun olarak yetiştirilen bazı tarım ürünlerinden elde edilen artık miktarları, 2023 yıllarına ait üretim verileri ve ağaç varlığı verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Tarımsal artıkların yıllık potansiyeli, artık ürün oranı ve ürün miktarı veya ağaç sayıları kullanılarak hesaplanmıştır. Her ilçe için artıkların enerji potansiyeli, tarımsal artıkların ısı değerlerinin kullanılabilir artık miktarı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır. İlde yoğun olarak yetiştiriciliği yapılan ürünlerin baz alındığı toplam tarımsal artık miktarı yıllık yaklaşık 297.52 kt olarak belirlenmiştir. Bu tarımsal artıkların toplam ısı değeri 5,074.24 TJ olarak hesaplanmıştır. İlçeler tarımsal artık miktarına göre sıralandığında, ilk üç ilçe Kocasinan (47.99 kt), Pınarbaşı (47.58 kt) ve Yeşilhisar (43.61 kt) olarak belirlenmiştir. Toplam ısı değerlere göre başlıca ürün artıkları buğday samanı (% 32.4), arpa samanı (% 22.9), ayçiçeği sapı (% 16.9) ve bağ budama atıkları (% 7.2) şeklinde sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle Enerjisi, Tarımsal Artıklar, Kayseri

INTRODUCTION

Energy is central to economic development, and there is a clear correlation between energy consumption and living standards. Energy sources are split into three categories: fossil fuels, renewable sources and nuclear sources (Karaca, 2015). Fossil fuels are limited resources, collected in few regional areas of the world.

Turkey is an agricultural country, with special emphasis on the Central Anatolia, Çukurova and Southern Anatolia regions, and has significant forestry potential. Agricultural waste is a major source of biomass due to its high potential (Karaca and Başçetinçelik, 2014). Biomass energy includes agricultural residues, domestic

waste, fuelwood, animal waste and other fuel derived from biological sources (Başçetinçelik et. al. 2006). Agricultural residues are defined as a biomass by-product from the agricultural system and include straws, husks, shells, and stalks. These residues can be divided into two groups: crop residues, which remain in the field after harvest including cotton stalk, and agricultural residues, which are the by-products of the industrial processing of crops such as rice husk (Karaca, 2015).

This study aimed to determine the biomass potential and the energy value, being produced from agricultural residues in Kayseri province. The major benefits are environmental and relate to the reduction of GHG emissions, conservation of natural resources, and avoidance of fossil fuel consumption. They are complemented by economic benefits (reduction of imported fuel consumption), regional development and investment increase.

MATERIALS AND METHODS

Kayseri is a province of Turkey on the Central Anatolia Region. Kayseri province is divided into 16 districts, five of which are included in the municipality of central district. The districts of Kayseri province are Hacılar, İncesu, Kocasinan, Melikgazi, Talas, Akkışla, Bünyan, Develi, Felahiye, Özvatan, Pınarbaşı, Sarıoğlan, Sarız, Tomarza, Yahyalı and Yeşilhisar.

Grains crops have the most important place regarding production area and amount of product in the production of agricultural products of Kayseri. The province has 602,495 hectares of agricultural land. Field crops constitute 75% of the agricultural land, while fallow areas constitute 15.8 % and the remaining part consists of vegetable and orchards. Wheat, barley, sunflower, rye, chickpea, apple, apricot and vineyard are the prominent products in the province. (TURKSTAT, 2024a)

The amounts of residues from the crops cultivated in Kayseri province were calculated using production data of crops with Turkish Statistical Institute for the 2023 seasonal years (TURKSTAT, 2024b). The annual gross potential of agricultural residues was determined by using residue to product ratio (RPR) (Table 1).

The net potential of residues was determined by using the availability of residues. The availability of residues is unused and completely wastes part of residues (Table 1). The available potential of the agricultural residues in each district of Kayseri was calculated using the Eq.1. (Karaca, 2015)

$$(AAR)_I = (AAP)_I \times (RPR)_I \times (A)_I \quad (1)$$

where $(AAR)_I$ is the available amount of agricultural residues of Ith crop in ton, $(AAP)_I$ the amount of agricultural product in tons or number of tree for pruning wastes, $(RPR)_I$ residue-to product ratio of the Ith crop and $(A)_I$ the availability of residues.

The residues are materials left over the field after agricultural production. Some agricultural residues have already been used for domestic purposes, heating, animal fodder, bedding. Mainly residues from the production of industrial, agricultural products are left over the field. The species are maize stalk, sunflower stalk, cereal straw, pruning, etc.

The energy potential of residues for each district was calculated by multiplication of the heating values of a selection of agricultural residues which was taken heating value per each residue (Table 1) with the available residue amount (Eq. 2). (Karaca, 2015)

$$(THV)_i = (AAR)_i \times (LHV)_i \quad (2)$$

where $(THV)_i$ the total heating value of agricultural residues of ith crop in GJ, $(AAR)_i$ is the available amount of agricultural residues of ith crop in tons and $(LHV)_i$ lower heating value of air-dry residues of ith crop in MJ kg⁻¹.

The energy content of the selected products for each district was calculated using the above equations. For each district, the calculated values that the total amount and the total energy potential of agricultural crop residues were mapped using the GIS software. The produced maps were provided to see more clearly in the differences of data among the districts. The mapping can provide the rise of public awareness and policy-makers reference about these subjects.

Table 1. The ratio of product to residue, availability and heating values of a selection of agricultural crop residues (Başçetinçelik et. al., 2006; Bilandzija et. al., 2012; Karaca, 2015)

Field Crops	Residues	Ratio of Product to Residue (<i>RPR</i>)	Availability (<i>A</i>) (%)	Heating Value (<i>LHV</i>) (MJ kg ⁻¹)
Wheat	Straw	1.06	15	17.9
Barley	Straw	1.14	15	17.5
Rye	Straw	1.20	15	17.5
Oats	Straw	1.18	15	17.4
Triticale	Straw	1.20	15	17.2
Chickpea	Straw	1.10	60	18.1
Maize	Stalk	1.30	60	18.5
	Cob	0.30	60	18.4
Sunflower	Stalk	2.00	60	14.2
Fruits Crops				
Apple	Pruning	2.50*	80	17.0
Pear	Pruning	2.50*	80	16.7
Apricots	Pruning	5.80*	80	19.3
Sweet cherry	Pruning	5.90*	80	16.7
Sour cherry	Pruning	5.00*	80	18.0
Plum	Pruning	7.00*	80	17.3
Walnuts	Pruning	3.50*	50	19.0
Almonds	Pruning	5.80*	80	18.4
Peach	Pruning	7.00*	80	19.4
Vineyard	Pruning	4,250**	80	18.0

* RPR kg/tree

** RPR kg/ha

FINDINGS AND DISCUSSION

The total amount of agricultural residues, including field crop residues (grains, sunflower, chickpea) and orchard residues (tree pruning) were calculated to be about 297.52 thousand tons in Kayseri (Table 2). Its distribution by the source is field crops (88.21%) and fruit crops (11.79%). Major crops that included in the ratio of the total residue amount are wheat (30.8%), barley (22.3%), sunflower (20.3%), vineyard pruning (6.8), maize (5.2%) and chickpea (5.0%).

Table 2. The amount of agricultural product and available residues of Kayseri

Field Crops	Amount of Agricultural Product (AAP) (tons)	Residues	Available Residues (AAR) (tons)
Wheat	577,070	Straw	91,754
Barley	388,561	Straw	66,444
Rye	45,755	Straw	8,236
Oats	17,521	Straw	3,101
Triticale	13,047	Straw	2,348
Chickpea	22,392	Straw	14,779
Maize	15,965	Stalk	12,453
		Cob	2,874
Sunflower	50,370	Stalk	60,444
Fruits Crops	Number of trees / Planting area		
Apple	5,901,446*	Pruning	11,803
Pear	67,267*	Pruning	135
Apricots	343,272*	Pruning	1,593
Sweet cherry	75,575*	Pruning	357
Sour cherry	18,200*	Pruning	73
Plum	35,388*	Pruning	198
Walnuts	80,976*	Pruning	142
Almonds	92,186*	Pruning	428
Peach	20,639*	Pruning	116
Vineyard	5,954**	Pruning	20,244
TOTAL		Residues	297,520

* Number of trees

** Planting Area (ha)

When all districts of Kayseri are aligned according to the amounts of residue, an alignment is as in Table 3. Also, the distribution of these calculated residue amounts on the map and the pie charts showing the shares of the crops that constitute the residue in each district are given in Figure 1.

Table 3. The alignment of districts according to amount of agricultural residues

Districts	Field Crops Residues (tons)	Fruit Crops Residues (tons)	Total Residues (tons)	Share in Total Residues (%)
Hacılar (Merkez)	465	1,159	1,624	0.55
İncesu (Merkez)	7,771	11,463	19,234	6.46
Kocasinan (Merkez)	46,303	1,682	47,985	16.13
Melikgazi (Merkez)	7,779	1,176	8,955	3.01
Talas (Merkez)	4,812	2,374	7,186	2.42
Akkışla	2,352	62	2,414	0.81
Bünyan	25,569	345	25,914	8.71
Develi	17,208	1,203	18,412	6.19
Felahiye	8,954	1,211	10,165	3.42
Özvatan	3,238	716	3,954	1.33
Pınarbaşı	47,469	113	47,582	15.99
Sarıoğlan	15,857	195	16,051	5.40
Sarız	3,096	23	3,119	1.05
Tomarza	25,288	13	25,301	8.50
Yahyalı	9,570	6,443	16,013	5.38
Yeşilhisar	36,703	6,908	43,611	14.66
TOTAL	262,433	35,087	297,520	100.00

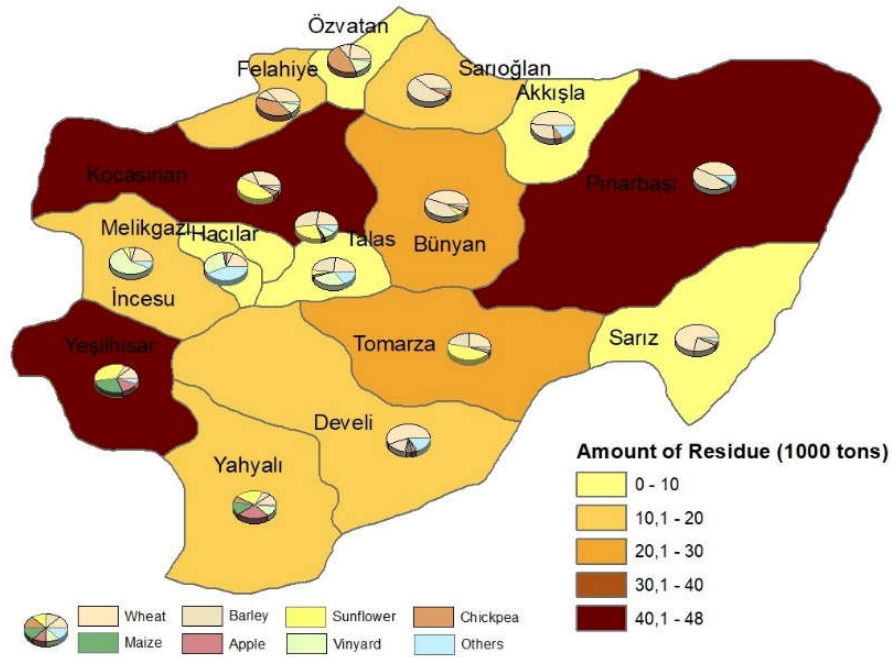


Figure 1. The distribution map of agricultural residues in Kayseri

According to the results, Kocasinan (47.99 kt) is the district with the highest agricultural residue potential in Kayseri province. Apart from this, it has been determined that there is a significant amount of agricultural residue potential in Pınarbaşı (47.58 kt) and Yeşilhisar (43.61 kt) districts. In these three districts, it is seen that there will not be a shortage of raw materials for investments and facilities to be constructed for obtaining energy from agricultural residues.

The potential of biomass from agricultural residues was determined in Samsun province. The total biomass potential was determined as 366.6 kt in the province. (Karaca et. al., 2017).

A study carried out by Karaca and Öztürk (2017) in Osmaniye province indicated that the total biomass potential from agricultural residues was 491 kt.

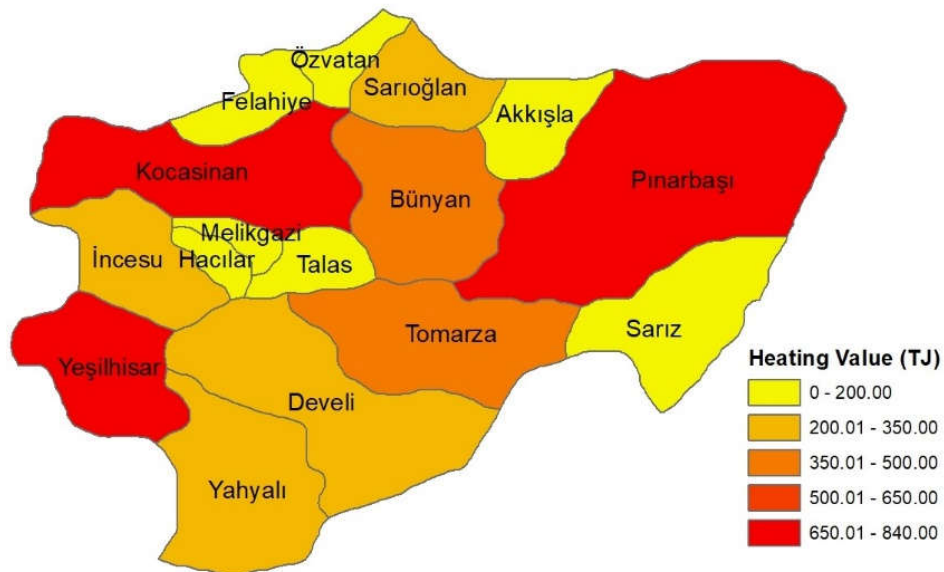
Karaca (2022) reported the amount of biomass from agricultural residues was about 124.54 kt, equivalent to about 2,182 TJ of heating value in Sivas.

Similarly, in another study conducted by Karaca (2023), the total agricultural residue potential of Gaziantep province was determined as 373.42 kt.

It was calculated that the total heating value of the agricultural residues was about 5,074.24 TJ (121.2 ktce) for agro-production period of 2023 in Kayseri. The heating value of agricultural residues that calculated separately for each product is given in Table 4. The distribution map was given Figure 2.

Table 4. Total heating value of agricultural residues of Kayseri

Field Crops	Residues	Total Heating Value (THV) (GJ)
Wheat	Straw	1,642,399
Barley	Straw	1,162,769
Rye	Straw	144,128
Oats	Straw	53,961
Triticale	Straw	40,394
Chickpea	Straw	267,495
Maize	Stalk	230,375
	Cob	52,876
Sunflower	Stalk	858,305
Fruits Crops		
Apple	Pruning	200,649
Pear	Pruning	2,247
Apricots	Pruning	30,741
Sweet cherry	Pruning	5,957
Sour cherry	Pruning	1,310
Plum	Pruning	3,428
Walnuts	Pruning	2,692
Almonds	Pruning	7,870
Peach	Pruning	2,242
Vineyard	Pruning	364,397
TOTAL		5,074,236

**Figure 2.** The distribution map of heating value based on agricultural residues in Kayseri

These maps (Figure 1 and 2) showed that the potential of agricultural residues concentrated in Kocasinan, Pınarbaşı and Yeşilhisar districts. Especially, it is observed that the type and distribution of residues in Kocasinan district, the distribution of agricultural residues according to heating value is ranked as sunflower (320 TJ) and wheat (263.52 TJ) respectively. In Pınarbaşı district, this ranking consists of barley (380.91 TJ) and wheat (363.60 TJ) respectively. However different crop residues are remarkable in a certain district. Heating values of vineyard residues are 201.35 TJ in İncesu, and 30.6 TJ in Yahyalı. Furthermore, sunflower stalks constitute an important potential (217.77 TJ) in Yeşilhisar and (167.5 TJ) Tomarza. Moreover, chickpea residues also create a significant energy potential in Felahiye district (77.34 TJ) and Özvatan district (32.89 TJ). Finally, it was observed that maize residues (203.86 TJ) constitute a remarkable energy potential in Yeşilhisar district.

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

The aim of this study is to show the potential of agricultural residues in the districts of Kayseri and its distribution by mapping them. The importance of this study is increasing because Turkey is an energy importing country.

The total amount of agricultural residues was approximately 297.52 kt. It was found that the total heating value of the agricultural residues was around 5,074.24 TJ for the agricultural production period of 2023. It was determined that this potential concentrate in the Kocasinan, Pınarbaşı and Yeşilhisar districts. It was seen that the majority of agricultural residues originate from field crops. According to the amount of residues of agricultural products, it is listed as, wheat straw (30.8%), barley straw (22.3%), sunflower stalk (20.3%), vineyard pruning (6.8), maize (5.2%) and chickpea (5.0%).

Although Kayseri province has a medium level biomass energy potential, this potential is not adequately utilized. However, the results of this study show that such a significant potential should be utilized by establishing modern facilities.

In conclusion, agricultural residues are an attractive choice for Kayseri as an economical, sustainable and environmentally friendly energy source.

REFERENCES

- Başçetinçelik, A., Öztürk, H.H., Karaca, C., Kaçira, M, Ekinçi, K. Kaya, D., Baban,A., Komitti N., Barnes, I., Nieminen, M. (2006). *A Guide on Exploitation of Agricultural Residues in Turkey. AGRO-WASTE - Exploitation of Agricultural Residues in Turkey*. EU Life Program Project, Project No: LIFE03 TCY/TR/000061.
- Bilandzija, N., Voca, N., Kricka, T., Matin, A. and Jurisic, V. (2012). Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10(2), 292-298
- Karaca, C., Başçetinçelik, A. (2014). Economic Analysis of Selected Combine Heat and Power (CHP) Plant Based on Cotton Ginning Residue Combustion in Adana. *Proceeding of 12th International Congress on Mechanization & Energy in Agriculture*, in 3-6 September 2014, Cappadocia-Turkey. p. 308-313,
- Karaca, C. (2015). Mapping of energy potential through annual crop residues in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 8(2): 104-109.
- Karaca, C., Gürdil, G.A.K., Öztürk, H.H. (2017). Determining and Mapping Agricultural Biomass Energy Potential in Samsun Province of Turkey. *Proceedings of 3rd. International Conference on Environmental Science and Technology (ICOEST)*: 190-194, 19-23 October 2017, Budapest
- Karaca, C., Öztürk, H.H. (2017). The Biomass Energy Potential of Osmaniye Province from Agricultural Residues. *Proceedings of International Advanced Researches and Engineering Congress 2017 (IAREC'17)*: 2297-2301, 16-18 November 2017, Osmaniye, Turkey.
- Karaca, C. (2022). Biomass Energy Potential from Agricultural Residues in Sivas Province. *ISPEC 10th International Conference on Agriculture, Animal Sciences and Rural Development*, 18-19 July 2022, Sivas. pp. 402-412.
- Karaca, C. (2023). Determination of Energy Potential of Agricultural Residues in Gaziantep Province. *11. International Summit Scientific Research Congress Full Texts Book*, 15-17 December 2023, Gaziantep, Türkiye, pp. 325-331.
- TURKSTAT (Turkish Statistical Institute). (2024a). Statistical Table of Agricultural Land. Access Address (12.11.2024): <http://tuik.gov.tr/>
- TURKSTAT (Turkish Statistical Institute). (2024b). Crop Production Statistics: All districts of Kayseri province. Access Address (12.11.2024): <http://tuik.gov.tr/>

**THE POTENTIAL OF BIOGAS PRODUCTION FROM LIVESTOCK MANURE AND EFFECTS ON GREENHOUSE GAS REDUCTION IN KAYSERİ PROVINCE****Cengiz KARACA**

Prof. Dr., Hatay Mustafa Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Hatay, TÜRKİYE, ORCID: 0000-0001-5161-1512

Abstract

The objective of this study is to determine the biogas amount and energy value of biogas produced from livestock manure in Kayseri province and its effects on greenhouse gas emissions (GHG). For this purpose, biogas potential was calculated considering the number of cattle, broiler chickens and laying hens in the province. According to 2023 data, there are approximately 433.3 thousand cattle, 220 thousand broiler chickens and 3.62 million laying hens in Kayseri province. These livestock in the province produce a total of 4.41 million tons of manure per year, including 4.31 million tons of cattle manure, 440 tons of broiler manure and 105.61 thousand tons of laying hen manure. From the usable amount of these manures, 76.4 Mm³ of biogas can be produced annually. The calorific value of the biogas produced from these manures is approximately 1,734.4 TJ and the amount of electricity that can be produced from this biogas is calculated as approximately 192.71 GWh_{el}. This value can supply 4.43% of the annual electricity consumption of Kayseri province (4,344 GWh_{el}). The calculated amount of manure and energy values are mapped by district. When the districts are ranked according to the amount of biogas production, the first three districts are Kocasinan (23.4%), Develi (13.1%) and Pınarbaşı (12.5%). Also, greenhouse gas emission reduction values were calculated to indicate the environmental benefits of biogas production from farm manure. It was determined that CO₂ equivalent emission reductions ranging between 902.62 - 1,285.82 thousand tons per year could be achieved by utilizing the calculated biogas potential.

Keywords: Biogas Potential, Livestock Manure, Greenhouse Gas Emission, Kayseri

KAYSERİ İLİNDE ÇİFTLİK GÜBRESİNDEN BİYOGAZ ÜRETİM POTANSİYELİ VE SERA GAZI AZALTIMINA ETKİLERİ**Özet**

Bu çalışmanın amacı Kayseri ilinde çiftlik gübresinden üretilen biyogazın miktarını ve enerji değeri ile bunun sera gazı emisyonlarına (GHG) etkilerini belirlemektir. Bunun için ildeki sığır, et tavuğu ve yumurta tavuğu sayıları dikkate alınarak biyogaz potansiyeli hesaplanmıştır. Kayseri ilinde 2023 verilerine göre toplam yaklaşık 433.3 bin sığır, 220 bin et tavuğu ve 3.62 milyon yumurta tavuğu varlığı bulunmaktadır. İldeki bu hayvan varlığından yılda 4.31 milyon ton sığır gübresi, 440 ton et tavuğu gübresi ve 105.61 bin ton yumurta tavuğu gübresi olmak üzere toplam 4.41 milyon ton çiftlik gübresi elde edilmektedir. Bu gübrenin kullanılabilir miktarından yılda 76.4 Mm³ biyogaz üretilir. Bu gübreden üretilen biyogazın ısı değeri yaklaşık 1,734.4 TJ, bu biyogazdan üretilebilecek elektrik miktarı yaklaşık 192.71 GWh_{el} olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Kayseri ilinin yıllık elektrik enerjisi tüketiminin (4,344 GWh_{el}) %4.43'ünü karşılayabilmektedir. Hesaplanan gübre miktarları ve enerji değerlerinin ilçelere göre dağılımı haritalanmıştır. Biyogaz üretim miktarına göre ilçeler sıralandığında ilk üç ilçe Kocasinan (%23.4), Develi (%13.1) ve Pınarbaşı (%12.5) şeklinde sıralanmıştır. Ayrıca çiftlik gübresinden biyogaz üretiminin çevresel faydalarını göstermek için sera gazı emisyon azaltımı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi ile yıllık 902.62-1,285.82 bin ton arasında değişen CO₂ eşdeğeri emisyon azaltımının sağlanabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çiftlik Gübresi, Biyogaz Potansiyeli, Sera Gazı Emisyonu, Kayseri

INTRODUCTION

Energy plays an important role in the world's future. Energy is central to economic development, and there is a clear correlation between energy consumption and living standards. Energy sources are split into three categories: fossil fuels, renewable sources and nuclear sources (Karaca, 2015).

Increase in energy demand and the issues about current non-renewable energy resources led researchers to investigate alternative energy sources during the last two decades. Renewable energy resources draw attention all over the world because they are sustainable, improve the environmental quality and provide new job opportunities in rural areas (Isci and Demirer, 2007).

Biomass is a type of energy source with high carbon content. In fact, biomass is the only energy source that contains carbon within the renewable energy systems. Biomass can be either obtained directly from plants or indirectly from industrial, domestic, agricultural and animal wastes. To contribute to the energy demand of the country by using the national sources and to overcome the environmental problems, renewable energy sources should be considered as important inputs. Because biomass offers considerable flexibility in fuel supply in Turkey, due to the range and diversity of the fuels that can be produced, it should be considered as a renewable energy equivalent to fossil fuels. Biomass can be either used by direct combustion or mixed with an appropriate fossil fuel and be combusted or it can be converted into solid, liquid and gaseous fuels using conversion technologies such as fermentation to produce alcohols, bacterial digestion to produce biogas and gasification to produce a natural gas substitute (Dumanlı *et al.*, 2007)

Biogas is a mixture of methane and carbon dioxide. It also has traces of hydrogen sulphide, ammonia, oxygen, hydrogen, water vapor etc., depending upon feed materials and other conditions. Biogas is generated by fermentation of cellulose rich organic matter under anaerobic conditions. In anaerobic conditions, the methane-producing bacteria become more active. Thus, the gas produced becomes rich in methane (NIIR, 2004).

Biogas is about 20 percent lighter than air and has an ignition temperature in the range of 650° to 750° C It is an odorless and colorless gas that burns with clear blue flame similar to that of LPG gas. Its calorific value is between 20-23 MJ/m³ and burns with 60 percent efficiency in a conventional biogas stove (FAO, 1996).

Biogas is supplied to a variety of uses or markets, including electricity, heat and transportation fuels. In many countries, the gas is used for direct combustion in household stoves and gas lamps are increasingly common. However, producing electricity from biogas is still relatively rare in most developing countries. In industrialized countries, power generation is the main purpose of most biogas plants; conversion of biogas to electricity has become a standard technology. Leading countries in producing biogas include Germany, India and China (WEC, 2016).

The objective of this study was to determine the production potential of biogas from animal manure (cattle, broiler chicken and laying hens) and mapping in Kayseri with separate districts. For these purposes, biogas potential and its energy potential of animal manure were evaluated by ArcMap which is a geographical information system (GIS) program. The differences in data among the districts for seeing more clearly were created maps in GIS. A database was created within the GIS for Kayseri and its districts. The number of animals, calculated biogas potential, and its heating value in the province for the year 2023 were inputs to this database.

MATERIALS AND METHODS

Kayseri is a province of Turkey on the Central Anatolia Region. Kayseri province is divided into 16 districts, five of which are included in the municipality of central district. The districts of Kayseri province are Hacılar, İncesu, Kocasinan, Melikgazi, Talas, Akkışla, Bünyan, Develi, Felahiye, Özvatan, Pınarbaşı, Sarioğlan, Sarız, Tomarza, Yahyalı and Yeşilhisar.

In the scope of this study, Turkish Statistical Institute's data on the number of livestock in 2023 were used. (TURKSTAT, 2024). The data used in the calculation of the biogas production potential were considered only cattle, broiler chicken and laying hen population. Because the attainability of animal manures, as determined by staying time in the barn, provides the highest value in a cattle farm (65%), broiler and laying hens farm (99%) (Başçetinçelik *et al.*, 2006). Since the collectability and availability of manure from other livestock is very low, it was not used in the calculations.

Animal manure and biogas production calculation methods

The following methods were used to calculate the amount of animal manure and biogas production (Başçetinçelik *et al.*, 2006; Karaca and Gürdil, 2019; Karaca, 2023).

$$AFM = NA \times MPPA/1000 \quad (1)$$

where;

AFM: amount of fresh manure per day (t/day)

NA: number of animals

MPPA: daily manure production per animal (kg/day)

The *MPPA* is 27.24 for cattle, 0.0476 for broiler and 0.08 for laying hens.

$$ASM = AFM \times SMR \quad (2)$$

where;

ASM: amount of daily solid manure (t/day)

SMR: solid manure ratio (%)

$$TSUM = ASM \times AOM \times AGP \quad (3)$$

where;

TUSM: annual total usable solid manure (t/year)

AOM: attainability of manure (%)

AGP: yearly growing period (day)

The *AGP* is 365 for dairy cattle and laying hens, 42 for broiler. Because, assuming that six cycles were produced in a year and that broilers are reared for up to six weeks of age, the yearly amount of broiler litter is calculated as 42 days.

$$AB = TSUM \times BCR_{SM} \quad (4)$$

where;

AB: amount of biogas (m³/year)

BCR_{SM}: biogas conversion ratio of solid manure (200 m³/t)

$$THV = AB \times HV \quad (5)$$

where:

THV: total heating value (MJ)

HV: heating value of unit biogas (22.7 MJ/m³)

Electricity generation from biogas with a gas engine was calculated by the following equation:

$$EP = (THV \times EPE_{Net})/3.6 \quad (6)$$

where;

EP: electricity production (kWh_{el}/year)

EPE_{Net}: net electricity production efficiency of a biogas engine (40%) (Clarke Energy, 2021)

For each district, the calculated values, the total amount, the total biogas production, and the total energy potential of animal manures, were mapped using ArcMAP Software.

Calculation methods of GHG emission abatement from biogas system

GHG emission reduction effect of biogas production is based on two factors, ERMM (emission reduction by manure management) and ERES (emission reduction by energy substitution).

ERMM (emission reduction by manure management)

Under anaerobic conditions (in the absence of oxygen) the extrication of animal manure produces methane (CH₄) throughout storage. The most significant benefit of a biogas system is preventing the uncontrolled methane emissions. The following methods were used to calculate the CH₄ production from uncovered lagoon manure storage systems (IPCC, 2006; Guo Guo, 2010). This calculation was done according to annual average temperature.

$$CH_{4Manure} = EF_{(T)} \times N_{(T)} \quad (7)$$

where;

$CH_{4Manure}$: methane emissions from manure management (kg CH₄/year)

$EF_{(T)}$: emission factor for livestock category T, (kg CH₄/animal year)

$N_{(T)}$: the number of animal of livestock species/category T

T : species/category

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} \times 365) \times (B_{O(T)} \times 0.67) \times \left(\frac{MCF_{S,k}}{100} \right) \quad (8)$$

where;

$VS_{(T)}$: volatile solid for livestock category per day T, (kg dry matter/animal day)

$B_{O(T)}$: maximum methane production capacity (m³/kg)

0.67 : conversion multiplier from m³ CH₄ to kg CH₄

$MCF_{S,k}$: methane conversion parameters for manure management system S, by climate region k, (%)

$$ERMM_{CO_2} = CH_{4Manure} \times 27.2 \quad (9)$$

where;

$ERMM_{CO_2}$: CO₂ emission reduction from manure management (kg CO₂ year⁻¹)

27.2 : Coefficient of the CO₂ equivalent of CH₄ (ERC Evolution, 2023).

ERES (emission reduction by energy substitution)

In rural regions biogas can use instead of solid fossil fuels and other biomass resources, because of high heat value (22.7 MJ/m³). Therefore, the effect of CO₂ emission reduction of biogas system depends on the amount of fossil fuel replacement. The ERES is computed as GHG emissions produced by biogas-substituted fuel consumption. In this part, CO₂ emission reduction was calculated separately for each fossil fuel, which substituted instead of the estimated biogas potential. The following equations were used for this (Guo Guo, 2010)

$$ERES_{CO_2, fuel} = FS \times CE_{fuel} \times EF_{CO_2, fuel} \quad (10)$$

where;

$ERES_{CO_2, fuel}$: CO₂ emission reduction for substituted fuel, (kg/year)

FS : Fuel substitution value of biogas energy equivalent, (GJ/year)

CE_{fuel} : Combustion efficiency of fuels

$EF_{CO_2, fuel}$: CO₂ emission factors (kg/GJ)

$$FS = THV \times 0.6 \quad (11)$$

where;

THV : Total heating value of biogas potential (GJ/year)

0.6 : Combustion efficiency of biogas

FINDINGS AND DISCUSSION

Potential of animal manure, biogas production and energy value

Total animal manure potential of Kayseri in 2023 as a solid matter depending on the number of cattle, broiler and laying hens is presented in Table 1.

Table 1. Number of animals, and total amount of animal manure as fresh and solid matter

Animal	NA	AFM (t/year)	SMR (%)	ASM (t/year)	AOM (%)	TUSM (t/year)
Cattle	433,283	4,307,960	12.7	547,111	65	355,622
Broiler	220,000	440	12.7	264	65	261
Laying hens	3,616,779	105,610	25.0	26,402	99	26,138
TOTAL		4,414,009		573,777		382,022

According to Table 1, the total amount of usable solid manure, obtained from cattle, broiler and laying hens, is 382.02 thousand tons in 2023. Its distributions by the sources are cattle (93.09%), broiler (0.07%) and laying hens (6.84%).

The amount of biogas which can be obtained from the total animal manure as a solid matter along with the electricity generation from this biogas is presented in Table 2.

Table 2. The biogas potential and the energy potential of biogas in Kayseri

Animal	TUSM (t/year)	AB (m ³ /year)	THV (GJ/ year)	EP (MWh _{el} / year)
Cattle	355,622	71,124,412	1,614,524	179,392
Broiler	261	52,251	1,186	132
Laying hens	26,138	5,227,692	118,669	13,185
TOTAL	382,022	76,404,356	1,734,379	192,709

Table 2 shows that the total biogas potential of Kayseri is estimated at 76.40 million m³/year. Furthermore, the heating value was calculated as 1,734.38 TJ/year. It has been determined that 192.71 GWh_{el} of electrical energy can be obtained annually by converting the whole biogas potential obtained from animal manure into electrical energy by means of a gas engine. These values can provide 4.43 % of Kayseri's annual electricity consumption (4,344 GWh_{el}).

Several studies carried out by Karaca (2016, 2017, 2018, 2019, 2023) in Afyonkarahisar, Hatay, Balıkesir, Adana, Ankara and Konya provinces, indicated that the total biogas derived from animal manure was 84.8, 14.5, 153.4, 26.3, 40.3 and 105.67 Mm³/year respectively.

The potential of biogas from animal manure was determined in Samsun province. The total biogas potential was determined as 53.6 Mm³/year in the province. (Karaca & Gürdil, 2019).

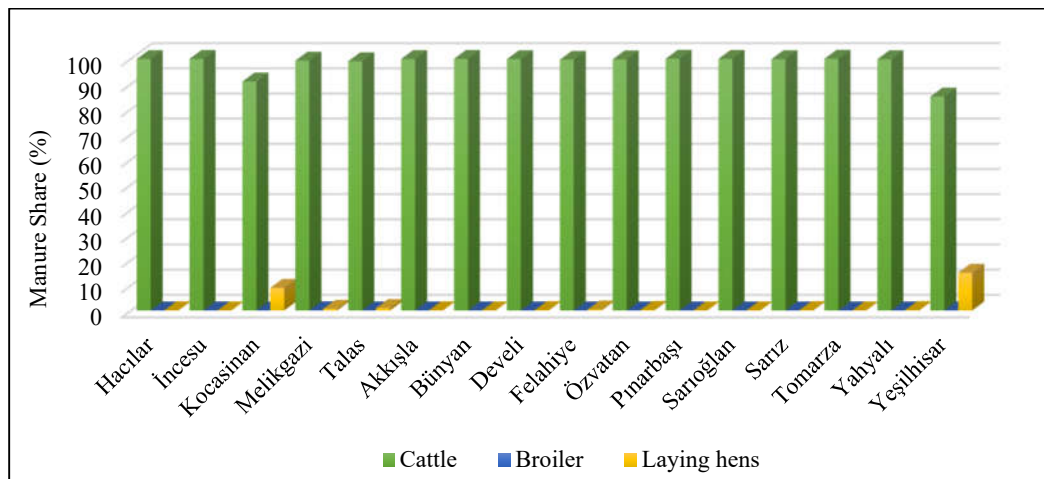
The biogas potential that can be obtained from animal fresh manure and solid manure, the calorific value of this biogas potential and the amount of electrical energy generated from this biogas are presented in Table 3 for the 16 districts of Kayseri for the year 2023.

Table 3. Amount of fresh manure, biogas potential and energy values in the districts of Kayseri

Districts	Fresh Manure (t/year)	Biogas Potential (m ³ /year)	Heating Value (GJ/year)	Electrical Energy (MWh _{el})	Share in total (%)
Hacılar	64,625	1,069,186	24,271	2,697	1.4
İncesu	284,275	4,695,859	106,596	11,844	6.1
Kocasinan	917,197	17,871,685	405,687	45,076	23.4
Melikgazi	476,520	8,013,959	181,917	20,213	10.5
Talas	177,385	2,985,686	67,775	7,531	3.9
Akkışla	90,734	1,500,571	34,063	3,785	2.0
Bünyan	398,622	6,583,318	149,441	16,605	8.6
Develi	605,432	10,023,133	227,525	25,281	13.1
Felahiye	34,507	574,181	13,034	1,448	0.8
Özvatan	16,918	280,465	6,367	707	0.4
Pınarbaşı	578,857	9,557,560	216,957	24,106	12.5
Sarıoğlan	139,576	2,306,079	52,348	5,816	3.0
Sarız	102,823	1,702,421	38,645	4,294	2.2
Tomarza	262,915	4,340,824	98,537	10,949	5.7
Yahyalı	154,809	2,563,845	58,199	6,467	3.4
Yeşilhisar	108,816	2,335,583	53,018	5,891	3.1
TOTAL	4,414,009	76,404,356	1,734,379	192,709	100

Kocasinan districts have the highest potential with 17.87 Mm³. This is followed by Develi, Pınarbaşı and Melikgazi districts with 10.02 Mm³, 9.56 Mm³ and 8.01 Mm³, respectively.

The distribution of animal manure potentials in the provinces of Kayseri is given in Figure 1. In all districts, it is observed that in the majority of cattle manure. In addition, it has been determined that the amount of laying hens manure in Kocasinan and Yeşilhisar districts are higher than the other districts. It was determined that there was no broiler litter in all other provinces except Melikgazi (438.8 tons) district.

**Figure 1.** The distribution of animal manure potentials per district

The amount of biogas and their energy values were calculated separately for each district and were mapped. The distribution map of biogas potential and its energy values for 16 districts of Kayseri are given in Figures 2 and 3.

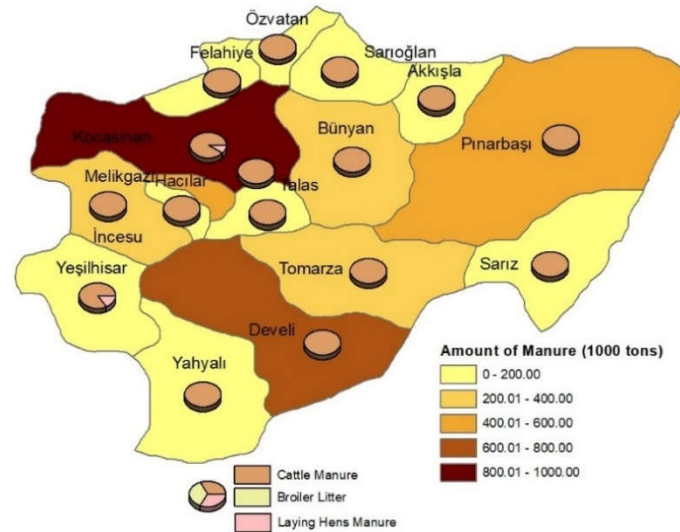


Figure 2. The distribution map of biogas potential in Kayseri

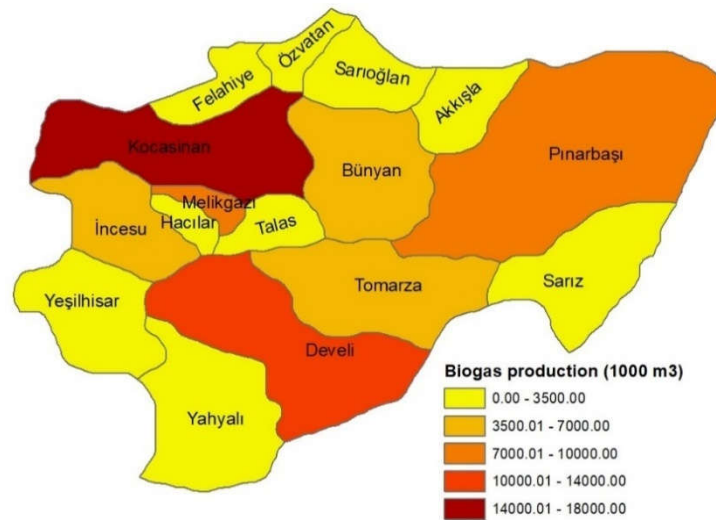


Figure 3. The biogas production potential map of Kayseri

These maps show that the biogas potential is concentrated in Kocasinan and Develi districts. This means that the biogas production plants can be established between these districts. This situation is an advantage in terms of raw material supply for biogas production plants.

GHG Emission Abatement from Biogas System

The result of this computation is called ERMM, which are shown in Table 4. The result of this computation can be observed as GHG emission reduction substituted by biogas, which is offered as $ERES_{CO_2 \text{ fuel}}$ (Table 5). Total CO_2 emission abatement from manure biogas system is given in Table 7.

Table 4. CH₄ emission reduction from manure management in Kayseri

T	N	VS (kg/animal day)	B ₀ (m ³ CH ₄ /kg)	MCF (%)	EF (kgCH ₄ /year)	CH ₄ (kg/year)	CO ₂ -eqv. (kg/year)
Cattle	433,283	2.8	0.13	76	67.6523	29,312,597	797,302,630
Broiler	220,000	0.01	0.36	1.5	0.0132	2,905	79,023
Laying hens	3,616,779	0.02	0.39	1.5	0.0286	103,485	2,814,780
Total						29,418,987	800,196,433

Methane emissions from manure are shown in Table 5. Cattle manures were the largest emitters of methane with 797,302 ton CO₂-eqv. It is seen that the cattle have the largest share of methane emission from farm manure in Kayseri with 99.6%.

Table 5. CO₂ emission reduction from energy substitution in Kayseri

Fuels	FS (GJ/year)	EF _{CO₂ fuel} (kg/GJ)	CE _{fuel}	CO ₂ emission (kg/year)
Firewood	1,040,627	112	0.24	485,626,085
Coal	1,040,627	94.6	0.40	246,108,362
Biogas	1,040,627	0	0.60	0
Natural gas	1,040,627	56.1	0.57	102,419,637

The CO₂ emissions from the conventional fuels that would be displaced by biogas were estimated. By replacing firewood with biogas, the total annual reduction of CO₂ emissions could reach 485.63 kt. Also, using this biogas as fuel eliminates methane emissions that would otherwise have come from the manure of cattle and poultry.

Table 6. Total CO₂ emission abatement from manure biogas system in Kayseri

ERMM CO ₂ -eqv. (t/year)	Fuels	ERES _{CO₂ fuel} (t/year)	Total CO ₂ emission abatement (t/year)
800,196.43	Firewood	485,626.09	1,285,822.52
	Coal	246,108.36	1,046,304.80
	Natural Gas	102,419.64	902,616.07

GHG emission from manure can be reduced by 800.2 kt CO₂-eqv by manure management with biogas systems. In addition, when fuel substitution is added, the total emission reduction can vary from 902.62 to 1,285.82 kt CO₂ equivalent according to the fuel to be substituted.

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

In this study, it was detected that the biogas potential of Kayseri from cattle, broiler litter and laying hens manures was 76.4 Mm³/year depending on the number of the animals in the years 2023.

Kocasinan districts have the greatest biogas potential. Develi, Pınarbaşı and Melikgazi districts follow this. If the whole biogas potential from animal manure is converted into electricity by means of a gas engine, approximately 192.71 GWh_{el}/year of electricity can be generated. This value can provide 4.43% of Kayseri's annual electric energy consumption (4,344 GWh_{el}).

At present in the province, there are 3 biogas plant investments with a total rate of 6 MW, which is under installation or newly operational. (Biyogazder, 2024). These biogas plants are BYZ Global and Mir Global with an installed capacity of 1.5 MW in Kocasinan district and Cod Enerji with an installed capacity of 3 MW in Pınarbaşı district. The installed power potential of biogas from animal manure in Kayseri province is around 27.5 MW. With the operation of the entire installed power potential of these three biogas plants, it is seen that almost all of the capacity (22%) can be utilized. This potential of Kayseri is not enough evaluated with the biogas plant currently installed.

The environmental benefits of biogas are often highlighted, as a valid and sustainable alternative to fossil fuels. Together with the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions, biogas can enhance energy security, thanks to its high energetic potential. Catching and utilizing biogas is a powerful tool for GHG reduction, a major cause of human-induced climate change. GHG are reduced in two ways: first, the biogas produced is a source of renewable energy that can replace fossil fuels. Second, the capturing of biogas reduces methane, a very potent greenhouse gas that would otherwise be free to escape into the atmosphere.

In this study, the created maps were provided to visualize more clearly the differences of data from the districts. The mapping can raise public awareness and provide a reference point for policy makers and investors.

Turkey has a great potential in terms of renewable energy resources. The country needs to make more use of renewable energy sources in order to become energy independent. Therefore, biogas can be a very attractive choice for Turkey as it is a sustainable, environmentally friendly and domestic energy source.

REFERENCES

- Başçetinçelik, A., Öztürk, H.H., Karaca, C., Kaçira, M, Ekinci, K. Kaya, D., Baban, A., Komitti N., Barnes, I. & Nieminen, M. (2006). Final Report of Exploitation of Agricultural Residues in Turkey. AGRO-WASTE - Exploitation of Agricultural Residues in Turkey. EU Life Program Project, Project No: LIFE03 TCY/TR/000061.
- Biyogazder. (2024). Biyogaz Derneği Biyogaz Tesisleri Listesi. Access Address (30.11.2024): <https://biyogazder.org/biyogaz-tesisleri/>
- Clarke Energy. (2024). CHP efficiency for biogas. Access Address (30.11.2024): <https://www.clarke-energy.com/2013/chp-cogen-efficiency-biogas/>.
- Dumanlı, A.G., Gulyurtlu, I. & Yürüm, Y. (2007). Fuel supply chain analysis of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 2058–2082.
- ERC Evolution. (2023). *IPCC sixth assessment report global warming potentials*. ERCE News. Access Address (29.08.2023): <https://erce.energy/erceipccsixthassessment/>
- FAO. 1996. Biogas Technology: A Training Manual for Extension. *Consolidated Management Services Nepal (P) Ltd. Kathmandu, Nepal*
- Guo Guo L. (2010) Potential of biogas production from livestock manure in China: GHG emission abatement from ‘manure-biogas-digestate’ system. Master’s Thesis, *Department of Energy and Environment, Division of Energy Technology, Chalmers University of Technology* Göteborg, Sweden.
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, V4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management.
- Isci, A. & Demirer, G.N. 2007. Biogas production potential from cotton wastes. *Renewable Energy*, 32, 750–757
- Karaca, C. (2015). Mapping of energy potential through annual crop residues in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2), 104-109.
- Karaca, C. 2016. Determination of Biogas Production Potential and Energy Value from Animal Manure in Turkey (Afyonkarahisar Provincial Example). *Proceeding Book of VII. International Scientific Agriculture Symposium:1922-1928*, 06 – 09 October 2016, Jahorina- Bosnia and Herzegovina.
- Karaca, C. (2017). Hatay İlinin Hayvansal Gübre Kaynağından Üretilen Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 22(1), 34-39.
- Karaca, C. (2018). Determination of Biogas Production Potential from Animal Manure and GHG Emission Abatement in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 205-210, Doi: 10.25165/j.ijabe.20181103.3445
- Karaca, C. & Gurdil, G.A.K. (2019). Biogas Production Potential from Animal Manure in Samsun Province of Turkey. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 50, 135-140. Doi: 10.2478/sab-2019-0019

Karaca, C. 2023. The biogas potential of animal manure and its GHG reduction effect in Konya Province, Turkey. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(4), 232–239. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2023.20052>

National Institute of Industrial Research (NIIR). 2004. Handbook on Biogas and It's Applications. Ajay Kr. Gupta, Delhi, India

TURKSTAT (2024). Livestock statistics: All districts of Kayseri province. Access Address (12.11.2024): <http://tuik.gov.tr/>

World Energy Council (WEC). (2016). World Energy Source, *Bioenergy 2016*. <https://www.worldenergy.org>

TRANSITIONING FROM FOSSIL FUELS: ADDRESSING ENVIRONMENTAL CHALLENGES AND ADVANCING SUSTAINABLE ENERGY SOLUTION**Astha Bagjilewale**

School of Computing and Artificial Intelligence (SCAI), VIT BHOPAL University, Bhopal, India

Abstract

Fossil fuel energy, mainly derived from coal, oil, and natural gas, has served as the foundation of industrial growth and economic advancement for more than two hundred years. These energy sources supply the bulk of global energy needs, powering electricity generation, transportation networks, and industrial activities. Their high energy output and well-established infrastructure make them essential to the world's energy landscape. However, the extraction, processing, and burning of fossil fuels present considerable environmental and social issues. The emission of carbon dioxide and other greenhouse gases significantly contributes to global warming and climate change, while pollutants released through their use compromise air and water quality, negatively impacting human health and ecosystems. Moreover, resource depletion and geopolitical conflicts related to fossil fuel reserves expose the economic and strategic risks associated with ongoing reliance on these sources. In light of these issues, there is an increasing focus on transitioning to cleaner energy alternatives, such as solar, wind, and hydropower, as well as advances in energy efficiency and carbon capture technologies. This transition is vital for achieving sustainable development objectives and reducing the long-term environmental repercussions of energy consumption. The abstract highlights the essential dual challenge of addressing present energy needs while investing in sustainable solutions to ensure a resilient and environmentally friendly energy future.

Keywords: Fossil fuels, coal, oil, natural gas, industrial growth, climate change, air quality, water quality, human health, ecosystems sustainable development, resilient energy future.

Introduction

For over two centuries, fossil fuels—including coal, oil, and natural gas—have been the cornerstone of industrial advancement and economic prosperity. Their widespread adoption has fuelled global electricity production, transportation infrastructure, and industrial processes, driven by their high energy efficiency and established systems of distribution. However, the environmental and societal repercussions of continued reliance on fossil fuels are becoming increasingly evident. The extraction, refinement, and combustion of these resources release substantial quantities of greenhouse gases, notably carbon dioxide, which exacerbate global warming and intensify climate change (IPCC, 2021). Additionally, pollution from fossil fuel use deteriorates air and water quality, endangering ecosystems and human health (Smith & Amezaga, 2017). Geopolitical tensions surrounding finite fossil fuel reserves further underscore the risks associated with this energy paradigm (Hirsch et al., 2005).

In light of these challenges, research has highlighted the critical need for a transition to renewable energy sources. Jacobson et al. (2017) demonstrate that a global shift to 100% renewable energy by 2050 is both technically and economically feasible, emphasizing the role of solar, wind, and hydropower in achieving this transformation. Similarly, studies by Zhang and Shah (2020) have shown that integrating carbon capture technologies into energy systems can significantly mitigate greenhouse gas emissions. This transition is imperative for meeting sustainable development goals and minimizing the long-term environmental consequences of energy consumption.

This paper explores the challenges of balancing current energy demands with the urgency of transitioning to sustainable energy systems. It builds on existing research to propose strategies for fostering a resilient and ecologically sustainable energy future.

Environmental and Social Impacts of Fossil Fuel Usage

Contribution to Climate Change

Fossil fuels are the largest source of greenhouse gas emissions, with CO₂ and methane driving global warming and severe climate disruptions such as rising sea levels and extreme weather (IPCC, 2021). These emissions underscore the urgency for a low-carbon energy transition.

Air and Water Pollution

Fossil fuel activities release pollutants like sulfur dioxide, nitrogen oxides, and particulates, causing smog, acid rain, and respiratory illnesses (Smith et al., 2019). Contamination from spills and mining operations also degrades water quality and ecosystems.

Health Impacts

Air pollution from fossil fuels leads to respiratory and cardiovascular diseases, contributing to millions of premature deaths annually (WHO, 2021). Communities near extraction sites face heightened risks, while climate-driven health issues, such as heatwaves and disease spread, further compound these effects.

Geopolitical and Economic Vulnerabilities

Finite fossil fuel reserves create economic instability, price volatility, and geopolitical tensions. Nations dependent on exports or imports are particularly vulnerable, highlighting the need for energy diversification and security.

These impacts emphasize the critical need for a sustainable energy transition to protect the environment, public health, and global stability.

The Case for Transitioning to Renewable Energy

Urgency of Addressing Climate Change

The escalating effects of climate change, driven by greenhouse gas emissions from fossil fuels, demand immediate action. The IPCC (2021) emphasizes that limiting global warming to 1.5°C requires halving emissions by 2030 and achieving net zero by 2050.

Role of International Agreements

Global accords like the Paris Agreement play a crucial role in uniting nations to combat climate change. By setting binding targets for emissions reductions and promoting renewable energy investments, these agreements provide a framework for coordinated global action.

Benefits of Renewable Energy Adoption

Transitioning to renewables offers multiple benefits, including reduced greenhouse gas emissions, improved air quality, and enhanced energy security. Additionally, the renewable energy sector fosters economic growth through job creation and innovation, paving the way for sustainable development.

This transition is not just an environmental imperative but a socio-economic opportunity to build a resilient and equitable energy future.

Advancements in Sustainable Energy Technologies

Solar, Wind, and Hydropower Technologies

Solar and wind energy technologies have seen significant advancements, with dramatic reductions in costs and increased efficiency. Solar panels are now capable of converting more sunlight into electricity, while wind turbines are more powerful and efficient. Hydropower remains a reliable source of renewable energy, with innovations in small-scale hydropower and better integration into local energy systems enhancing its potential.

Battery Storage and Grid Modernization

The development of advanced battery storage technologies, such as lithium-ion and solid-state batteries, is crucial for overcoming the intermittent nature of renewable energy sources. These innovations enable better energy storage, allowing electricity to be stored during peak production and distributed during high demand. Additionally, modernizing energy grids with smart technologies enhances their flexibility, stability, and ability to incorporate renewable energy at scale.

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)

Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies aim to capture CO₂ emissions from industrial processes and power generation, preventing them from entering the atmosphere. These technologies are critical in achieving net-zero emissions, especially in sectors that are difficult to decarbonize. CCUS is evolving with new methods for both capturing and repurposing CO₂ into valuable products.

Emerging Technologies

Emerging technologies, such as hydrogen fuel and nuclear fusion, hold promise for further advancing sustainable energy. Hydrogen, especially green hydrogen produced from renewable sources, offers a clean alternative for sectors like transportation and heavy industry. Nuclear fusion, still in the research phase, could provide nearly limitless, clean energy if it becomes commercially viable.

Case Studies of Successful Transitions

Sweden

Sweden is a leader in renewable energy, generating over 50% of its electricity from renewables, primarily hydropower, wind, and bioenergy. The country's success is attributed to strong government policies, such as carbon taxes and green energy subsidies, along with significant investments in clean technologies. Sweden's focus on energy efficiency and a commitment to carbon neutrality by 2045 provides valuable lessons in aligning policy with long-term environmental goals.

Germany

Germany's *Energiewende* (energy transition) policy has transformed its energy sector, making it a global example. By investing in wind and solar power, Germany has become one of the world's largest producers of renewable energy. The country's experience highlights the importance of gradual transitions, public support, and incentivizing renewable energy production through feed-in tariffs and subsidies for clean technology.

Costa Rica

Costa Rica has successfully achieved periods of running entirely on renewable energy, mainly from hydroelectric, wind, and geothermal sources. The country's commitment to sustainability is evident through its efforts to phase out fossil fuels and focus on conservation. Costa Rica's approach demonstrates the power of aligning environmental policy with national development goals, supported by strong leadership and public-private partnerships.

Lessons Learned

Key lessons from these case studies include the importance of strong governmental policies, public-private collaboration, and investments in renewable infrastructure. Gradual transitions, economic incentives, and public engagement are crucial to overcoming resistance and ensuring the success of renewable energy initiatives.

Barriers to Transition and Potential Solutions

Technical Challenges

Key challenges include integrating renewable energy into existing grids and developing energy storage systems. Wind and solar power are intermittent, requiring smart grids and advanced storage technologies to ensure reliable energy supply.

Economic Barriers

High upfront costs for renewable infrastructure and technology can be a significant hurdle, particularly for developing countries. Overcoming these barriers requires government support, long-term planning, and international financing.

Social and Cultural Resistance

Resistance to renewable energy can arise from vested interests in fossil fuels, fear of job losses, and lack of awareness. Communities dependent on fossil fuel industries may resist change due to economic and lifestyle concerns.

Proposed Solutions

- **Technological Innovation:** Invest in smart grids, energy storage, and renewable technologies.
- **Economic Support:** Implement subsidies, tax incentives, and public-private partnerships to reduce costs.
- **Social Engagement:** Raise awareness, provide retraining programs, and involve communities in the transition.
- **Policy and Governance:** Develop policies that incentivize renewable adoption and phase out fossil fuel subsidies.

Future Directions and Research Opportunities

Advancing Renewable Technologies

Research should focus on improving the efficiency and scalability of renewable technologies like solar, wind, and energy storage systems. Innovations in areas such as floating solar panels and next-generation batteries will be crucial.

Enhancing Energy Efficiency

Future efforts should prioritize optimizing energy use across sectors through smart grids, energy-efficient appliances, and industrial practices, reducing overall energy demand while supporting renewable integration.

Developing Sustainable Energy Policies and International Collaborations

Developing policies that support the growth of renewables and encourage international collaboration will be vital. Research into global energy frameworks, carbon pricing, and cross-border energy trade will help accelerate the transition.

These areas of research will drive the innovation and global cooperation necessary for a sustainable energy future.

Conclusion

The transition from fossil fuels to renewable energy is essential for addressing climate change, reducing environmental and health impacts, and ensuring long-term energy security. Key findings highlight the technological, economic, and social barriers that need to be overcome, including grid integration, high costs, and resistance from communities dependent on fossil fuels. Recommendations for stakeholders include governments incentivizing renewable investments, industries embracing clean technologies, and communities supporting the shift through education and retraining programs. A collective global effort is crucial, as cooperation among nations, industries, and communities will accelerate the transition, ensuring a sustainable and resilient energy future for all.

References

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press.
- World Health Organization (WHO). (2021). *Air Pollution and Health*. Retrieved from www.who.int.
- Smith, K. R., et al. (2019). *Air Pollution, Health, and Economic Costs: A Global Overview*. *Environmental Health Perspectives*, 127(12). <https://doi.org/10.1289/EHP4813>.
- Global Renewable Energy Investment Forum. (2020). *Investment Trends in Renewable Energy*. Retrieved from www.greif.org.
- Swedish Energy Agency. (2020). *Renewable Energy and Sweden's Climate Goals*. Retrieved from www.energimyndigheten.se.
- Germany Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2020). *The Energiewende: A Guide to Germany's Energy Transition*. Retrieved from www.bmwi.de.
- Costa Rica Ministry of Environment and Energy. (2020). *Costa Rica's Renewable Energy Pathway*. Retrieved from www.minae.go.cr.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation*. IEA.

A STUDY ON WASTE PLASTIC IN BITUMEN

Ramireddy Sushmitha

Assistant Professor, Civil Engineering Department, G. Pulla Reddy Engineering College (Autonomous), Kurnool, Andhra Pradesh-518007, India.

Abstract

Plastics are everywhere in today's lifestyle and are growing rapidly throughout particularly in a developing country like India. As these are non-biodegradable there is a major problem posed to the society with regard to the management of these solid wastes. Low density polyethylene (LDPE) has been found to be a good modifier of bitumen. Even, the reclaimed polyethylene originally made of LDPE has been observed to modify bitumen. In the present study, an attempt has been made to use reclaimed polyethylene which has been obtained from different kinds of plastic waste and for the plastic is also obtained from recycling plant in grain form, in dry form with the aggregates like a fiber in a bituminous mix. Detailed study on the effects of this locally waste polyethylene on several properties of Bitumen will be made in this study.

KEY WORDS: Ductility test, Softening point test, Penetration test, Viscosity test, Milk packets, Bitumen, Marshall Test.

1. Introduction

Any nation's progress is directly dependent on infrastructure. India is on the threshold of a major forward thrust in the field of transportation infrastructure. Over the past two decades, traffic volumes have increased, demanding from pavement engineers, stronger and long-lasting pavements. New methods of pavement design are being developed to improve the performance of roads. New materials are being used to replace the old ones to improve the durability, strength, aesthetics, and economy. One of the promising ways is to use plastics in bituminous road construction industry. Today, the availability of the waste plastics is enormous, as the plastic materials have become part and parcel of daily life. If not recycled, their present disposal is either by land filling or by incineration. Both these processes have certain impact on the environment. Under this circumstance, an alternate use for the waste plastics is the need of the hour.

In this study to the Marshall properties of bituminous mixes have been found when plastic wastes are incorporated into them. Plastic in different forms is found to be almost 5% in municipal solid waste, which is toxic in nature. It is a common sight in both urban and rural areas to find empty plastic bags and other type of plastic packing material littering the roads as well as drains. Due to its biodegradability, it creates stagnation of water and associated hygiene problems. In order to overcome this problem research has been carried out whether this waste plastic can be reused productively.

The experimentation at several institutes indicated that the waste plastic, by adding it to bitumen directly (known as wet process) and by adding it to hot aggregate will form a fine coat of plastic over the aggregate and such aggregate, when mixed with the binder is found to give higher strength, higher resistance to water and better performance over a period of time (known as dry process). Use of higher percentage of plastic waste reduces the need of bitumen by 10%. It also increases the strength and performance of the road. Plastic roads would be a boon for India's hot and extremely humid climate, where temperatures frequently cross 50°C and torrential rains create havoc, leaving most of the roads with big potholes.

This paper envisages the use of waste plastic in different proportion (4% to 16% by weight of bitumen) to prepare bituminous concrete mix. The variation in different tests like Ductility, Softening, Penetration, Stripping Value and Marshall Properties of for the mixes containing different amount of plastic waste are studied.

2. Need for the Study

- i. Disposal of waste plastic is a major problem.
- ii. It is non-biodegradable.
- iii. It mainly consists of low-density polyethylene
- iv. To find its utility in bituminous mixes for road construction.
- v. Burning of these waste plastic bags causes
- vi. environmental pollution.
- vii. Laboratory performance studies were conducted on bituminous mixes.
- viii. Studies proved that waste plastic enhances the property of the mix.
- ix. Improvement in properties of bituminous mix provides the solution for disposal in a useful way.

3. Literature Review

Most of the researches have worked in publishing their work on use of Plastic Waste as material in road construction for improving the strength of pavement. The observation, methodology, conclusions, and further scope of work are used to finalize the objectives of present work. The available literature of review is as follows:

Monika (2013) studied the result of the addition of waste plastic modifies the properties of bitumen. The modified bitumen shows good result when compared to standard results. The optimum content of waste plastic to be used is between the range of 1% - 2% to weight of aggregate. The problems like bleeding are reduce in hot temperature region. Plastic has property of absorbing sound, which also help in reducing the sound pollution of heavy traffic. The waste plastic used in this study is LDPE (Low Density Polyethylene) from waste milk packaging for BC, SDBC, and with different admixtures. The waste plastics thus can be put to use and it ultimately improves the quality and performance of road. Total material cost of the project is reduced by about 13%.

Azmat et al., (2017) studied the behaviour of plastic waste modified BC, we can conclude that the modified mix possesses improved Marshall Characteristics. It is observed that Marshall Stability value increases with plastic content and we observed that the Marshall Flow value decreases upon addition of polythene i.e. the resistance to deformations under heavy wheel loads increases. From all the experiments performed we can conclude that the addition of plastic waste enhances the various properties of an ordinary bituminous road. Considering these factors we can assure that we can obtain a more stable and durable mix for the pavements by polymer modifications. This small investigation not only utilizes beneficially, the waste non- degradable plastics but also provides us an improved pavement with better strength and longer life period. This study will have a positive impact on the environment as it will reduce the volume of plastic waste to be disposed of by incineration and land filling. It will not only add value to plastic waste but will develop a technology, which is eco-friendly.

Vasudevan (2018), Vasudevan is an Indian scientist who has worked mainly in waste management. He is currently a professor in Thiagarajan College of Engineering. He developed an innovative method to reuse plastic waste to construct better, more durable and very cost-effective roads. He thought up the idea of shredding plastic waste, mixing it with bitumen and using the polymerized mix in road construction. This method will help in making roads much faster and also will save environment from dangerous plastic waste. He also visited Mahatma schools on 15 April 2008. The roads also show greater resistance to damages caused by heavy rains. Sasane et al. (2015) Investigated application of waste plastic as an effective construction material in flexible pavement. They explained that the addition of plastic is the innovative technology which strengthen the road construction and also increases the life of road. As the plastic content increase the property of bitumen and aggregate also increases compared to conventional flexible pavement the flexible pavement with the added plastic has good results. According to marshal stability test the optimum use of plastic is up to 10%.

Sabina (2001) Studied the comparative performance of properties of bituminous mixes containing plastic/polymer (PP) (8% and 15% by weight of bitumen) with conventional bituminous concrete mix (prepared with 60/70 penetration grade bitumen). Improvement in properties like Marshall Stability, retained stability, indirect tensile strength and rutting was observed in Plastic modified bituminous concrete mixes.

Rajasekaran et al (2013) Explains that by coating the aggregate with the polymer has many advantages and which ultimately helps in improving the flexible pavement quality not only it improves the pavement quality but also improve the aggregate quality. This technology also helps in the disposal of waste plastic obtained from the domestic and industrial packing materials. The dry process is more valuable as it disposes the 80 % of waste polymer in eco-friendly way. And use of polymer reduces the equivalent bitumen quantity and therefore reducing the construction cost of road.

Bharsakale et al. (2012) studied that it is possible to improve the performance of bituminous mixed used in the surfacing course of roads. Studies reported in the used of re-cycled plastic, mainly polyethylene, in the manufacture of blended indicated reduced permanent deformation in the form of rutting and reduced low – temperature cracking of the pavement surfacing. Plastic is a very versatile material. Due to the industrial revolution, and its large-scale production plastic seemed to be a cheaper and effective raw material. Looking forward the scenario of present life style a complete ban on the use of plastic cannot be put, although the waste plastic taking the face of devil for the present and future generation. We cannot ban use of plastic but we can reuse the plastic waste. In the construction of flexible pavements, bitumen plays the role of binding the aggregate together by coating over the aggregate. It also helps to improve the strength and life of road pavement. But its resistance towards water is poor. A common method to improve the quality of bitumen is by modifying the rheological properties of bitumen by blending with synthetic polymers like rubber and plastics. Use of plastic waste in the bitumen.

4. Materials

- Aggregate
- Bitumen
- Plastic waste (LDPE)

4.1 Aggregate

Aggregate is a collective term for the mineral materials such as sand, gravel and crushed stone that are used as binding medium in various ways in construction. The aggregate that are used for Bituminous pavements are gravel and crushed stone (stone dust).

Aggregates can either be natural or manufactured. Natural aggregates are generally extracted from larger rock formations through an open excavation (quarry). Extracted rock is typically reduced to usable sizes by mechanical crushing. Manufactured aggregate is often the by- product of other manufacturing industries.

In this project we are using a mix of gravel (coarse aggregate) and stone dust (fine aggregate). And the gradation of aggregate is used as per specifications mentioned in the MORTH 5th revision (Ministry of Road Transport and Highways).

Table 1 Specified Gradation of Aggregate by MORTH

IS sieve size (mm)	Cumulative % passing of aggregate as per MORTH	Cumulative % passing of aggregate taken
19	90-100	100
13.2	56-88	80
4.75	16-36	35
2.36	4-19	15
0.3	2-10	5
0.075	0-8	0.9

Tests on Aggregate

- Specific Gravity
- Water Absorption
- Flakiness and Elongation Index
- Aggregate Crushing Value test
- Aggregate Impact Value test

All the tests are done as per IS-2386 1963 and the results are verified with IRC (Indian Road Congress) permissible limits.

4.2 Bitumen

Bitumen is a black and highly adhesive form of petroleum. It is also a by-product of crude oil. It is commonly used in road construction to act as a binder for aggregates in the production of asphalt and as a waterproofing agent in the form of bituminous membranes.

Grade of bitumen that is accepted for construction of bituminous pavements as per IRC (Indian Road Congress) are S35 to S90 or A35 to A90 (30/40 to 80/100).

There are many grades of Bitumen and to find the grade the following tests are performed

- Penetration test
- Softening point test
- Ductility test
- Viscosity test

5. Waste Plastic Mix

Waste plastic bags were collected from roads, garbage trucks, dumpsites and compost plants, waste-buyers at Rs.5-6 per kg. Household plastic was also collected for the project work, like empty milk bags, used plastic bags etc. The collected Plastic waste was sorted as per the required thickness. Generally, polyethylene of 60 micron or below is used for the further process. Less micron plastic is easily mixable in the bitumen at higher temperature (160°C- 170°C). It is clean by de-dusting or washing if required. Collected Plastic was cut into fine pieces as far as possible. The plastic pieces were sieved through 4.75mm sieve and retaining at

2.36mm sieve was collected. Firstly, Bitumen was heated up to the temperature about 160°C- 170°C which is its melting temp. Pieces were added slowly to the hot bitumen of temperature around 160-170°C. The mixture was stirred manually for about 20-30 minutes. In that time period temperature was kept constant about 160-170°C. Polymer bitumen mixtures of different compositions were prepared and used for carrying out tests i.e. Penetration test, Ductility test.

There are two types of field trials:-

1. Dry Process
2. Wet Process

Dry Process:

For the flexible pavement, hot stone aggregate (1700) is mixed with hot bitumen (160° C) and the mix is used for road laying. The aggregate is chosen on the basis of its strength, porosity and moisture absorption capacity as per IS coding. The bitumen is chosen on the basis of its binding property, penetration value and viscoelastic property. The aggregate, when coated with plastics improved its quality with respect to voids, moisture absorption and soundness. The coating of plastic decreases the porosity and helps to improve the quality of the aggregate and its performance in the flexible pavement. It is to be noted here that stones with <2% porosity only allowed by the specification.

- Plastic waste like bags, bottles, etc are cut into size between 2.36mm and 4.75mm using shredding machine.
- The aggregate mix is heated to 170° and then it is transferred to mixing chamber.
- Similarly, the bitumen is to be heated up to a maximum of 160°.
- At the mixing chamber, the shredded plastics waste is added over the hot aggregate.
- The plastics waste coated aggregate is mixed with hot bitumen. **Advantages of Dry Process**
- Plastic is coated over stones - improving surface property of aggregates. b. Coating is easy & temperature required is same as road laying temp.
- Use of waste plastic more than 15% is possible.
- Flexible films of all types of plastics can be used.
- Doubles the binding property of aggregates.
- No new equipment is required.
- Bitumen bonding is strong than normal.
- The coated aggregates show increased strength.
- As replacing bitumen to 15% higher cost efficiency is possible.
- No degradation of roads even after 5-6 yrs after construction.
- Can be practiced in all type of climatic conditions.
- No evolution of any toxic gases as maximum temperature is 180° C. **Disadvantages of Dry Process**
- The process is applicable to plastic waste material only.

Wet Process:

Waste plastic is ground and made into powder; 6 to 8 % plastic is mixed with the bitumen. Plastic increases the melting point of the bitumen and makes the road retain its flexibility during winters resulting in its long life. Use of shredded plastic waste acts as a strong "binding agent" for tar making the asphalt last long. By mixing plastic with bitumen the ability of the bitumen to withstand high temperature increases. The plastic waste is melted and mixed with bitumen in a particular ratio. Normally, blending takes place when temperature reaches 45.5° C but when plastic is mixed, it remains stable even at 55° C. The vigorous tests at the laboratory level proved that the bituminous concrete mixes prepared using the treated bitumen binder fulfilled all the specified Marshall mix design criteria for surface course of road pavement. There was a substantial increase in Marshall

Stability value of the mix, of the order of two to three times higher value in comparison with the untreated or ordinary bitumen. Another important observation was that the bituminous mixes prepared using the treated binder could withstand adverse soaking conditions under water for longer duration.

- Waste plastics by direct mixing with hot bitumen at 160°C.
- Mechanical stirrer is needed.
- Addition of stabilizers and proper cooling.
- Since the wet process require a lot of investment and bigger plants.
- Not commonly used.

5. Sample Preparation

- The bitumen is heated up to 160°C
- The plastic in powdered form is added to the bitumen and stirred continuously either manually or by mechanically in order to maintain even mixture.
- Mixing is done till the temperature reaches 70°C
- Plastic is added in proportions to wt of bitumen

Table 2. Plastic added in bitumen by % wt of Bitumen

Sample	% of Bitumen in the mix	% of Plastic in the mix
Sample 1	96	4
Sample 2	92	8
Sample 3	88	12
Sample 4	84	16

6. Tests performed on Polymer modified Bitumen

- Penetration test
- Softening point test
- Ductility test
- Stripping Value test on aggregates

7. MARSHALL STABILITY TEST (ASTM D6927 - 06 STANDARD TEST METHOD)

The mix design (wet mix) determines the optimum bitumen content. This is preceded by the dry mix design discussed in the previous chapter. There are many methods available for mix design which vary in the size of the test specimen, compaction, and other test specifications. Marshall method of mix design is the most popular one.

The Marshall stability and flow test provides the performance prediction measure for the Marshall mix design method. The stability portion of the test measures the maximum load supported by the test specimen at a loading rate of 50.8 mm/minute. Load is applied to the specimen till failure, and the maximum load is designated as stability. During the loading, an attached dial gauge measures the specimen's plastic flow (deformation) due to the loading. The flow value is recorded in 0.25 mm (0.01 inch) increments at the same time when the maximum load is recorded.

Sample preparation:

Approximately 1200gm of aggregates and filler is heated to a temperature of 175-190°C. Bitumen is heated to a temperature of 121-125°C with the first trial percentage of bitumen (say 3.5 or 4% by weight of the mineral aggregates). The heated aggregates and bitumen are thoroughly mixed at a temperature of 154-160°C. The mix is placed in a preheated mould and compacted by a rammer with 25 blows on while pouring 1/3rd of mix in to the mould and after completing it reverse the mould and give 75 blows on other side at temperature of 138°C to 149°C. The weight of mixed aggregates taken for the preparation of the specimen may be suitably altered to obtain a compacted thickness of 63.5+/-3 mm. Vary the bitumen content in the next trial by +0.5% and repeat the above procedure.

Properties of mix:

The properties that are of interest include the theoretical specific gravity G_t , the bulk specific gravity of the mix G_m , percent air voids V_v , percent volume of bitumen V_b , percent void in mixed aggregate VMA and percent voids filled with bitumen VFB. These calculations are discussed next.

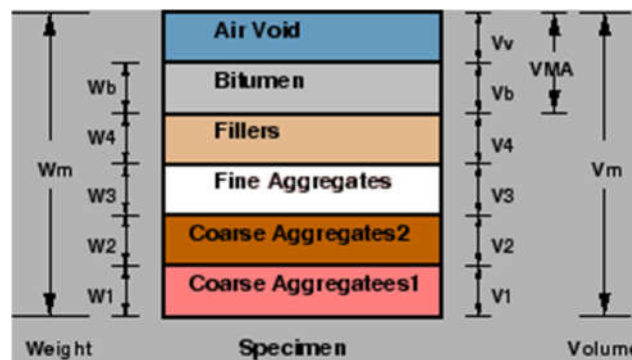


Fig 1 Phase Diagram of Bituminous mix

Preparation of Sample:

- Specimens are heated to $60 \pm 1^\circ\text{C}$ either in a water bath for 30-40 minutes or in an oven for minimum of 2 hours.
- The specimens are removed from the water bath or oven and place in lower segment of the breaking head. The upper segment of the breaking head of the specimen is placed in position and the complete assembly is placed in position on the testing machine.
- The flow meter is placed over one of the post and is adjusted to read zero.
- Load is applied at a rate of 50 mm per minute until the maximum load reading is obtained.
- The maximum load reading in Newton is observed. At the same instant the flow as recorded on the flow meter in units of mm was also noted.

Table 3 Marshall Mix Design Specifications

Test Property	Specified Value
Marshall Stability (Minimum)	340 KgF
Flow value in 0.25 mm units	8 -17 (2 mm – 4.25 mm)
Percentage air voids in the mix V_v	3-5
Voids filled with Bitumen VFB	75 – 85

Table 4 Correction Factor for Marshall Stability

Volume of specimen	Thickness of Specimen	Correction factor
457 – 470	57.1	1.19
471 – 482	68.7	1.14
483 – 495	60.3	1.09
496 – 508	61.9	1.04
509 – 522	63.5	1.00
523 – 535	65.1	0.96
536 – 546	66.7	0.93
547 – 559	68.3	0.89
560 – 573	69.9	0.86

8. MARSHALL STABILITY TEST (PLASTIC MIX)

The process used to make the sample is a dry process

Procedure:

- Aggregate is heated to 170°C and then shredded plastic is added to the aggregate.
- The plastic is made to evenly coat on aggregate for a few seconds.
- And immediately the bitumen is added to the mix.

As we know that the OBC is 5% we add plastic in proportions to weight of bitumen.

Table 5 Plastic added in bitumen by % wt of Bitumen

Sample	% of Bitumen in the mix	% of Plastic in the mix
Sample 1	96	4
Sample 2	92	8
Sample 3	88	12
Sample 4	84	16

Table 6 % Wt. of each material by wt. of mix

Sample	% of Aggregate in the mix	% of Bitumen in the mix	% of Plastic in the mix
Sample 1	95	4.8	0.2
Sample 2	95	4.6	0.4
Sample 3	95	4.4	0.6
Sample 4	95	4.2	0.8

Table 7 Sample 1 (4% of plastic added to the wt of Bitumen)

Description	Specimen 1 (4.5% Bitumen Content)	Specimen 2 (5% Bitumen Content)	Avg values
Wt. of the specimen in air W _m (g)	1260 g	1259 g	1259.5 g
Wt. of specimen in water W _w (g)	746 g	743 g	744.5 g
Saturated surface dry core wt. W _{ssd} (g)	1270 g	1267 g	1268.5 g
Volume of core V (cc)	524 cc	524 cc	524 cc
Marshall stability before correction	1240	1296	-
Correction factor for marshall stability	0.96	0.96	-
Density of Core (g/cc)	2.4	2.4	2.4
Marshall Stability (KgF)	1190	1245	1217.5
Flow Value (mm)	3.315 mm	3.319 mm	3.317

9. Comparison between Plastic and Ordinary road

Table 8 Comparison b/w Plastic road and Ordinary road

TESTS	PLASTIC ROAD	ORDINARY ROAD
Marshall Stability Value	MORE	LESS
Binding property	BETTER	GOOD
Softening point	MORE	LESS
Penetration Value	MORE	LESS
Tensile strength	HIGH	LESS
Rutting	LESS	MORE
Seepage of water	NO	YES
Stripping Value	NO	YES
Durability of road	BETTER	GOOD
Cost of pavement	LESS	NORMAL
Maintenance cost	ALMOST NIL	MORE
Environmental Friendly	YES	NO

9.1 Advantage of Waste Plastic Bituminous Mix:

- Stronger road with increased Marshall Stability Value.
- Better resistance towards rain water and water stagnation.
- No stripping and no potholes.
- Increase binding and better bonding of the mix.
- Reduction in pores in aggregate and hence less rutting and ravelling.
- No effect of radiation like UV.
- The strength of the road is increased by 100%.
- The load withstanding property increases. It helps to satisfy today's need of increased road transport.
- For 1km X 3.75m road, 1 ton of plastic (10 lakh carry bags) is used and 1 ton of bitumen is saved.
- Value addition to the waste plastics (cost per kilogram increases from Rs 4 to Rs12).

- The cost of road construction is also decreased.
- The maintenance cost of road is almost nil.
- Disposal of waste plastic will no longer be a problem.
- The use of waste plastics on the road has helped to provide better place for burying the plastic waste without causing disposal problem.

9.2 Disadvantages of Waste Plastic Bituminous Mix:

- Cleaning process- Toxics present in the co-mingled plastic waste would start leaching.
- During the road laying process- in the presence of chlorine will release noxious HCL gas.
- After the road laying- It is opined that the first rain will trigger leaching. As the plastics will merely form a sticky layer, (mechanical abrasion).
- The components of the road, once it has been laid, are not inert.

10. CONCLUSION

The generation of waste plastics is increasing day by day. The major polymers namely polyethylene, polypropylene, polystyrene show adhesion property in their molten state. Plastics will increase the melting point of the bitumen. The waste plastic bitumen mix forms better material for pavement construction as the mix shows higher Marshall Stability value and suitable Marshall Coefficient. Hence the use of waste plastics for pavement is one of the best methods for easy disposal of waste plastics.

- The strength of the pavement is increased by 21% by adding 8% of wt of plastic in bitumen content, thereby we found that the OPC (Optimum Plastic Content) of is 8% of plastic by wt. of bitumen.
- Plastic addition increases the hardness of the pavement by 31.6% for optimum plastic content i.e. 8%, thereby making the road more durable.
- The softening point of the mix also increases by 10.2 % for optimum plastic content i.e. 8%, thereby making pavement resistant for high temperatures
- The pavement also becomes water resistant as it reduces total air voids by 11% and mineral voids by 7.7% for optimum plastic content i.e. 8%, making it more durable and resistant to extreme weather conditions

The use of the innovative technology not only strengthened the road construction but also increased the road life as well as will help to improve the environment and also creating a source of income.

Plastic roads would be a boon for India's hot and extremely humid climate, where temperatures frequently cross 50°C and torrential rains create havoc, leaving most of the roads with big potholes. It is hoped that in near future we will have strong, durable and eco- friendly roads which will relieve the earth from all type of plastic-waste.

REFERENCES

1. Vamshi, J. Eng. 2(2013) 123-128.
2. W. Butu and S.S Mshelia, British J. Environ. Sci. 2 (2014) 10-26.
3. A.J. Chavan, Int. Innovation Eng. Manage. 2 (2013) 1-13.
4. V. S. Punith, A. Veeraragavan, Laboratory fatigue studied on bituminous concrete mixes utilizing waste shredded plastic modifier, Proceeding of the 21st ARRB and 11th REAAA Conference, Australia 2003.
5. Justo, C.E.G. and Veeraragavan, A. (2002) Utilization of Waste Plastic Bags in Bituminous Mix for Improved Performance of Roads. Bangalore University, Bengaluru.

6. Vasudevan R,(2006) “Utilization of waste plastics for flexible pavement”, Indian Highways (Indian Road Congress), vol. 34, no.7, pp 105-111.
7. Vasudevan.R, S.K. Nigam, R. Velkennedy, A. Ramalinga Chandra Sekar1 and B. Sundarakannan (2007), “Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers”, Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, September, pp 105-111.
8. Sasane Neha .B., Gaikwad.Harish, Dr. J R Patil And Dr. S D Khandekar, Application Of Waste Plastic As An Effective Construction Material In Flexible Pavement, International Research Journal Of Engineering And Technology,2015, 2(3),1943- 1948.

THE ROLE OF WINDOW SIZES IN TIME SERIES ANALYSIS: AN EVALUATION FOR ENERGY CONSUMPTION PREDICTION IN PUBLIC BUILDINGS

Sinan GÜNEŞ

Lecturer, Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Real Estate Development and Management, Ankara-Türkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-7753-8333

Mustafa TOMBUL

Prof. Dr., Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Real Estate Development and Management, Ankara-Türkiye, ORCID: 0000-0002-1875-8042

Abstract

Buildings contribute significantly to global energy consumption, highlighting the critical need for effective forecasting methods to enhance energy management and sustainability. Time step selection in time series analysis, also referred to as window size, is a key parameter that influences the accuracy and efficiency of deep learning models such as Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Networks (CNN). This parameter defines the temporal range of historical data used in forecasting, shaping the model's ability to capture dependencies and patterns.

This study systematically evaluates the methodologies for time step determination in deep learning models, focusing on their applicability to energy consumption prediction in public buildings. Using an extensive literature synthesis, the analysis explores the trade-offs between model complexity and predictive accuracy. Key findings highlight the advantages of dynamic and adaptive time step strategies over static configurations, particularly in addressing temporal variability and seasonal trends. Comparative analyses of time step resolutions, including hourly, daily, and weekly intervals, reveal their differential impact on prediction accuracy and computational efficiency.

The research provides actionable insights for optimizing time step selection, recommending a context-specific approach tailored to the operational and temporal characteristics of public building energy systems. By bridging theoretical advancements with practical applications, this study lays the groundwork for developing robust, adaptable frameworks that support energy efficiency and sustainable building operations.

Keywords: Energy consumption forecasting, time series analysis, window size optimization, deep learning models, energy efficiency

Introduction

Accurately predicting energy consumption in public buildings is a multifaceted challenge that demands meticulous calibration of modeling parameters. Among these parameters, the selection of “*time step*”, often referred to as window size in time series data, plays a pivotal role in shaping model performance. This parameter defines the temporal context available to predictive models, significantly impacting their ability to capture dependencies across time. Despite advancements in neural network methodologies, particularly in leveraging sequence-based architectures like LSTM and GRU, the challenge of determining an optimal time step for diverse datasets and applications persists (Levasseur & Bersini, 2024).

Recent research highlights the criticality of optimizing time step values to balance predictive accuracy with computational efficiency. While enhanced sliding window algorithms and adaptive methods have demonstrated promising results in addressing these challenges, the absence of a universally accepted approach remains a gap in the field (Tomar et al., 2022). This study aims to explore various methodologies for time step selection, focusing on their implications for energy consumption forecasting in public buildings. By synthesizing insights from dynamic and context-aware strategies, the paper advocates for tailored solutions that align with the unique operational and temporal characteristics of public building energy systems.

The Importance of Time Step in Energy Consumption Prediction

In time series data, the selection of “*time step*” is a critical parameter that significantly affects the performance of deep learning models for predicting energy consumption in public buildings. By determining the historical data range available to the model, the time step directly influences both the accuracy of predictions and the computational efficiency of the modeling process. Recent advancements in feature engineering, hybrid modeling, and dynamic time step optimization have further deepened our understanding of how this parameter shapes model performance.

Impact on Model Performance

Studies consistently demonstrate that selecting the optimal time step can greatly enhance prediction accuracy. For example, hybrid models combining Self-Organizing Maps and Genetic Algorithms with deep learning architectures, such as CNNs, have achieved superior accuracy through refined feature selection and clustering processes (Abdelaziz et al., 2024; Tomar et al., 2022). Furthermore, probabilistic approaches like LSTM combined with Conformalized Quantile Regression have been successful in addressing the uncertainties inherent in time series data by providing predictive intervals (Jiang & Hui, 2024).

Feature Selection and Preprocessing

The role of feature engineering in optimizing energy consumption prediction models is indispensable. Advanced preprocessing techniques, such as XGBoost-based feature extraction, allow models to prioritize the most relevant inputs, thus enhancing predictive performance (Abbasimehr et al., 2023). Moreover, iterative heuristics and event detection methods enable dynamic adjustments to time step values, facilitating adaptability across various datasets and scenarios (Levasseur & Bersini, 2024).

Temporal Characteristics and Adaptation

The inherent variability in energy data—driven by factors such as seasonal trends and operational patterns—necessitates the adoption of flexible modeling approaches. Studies focusing on HVAC systems demonstrate that tailoring time steps to specific temporal characteristics significantly improves the capture of usage patterns, thereby enhancing energy efficiency (Jiang & Hui, 2024). Additionally, dynamic time step strategies informed by signal processing techniques or embedding methods present a viable solution to the limitations of static configurations, offering adaptability to evolving data patterns (Levasseur & Bersini, 2024).

Comparative Analyses of Time Step Resolutions

The choice of time step resolution (e.g., hourly, daily, weekly, or monthly) greatly influences the performance of models such as LSTM, GRU, and CNN. For instance, hyperparameter tuning and grid search methods have demonstrated notable improvements in energy consumption predictions when the time step resolution aligns with the data’s temporal granularity (Barzola-Monteses et al., 2022; Tomar et al., 2022). While short time steps, such as hourly intervals, capture fine-grained temporal dynamics, longer time steps like daily or weekly intervals provide a balance between computational efficiency and trend detection.

Summary

Optimizing time step in time series analysis is a challenging yet essential aspect of energy consumption prediction for public buildings. The integration of hybrid modeling techniques, sophisticated preprocessing methods, and adaptive strategies offers a comprehensive framework for addressing this complexity. Tailored time step configurations, based on building type and temporal characteristics, are critical for ensuring accurate predictions while maintaining energy efficiency. These insights pave the way for further research and practical advancements in the field.

Methodology for Time Step Optimization

The selection of an appropriate time step is fundamental to the training efficiency and performance of Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) models. This parameter directly impacts how data is represented and processed within these architectures, influencing computational dynamics, gradient flow, and hyperparameter tuning (Liu et al., 2020). Consequently, the optimization of time step values plays a pivotal role in ensuring both model accuracy and efficiency (Özkurt et al., 2020).

A longer time step incorporates a broader historical context, enabling the model to capture long-term dependencies in the data. This extended view can enhance the ability of the model to identify patterns spanning multiple temporal cycles, such as seasonal variations or operational trends (Arends et al., 2020). However, the inclusion of larger volumes of data can also increase noise levels, complicating the training process and raising the risk of overfitting (Li et al., 2020). Furthermore, longer sequences demand more computational resources, leading to slower training and potential hardware limitations (Wu et al., 2020). These challenges underline the need for carefully balancing the benefits of comprehensive temporal data with the practical constraints of model training.

In contrast, shorter time steps allow the model to focus on immediate temporal patterns, leading to faster convergence during training. By reducing the volume of data processed at each step, shorter sequences minimize noise and computational load, enabling the model to prioritize short-term dependencies effectively (Wang et al., 2020). This streamlined approach not only reduces training time but also supports stronger gradient flow, which is essential for efficient learning in LSTM and GRU architectures. Maintaining a manageable sequence length mitigates the vanishing gradient problem, facilitating effective weight updates and accelerating convergence (Başaran et al., 2020).

Time step selection also significantly impacts the process of hyperparameter tuning. An optimal time step that aligns with the temporal characteristics of the data can reduce the need for extensive tuning of other parameters, such as learning rate or hidden layer size (Kim et al., 2022). This alignment ensures that the model can learn efficiently without the need for iterative adjustments, improving both training efficiency and predictive performance (Xiao et al., 2020).

In sum, time step optimization represents a critical aspect of designing effective LSTM and GRU models for energy consumption prediction. By calibrating this parameter to reflect the characteristics of the dataset, it is possible to strike a balance between capturing relevant temporal dependencies and maintaining computational efficiency. This methodology supports the development of robust models capable of delivering accurate predictions in energy forecasting tasks, particularly within the context of public buildings (Chou & Truong, 2021).

Findings and Discussions

The results highlight the critical role of context-specific time step strategies in energy forecasting applications, particularly for improving energy efficiency in public buildings. Dynamic approaches that adapt to operational characteristics consistently outperform static methods, underscoring the importance of flexibility and data-driven decision-making in achieving superior prediction accuracy. Furthermore, the integration of domain-specific knowledge enhances the effectiveness of time step optimization, ensuring alignment with the unique requirements of different building types and operational settings.

Optimal Time Step Values

Optimal time step selection is particularly vital when employing Convolutional Neural Networks (CNNs) for energy consumption forecasting. The suitability of a specific time step value depends largely on the granularity of the data and the intended forecasting objectives. A detailed evaluation of time step resolutions offers practical insights into achieving optimal model performance.

For high-resolution datasets, such as hourly energy consumption records, short time steps are essential for capturing rapid fluctuations and immediate patterns in energy use. Time steps of one hour often yield the best results in these cases, as they allow CNNs to detect fine-grained temporal dependencies. In scenarios involving even finer data resolutions, such as smart meter readings with 15-minute or 30-minute intervals, shorter time steps enhance the model's ability to identify transient patterns that might otherwise go unnoticed.

For datasets emphasizing broader temporal patterns, mid-range time steps are more appropriate. A daily time step effectively captures daily consumption cycles and seasonal variations without overwhelming the model with excessive detail. For applications where weekly trends, such as weekday versus weekend consumption differences, are significant, weekly time steps enable the model to generalize across larger temporal spans while maintaining accuracy.

When seasonal effects and long-term trends are of interest, combining multiple time steps can be advantageous. For instance, using daily time steps alongside aggregated weekly or monthly intervals enables the model to understand both short-term variability and long-term patterns, providing a more comprehensive view of energy consumption dynamics.

Finally, experimentation and validation are indispensable for determining the most effective time step for a given dataset. Testing various time steps and evaluating model performance using metrics such as Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Squared Error (RMSE) ensures robust conclusions. Cross-validation methods further aid in assessing the generalizability of different time step configurations across unseen data, offering a reliable framework for optimal time step selection.

The findings emphasize that tailoring time step values to the specific characteristics of the dataset and forecasting goals is essential for enhancing prediction accuracy and computational efficiency. By combining domain knowledge with dynamic and experimental approaches, energy forecasting models can achieve significant improvements in their practical applicability and overall performance.

Challenges in Time Step Selection

Selecting an appropriate time step in time series analysis involves navigating several challenges, particularly when dealing with large time step values. While larger time steps may simplify certain aspects of modeling, they introduce substantial limitations that can adversely affect model performance and predictive accuracy (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). This section explores these challenges in the context of energy consumption forecasting, building upon the findings and discussions presented earlier.

The primary limitation of large time step values lies in the loss of temporal resolution. By aggregating data over extended periods, critical short-term fluctuations and trends may be obscured (Box et al., 2015). This reduction in detail diminishes the model's ability to capture rapid changes, which are often vital for accurate predictions in energy consumption patterns. Additionally, the smoothing effect of data aggregation can mask significant variations or anomalies, further limiting the model's capacity to learn from critical events (Makridakis et al., 2020). These shortcomings are particularly evident in applications requiring high temporal granularity, such as short-term load forecasting or real-time energy management (Zhang et al., 1998).

Large time steps also increase the complexity of the learning process, posing risks such as overfitting and difficulties in capturing dependencies. For instance, models like LSTM and GRU, which are specifically designed to identify long-term dependencies, may struggle to connect inputs with outputs when temporal granularity is overly coarse (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). This disconnect reduces the effectiveness of these models in leveraging their full potential. Overfitting becomes another concern, as excessive aggregation can expose the model to irrelevant noise, leading it to learn spurious patterns rather than meaningful relationships (Makridakis et al., 2020).

From a computational perspective, larger time steps can result in inefficient training dynamics. Extended input sequences demand higher computational resources, leading to longer training times without proportional gains in performance (Box et al., 2015). Moreover, recurrent neural networks (RNNs) are particularly susceptible to gradient-related issues, such as vanishing or exploding gradients, when handling large sequences (Zhang et al., 1998). These challenges complicate the training process, potentially leading to suboptimal convergence or even training failures.

Another critical drawback of using large time steps is the difficulty in anomaly detection. Significant anomalies or outliers, which may provide key insights into underlying data patterns, are often averaged out in aggregated data (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). This limitation is particularly problematic in applications where timely identification of anomalies is essential, such as fault detection or equipment monitoring in energy systems (Makridakis et al., 2020). Furthermore, the use of large time steps can delay the recognition of emerging trends or shifts in behavior, impeding real-time decision-making and reducing the responsiveness of the forecasting system (Zhang et al., 1998).

Ultimately, these limitations culminate in suboptimal model performance. The inability to capture short-term trends reduces predictive accuracy and weakens the model's alignment with real-world phenomena, such as seasonal or cyclical behaviors (Box et al., 2015). For energy consumption forecasting, where precision and

adaptability are paramount, large time steps may fail to adequately represent the dynamic nature of energy usage patterns, leading to less effective predictions (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

Implications for Energy Management

The selection of time-step resolutions plays a crucial role in the application of machine learning algorithms for energy consumption prediction. The choice of temporal granularity directly affects both prediction accuracy and model complexity, making it a significant consideration in energy management strategies. Research highlights that the predictive outcomes of machine learning models vary with time-step resolutions, with certain algorithms performing optimally at specific intervals (Kim et al., 2022; Chou & Truong, 2021). This section explores the implications of time-step resolutions for energy management, focusing on prediction accuracy, algorithm performance, and practical trade-offs.

Temporal Resolution and Prediction Accuracy

The granularity of temporal data significantly influences the accuracy of energy consumption predictions. Studies indicate that lower temporal resolutions, such as hourly intervals, often achieve higher prediction accuracy than higher resolutions like 10-minute intervals. This improvement is attributed to the reduced noise and complexity in aggregated data, which allows models to focus on meaningful trends and dependencies without being overwhelmed by transient fluctuations (Kim et al., 2022). However, in contexts where fine-grained data is necessary, higher resolutions may provide valuable insights, albeit at the cost of increased computational complexity and potential overfitting risks.

Multi-output models, which predict energy consumption across multiple time scales (e.g., daily, monthly, and annual), offer a versatile approach to managing temporal variability. These models maintain consistent correlation structures across resolutions, making them particularly effective for applications requiring uncertainty and sensitivity analyses (Li et al., 2022). By leveraging such models, energy managers can gain a comprehensive understanding of consumption patterns at various time scales, enhancing decision-making processes (AlShafeey & Csaki, 2023).

Algorithm Performance

The performance of machine learning algorithms also varies depending on the selected time-step resolution. Simpler algorithms, such as multiple linear regression, often perform well with lower-resolution data due to their reduced sensitivity to noise and complexity. Conversely, advanced algorithms like random forest or neural networks may struggle with high-resolution data, which can complicate feature extraction and model calibration (Kim et al., 2022; Estrada et al., 2022; Mohammadizazi & Bilec, 2020). These findings highlight the importance of aligning algorithm selection with the temporal characteristics of the data to optimize predictive performance.

Calibration challenges further underscore the trade-offs associated with different time-step resolutions. In urban building energy modeling, for instance, while high-resolution data provided consistent energy consumption forecasts, the accuracy of calibration varied significantly across resolutions (Faure et al., 2024). These discrepancies suggest that higher temporal resolutions, while detailed, may not always align with the practical requirements of model implementation, particularly in large-scale applications.

Balancing Detail and Accuracy

The trade-off between temporal detail and predictive accuracy is a recurring theme in energy management. Higher temporal resolutions offer the advantage of granular insights into consumption patterns, enabling precise interventions and real-time monitoring. However, the accompanying increase in data noise and computational demands can hinder the overall effectiveness of predictive models. On the other hand, lower resolutions simplify data representation, reduce computational complexity, and enhance the robustness of predictions, making them ideal for long-term energy planning and aggregated analyses (Chou & Truong, 2021; Bahij et al., 2021).

The choice of time-step resolution has far-reaching implications for the application of machine learning algorithms in energy management. While higher resolutions may be suited for detailed, short-term interventions, lower resolutions provide a balanced approach that supports accurate and efficient forecasting. By understanding the strengths and limitations of different temporal resolutions, energy managers can tailor their strategies to specific objectives, ensuring both operational efficiency and predictive reliability. These insights reinforce the importance of integrating temporal resolution considerations into the broader framework of energy consumption modeling and management.

Conclusion and Future Directions

The selection of an appropriate time step, often referred to as window size, emerges as a crucial factor in the performance of machine learning and deep learning algorithms for energy consumption prediction in public buildings. This study has highlighted the multifaceted role of time step configurations in shaping model accuracy, computational efficiency, and adaptability. By systematically analyzing the literature and synthesizing findings, the research underscores the necessity of context-specific, dynamic approaches to time step selection, as opposed to static, one-size-fits-all methods.

The findings reveal that the choice of time step significantly impacts temporal resolution, feature representation, and learning dynamics within predictive models. Shorter time steps excel in capturing high-resolution, transient patterns, making them suitable for applications requiring immediate insights, such as real-time energy monitoring. Conversely, longer time steps are effective for understanding broader trends and cyclic behaviors, aligning well with long-term energy planning and strategy formulation. However, the challenges associated with larger time steps—such as the loss of temporal resolution, increased training complexity, and difficulties in anomaly detection—highlight the need for careful calibration to ensure a balance between computational efficiency and predictive accuracy.

Moreover, this research identifies the potential of hybrid modeling techniques and advanced preprocessing strategies in enhancing time step adaptability. The integration of domain-specific knowledge, combined with systematic experimentation and validation, can further optimize the alignment between time step configurations and dataset characteristics. For instance, using dynamic time step adjustments based on seasonal variability or operational patterns can significantly improve forecasting outcomes.

Future Research Directions

Building upon these findings, future studies should explore several key areas to advance the understanding and application of time step optimization in energy management:

1. **Dynamic and Context-Aware Time Step Adjustment:** Future research should focus on developing algorithms capable of dynamically adjusting time step values based on the evolving characteristics of energy consumption patterns. Such adaptive approaches can bridge the gap between short-term responsiveness and long-term accuracy.
2. **Comparative Analyses Across Algorithms and Resolutions:** While this study provides insights into specific algorithms like LSTM, CNN, and GRU, further comparative studies across a broader range of machine learning and statistical methods are needed. These comparisons should also incorporate varying temporal resolutions to identify optimal configurations for diverse energy management scenarios.
3. **Integration of Hybrid and Ensemble Models:** Hybrid approaches that combine the strengths of multiple models, such as ensemble learning or probabilistic frameworks, offer a promising avenue for future exploration. These methods could enhance the robustness of predictions by leveraging the complementary capabilities of different models.
4. **Application-Specific Time Step Optimization:** Investigating time step selection for specific applications, such as HVAC system control, occupancy-based energy prediction, or renewable energy integration in buildings, could yield tailored insights. These studies should emphasize practical considerations, such as hardware constraints and operational timelines.

5. Real-World Implementation and Scalability: Future research should extend beyond theoretical frameworks to assess the scalability and real-world applicability of optimized time step configurations. Collaboration with industry stakeholders could facilitate the deployment of these methods in operational energy management systems.

In conclusion, the optimization of time step values in time series analysis represents a dynamic and evolving field with significant implications for energy consumption prediction. By addressing the challenges and leveraging the opportunities outlined in this study, researchers and practitioners can contribute to the development of more effective, adaptable, and sustainable energy management frameworks. These advancements will not only enhance predictive accuracy but also support the broader goals of energy efficiency and sustainability in public buildings and beyond.

Thanks and Information Note

This study was supported by the Ankara University Scientific Research Project under the framework of a Doctoral Thesis Project and the TÜBİTAK 2211-C Priority Areas Doctoral Scholarship Program. The authors extend their sincere gratitude to Ankara University and TÜBİTAK for their valuable support and contributions, which have been instrumental in the completion of this research.

References

- Abbasimehr, H., Paki, R., & Bahrini, A. (2023). A novel XGBoost-based featurization approach to forecast renewable energy consumption with deep learning models. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, 100863.
- Abdelaziz, A., Santos, V., Dias, M. S., & Mahmoud, A. N. (2024). A hybrid model of self-organizing map and deep learning with genetic algorithm for managing energy consumption in public buildings. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140040.
- AlShafeey, M., & Csaki, C. (2023). The impact of input data resolution on neural network forecasting models for wind and photovoltaic energy generation using time series data. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(3), e14039.
- Arends, E. L., Watson, S. J., Basu, S., & Cheneka, B. (2020, September). Probabilistic wind power forecasting combining deep learning architectures. In *2020 17th International Conference on the European Energy Market (EEM)* (pp. 1-6). IEEE.
- Bahij, M., Labbadi, M., Cherkaoui, M., Chatri, C., & Lakrit, S. (2021, January). A comparison study of machine learning methods for energy consumption forecasting in industry. In *International Conference on Digital Technologies and Applications* (pp. 165-175). Cham: Springer International Publishing.
- Barzola-Monteses, J., Yanez-Pazmino, W., Flores-Moran, E., & Parrales-Bravo, F. (2022, December). Comparisons of deep learning models to predict energy consumption of an educational building. In *2022 IEEE International Conference on Machine Learning and Applied Network Technologies (ICMLANT)* (pp. 1-6). IEEE.
- Başaran, K., Bozyigit, F., Siano, P., Yildirim Taser, P., & Kılınc, D. (2020). Systematic literature review of photovoltaic output power forecasting. *IET Renewable Power Generation*.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- Chou, J. S., & Truong, D. N. (2021). Multistep energy consumption forecasting by metaheuristic optimization of time-series analysis and machine learning. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 4581-4612.
- Estrada, R., Asanza, V., Torres, D., Valeriano, I., & Alvarado, D. (2022, October). Comparison of Traditional ML Algorithms for Energy Consumption Prediction Models. In *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)* (pp. 232-237). IEEE.
- Faure, X., Lebrun, R., & Pasichnyi, O. (2024). Impact of time resolution on estimation of energy savings using a copula-based calibration in UBEM. *Energy and Buildings*, 311, 114134.

- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice* (2nd ed.). OTexts. Retrieved from <https://otexts.com/fpp2/>
- Jiang, S., & Hui, H. (2024, September). Energy Consumption Probabilistic Prediction of HVAC Systems in Public Buildings Based on Deep Learning Fusion Model. In *2024 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)* (pp. 71-76). IEEE.
- Kim, J., Kwak, Y., Mun, S. H., & Huh, J. H. (2022). Electric energy consumption predictions for residential buildings: Impact of data-driven model and temporal resolution on prediction accuracy. *Journal of Building Engineering*, *62*, 105361.
- Levasseur, G., & Bersini, H. (2022, July). Time Series Representation for Real-World Applications of Deep Neural Networks. In *2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-8). IEEE.
- Li, C., Zhang, Y., Zhao, G., & Ren, Y. (2020). Hourly solar irradiance prediction using deep BiLSTM network. *Earth Science Informatics*, *14*, 299-309.
- Li, G., Tian, W., Zhang, H., & Chen, B. (2022). Building energy models at different time scales based on multi-output machine learning. *Buildings*, *12*(12), 2109.
- Liu, B., Zhao, S., Yu, X., Zhang, L., & Wang, Q. (2020). A novel deep learning approach for wind power forecasting based on WD-LSTM model. *Energies*, *13*(18), 4964.
- Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2020). M4 Competition: Results, conclusions and way forward. *International Journal of Forecasting*, *36*(1), 55–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.04.014>
- Mohammadizazi, R., & Bilec, M. M. (2020). Application of machine learning for predicting building energy use at different temporal and spatial resolution under climate change in USA. *Buildings*, *10*(8), 139.
- Özkurt, N., Öztura, H. Ş., & Güzeliş, C. (2020, November). 24-hour electricity consumption forecasting for day ahead market with long short term memory deep learning model. In *2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 173-177). IEEE.
- Tomar, D., Tomar, P., Bhardwaj, A., & Sinha, G. R. (2022). Deep learning neural network prediction system enhanced with best window size in sliding window algorithm for predicting domestic power consumption in a residential building. *Computational Intelligence and Neuroscience*, *2022*(1), 7216959.
- Wang, J., Zhou, J., & Meng, F. (2020). Hotspot Analysis of Short-term Load Forecasting Based on Knowledge Graph. In *2020 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)* (pp. 246-250). IEEE.
- Wu, G., Chai, T., & Wu, Z. (2020). Abnormal Condition Prediction via Adaptive Deep Learning for Fused Magnesium Furnaces.
- Xiao, Y., Li, K., Hu, Y., Xiao, J., & Wang, S. (2020). Combining STRIPAT model and gated recurrent unit for forecasting nature gas consumption of China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *25*, 1325-1343.
- Zhang, G., Patuwo, B. E., & Hu, M. Y. (1998). Forecasting with artificial neural networks: A review. *International Journal of Forecasting*, *14*(1), 35–62. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(97\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(97)00044-7)

**SUSTAINABLE MOSQUES: DESIGN ASPECTS AND GOOD PRACTICE EXAMPLES****Serkan YILDIZ**

Dr., Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Real Estate Development and Management,
Ankara-Türkiye ORCID: 0000-0002-6020-1993

Sinan GÜNEŞ

Lecturer, Ankara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Real Estate Development and Management,
Ankara-Türkiye (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-7753-8333

Abstract

Mosques, as the central structures of Islamic culture, offer an important area of investigation for different dimensions of sustainability with their functional requirements, large volumes and architectural features. Although there are 3.6 million mosques worldwide and approximately 90,000 mosques in Türkiye, limited studies have been conducted on the design and operation of these buildings using sustainability principles. This research aims to identify design criteria to ensure mosques' environmental, economic and social sustainability.

Within the scope of the research, a comprehensive literature review was conducted, and good practice examples from Türkiye and the world were analyzed. Based on the findings, 28 sustainable design elements were identified, including energy efficiency, water saving, conservation of natural resources, use of durable and recyclable materials, user comfort and social integration.

The study provides recommendations for integrating sustainable architectural approaches into mosque design to conserve natural resources, reduce energy consumption, and increase social interaction and comfort. It also aims to provide a basis for further research to develop a guiding model for sustainable mosque design. In this way, mosques can be positioned as inspiring buildings that contribute to environmental and social sustainability.

Keywords: Sustainable mosque design, design aspects, green building practices, energy efficiency, conservation of natural resources

Introduction

Mosques, derived from the Arabic term masjid, meaning “place of prostration,” are indispensable structures for Muslims (Aziz et al., 2022). Like other places of worship, mosques are characterized by a unique set of functional and operational requirements (Azmi & Ibrahim, 2020). Across the globe, there are numerous historically significant mosques, including sacred sites such as Masjid al-Haram, Masjid al-Nabawi, and Masjid al-Aqsa. In addition to these historic landmarks, the growing global and Muslim populations have necessitated the construction of many new mosques over the past century, including some with huge capacities. There are approximately 3.6 million mosques worldwide (TRTWorld, 2021), with 89,817 located in Türkiye (Milliyet, 2024). Notable examples of recently constructed large mosques include the 800,000-capacity Great Mosque in Karachi, Pakistan, completed in 2023; the 230,000-capacity Astana Great Mosque in Kazakhstan, built-in 2002; and the 130,000-capacity Egypt Islamic Cultural Center, completed in Cairo in 2023. In Türkiye, prominent large mosques include the Istanbul Çamlıca Mosque, completed in 2019 with a capacity of 63,000 worshippers; the Sabancı Central Mosque in Adana, inaugurated in 1998 with a capacity of 28,500; and the Kocatepe Mosque in Ankara, completed in 1987 with a capacity of 24,000 (Wikipedia, 2024).

Mosques have always been central to Islamic culture, requiring support through high-quality buildings or architectural works (Harsritanto, 2021). Muslims gather in mosques five times daily for congregational prayers, with occupancy durations averaging 30 to 45 minutes per prayer session. Peak occupancy occurs during Friday prayers, which are obligatory in mosques, whereas daily prayers typically experience significantly lower attendance (Azmi & Kandar, 2019). Consequently, mosques are considered external load-dominated buildings characterized by intermittent and variable occupancy schedules (Azmi et al., 2021). This

unique utilization pattern, combined with their architectural grandeur, can sometimes render mosques susceptible to becoming "white elephant" projects—expensive structures to maintain and whose utility is disproportionate to their costs (Oxford, 2015). To accommodate large congregations, mosques require expansive, unobstructed prayer halls with considerable volume. These spatial and operational characteristics significantly influence the thermal comfort of users, the thermal performance of mosque buildings, and their overall energy efficiency (Azmi & Ibrahim, 2020).

Most mosques rely on mechanical heating or cooling systems to ensure thermal comfort during prayer times. However, due to their unique spatial features and irregular occupancy patterns, these systems are often energy-intensive, adversely affecting the building's overall energy efficiency (Azmi et al., 2021). Studies focusing on mosques' energy use patterns have demonstrated excessive energy consumption (Abdou et al., 2005a; Abdou et al., 2005b).

While energy inefficiency is the most evident sustainability challenge for mosques, their limited usage—primarily during Friday prayers, Ramadan, and religious holidays—raises concerns about their utility relative to their costs. According to Siddiqui (2019), addressing these challenges requires not only reducing electricity and water bills but also enhancing metrics such as Return on Inspiration over Investment (ROI), Return on Environment over Equity (ROE), and Return on Community over Capital (ROC).

Considering that the sacred texts of all religions emphasize stewardship responsibilities toward the planet and future generations, mosques are also tasked with setting a positive example for society as tangible representations of the Islamic faith. However, apart from a few exemplary cases, sustainability considerations have largely been neglected in mosque design and construction. Addressing this shortfall is possible by promoting the adoption of sustainable architecture in mosque construction. Sustainable architecture, aligned with the principles of sustainable development, can act as a catalyst for creating technologically advanced, environmentally friendly mosques that offer a comfortable environment (Aziz et al., 2022).

This study aims to identify the criteria for designing mosques based on environmental, economic, and social sustainability principles. To achieve this, a comprehensive literature review was conducted to determine the focal points of existing research. Additionally, recognizing the practical value of real-world applications, exemplary sustainable mosque projects from around the world and Türkiye were examined. Based on these analyses, 30 design elements deemed essential for sustainable mosque design were identified.

Literature Review

The literature on mosque sustainability highlights that conserving natural resources, particularly energy, is the most critical issue addressed. Buildings are responsible for approximately 40% of global energy consumption and carbon dioxide emissions, making energy conservation a fundamental element of building performance evaluation (Motawa & Carter, 2013). Mosques are reported to have higher energy consumption per unit area compared to other buildings and their users in the same region (Azmi et al., 2021; Abdallah, 2023), which has led many researchers to focus specifically on energy conservation in mosques (El Foulh et al., 2020; Al Masri et al., 2023; Ahmad et al., 2024; Mohamed et al., 2021; Alharbi & Zin, 2020; Alhamoud, 2009; Budaiwi et al., 2013; Budaiwi & Abdou, 2013). Heating and cooling systems installed to ensure thermal comfort during prayer times in mosques account for up to 80% of their total energy consumption (Azmi et al., 2021; Alhamoud, 2005; Al Masri et al., 2023). Despite this high energy use, many mosques fail to achieve the necessary comfort temperature levels during prayers, often too cold or hot (Alhamoud et al., 2009). Studies indicate that mosques' main contributors to energy inefficiency include inappropriate design, unclear design alternatives, and poorly defined design parameters (Alharbi & Zin, 2020; El Foulh et al., 2020). These issues lead to energy waste attributed to poor thermal performance and operational inefficiencies or unsuitable management strategies (Budaiwi et al., 2013; Budaiwi & Abdou, 2013).

Improving a building's thermal performance largely depends on façade design, which is influenced by factors such as climate type, solar orientation, and macro- and microclimatic conditions of the region (Azmi, 2020). Studies suggest that, alongside achieving good thermal performance, utilizing natural energy sources, particularly solar energy, significantly contributes to energy conservation in mosques (Almasri et al., 2023; Ahmad et al., 2024; Abd Rahman et al., 2024).

Water conservation is equally critical given the global threats to water resources due to climate change and global warming. A significant portion of water use in mosques is dedicated to ablution. Prophet Muhammad

instructed his companions to use water sparingly for ablution, even if standing by a flowing river (Siddiqui, 2019). A study by Hurayra et al. (2024) conducted at St. Mary's Mosque in Sydney, Australia, demonstrated that reducing water usage during ablution and utilizing harvested rainwater could save substantial amounts of potable water. Similar studies on water conservation in mosques have also been documented (Harsritanto et al., 2021; Al-Alawi et al., 2021; Al Ali et al., 2023).

Due to their large volumes, mosques are high consumers of construction materials. The production of building materials depletes significant natural resources and causes substantial environmental harm. Studies in the literature emphasize that sustainable mosque construction requires materials that are durable, long-lasting, low-maintenance, locally sourced, low-energy in production, minimally harmful to the environment, and recyclable or reusable (Perdana, 2024; Azmi & Kandar, 2019; Khashaba, 2019; Sobri et al., 2021; Siraj et al., 2023). Siraj et al. (2023) extensively examined the relationship between material properties, thermal comfort, and functionality in sustainable mosque design, emphasizing the importance of durability and minimal maintenance needs.

Architectural features are another aspect frequently highlighted in the literature on mosque sustainability. Architecture is a tangible and holistic cultural expression that fosters identity and belonging for individuals and the environment. Kavas and Şekerci (2019) argued that mosques can engage users' sensory awareness and create existential meanings through sensory and bodily participation in space by moving beyond formal repetition. Mosque architecture should inspire and serve as an example to society, drawing from a glorious past, reflecting humility and submission, providing functional access, and incorporating aesthetic appeal (Siddiqui, 2019). Jasim and Al-Bazzaz (2023) delved into the levels of aesthetic representations, which include sensory perception of simple forms, beauty that meets psychological needs, beauty that produces positive moral values, and higher spiritual levels perceived through intellect and metaphysical thought. Jamail et al. (2023) identified scale, mass, permeability, visibility, regionalism, and iconic imagery as important mosque design criteria.

The literature also highlights the importance of "auditory landscapes" as a characteristic of mosques. Bouziri et al. (2024) noted that the regular call to prayer is a significant part of the auditory landscape, though overlapping calls from multiple mosques create a complex panoramic soundscape. Aydın et al. (2017) identified the calls to prayer, sermons, and recitation of mawlid as significant sounds ingrained in the urban memory of the Great Mosque of Diyarbakır. Additionally, the acoustic quality of mosques is considered a key factor in their sustainability (Syamsiyah et al., 2022).

Lastly, the social role of mosques as part of the built environment is widely discussed. With their diverse architectural forms and functions, mosques contribute significantly to social welfare (Mohammadi & Oliveira, 2015; Wan Ali et al., 2020; Jamail et al., 2023; Jaffar et al., 2020). For example, a study on the bazaars of Tabriz highlighted how mosque spaces are used for public meetings where shopkeepers resolve issues and support each other, illustrating the integration of social and cultural components with architecture (Mohammadi & Oliveira, 2015). Wan Ali et al. (2020) emphasized that the design and integration of mosque public spaces are vital for fostering community spiritual development, while Jamail et al. (2023) highlighted the importance of social inclusion in mosque design. Another study identified mosques as the most preferred public spaces for their accessibility, comfort, cleanliness, and social aspects (Jaffar et al., 2020). High-quality spatial planning can promote human relationships, socialization, and recreational activities, creating accessible, multifunctional, and vibrant public spaces for all (Grigorovschi & Gheorghiu, 2015). Research suggests that well-designed landscaping around mosques can provide users with attractive spaces, establish a sense of place and belonging, integrate the visual effects of nature and the built environment, and reduce noise and visual pollution (Kent Design, 2000; Wan Ali et al., 2020; Siraj et al., 2023; Ahmad et al., 2016; Khamis & Tantawy, 2021).

Good Practice Examples

Globally, 72,276 buildings are certified under the LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) green building rating system, the most widely used certification system worldwide. However, among these, only two are mosques: Al-Masjid-al-Badri Mosque in Chicago, USA, and Hatta Mosque in Dubai, UAE (GBIG, 2024). When searching online for terms such as "eco-friendly mosque," "sustainable mosque," or "green mosque," a limited number of examples and efforts by governments and organizations can be identified

compared to the total number of mosques worldwide. These singular examples and various initiatives can provide valuable insights for establishing criteria that serve sustainable mosque design strategies.

The earliest mosques in Islamic history, such as the Quba Mosque and the original structure of the Prophet's Mosque (Masjid al-Nabawi) in Medina, constructed shortly after the Prophet Muhammad migrates to Medina, exemplify sustainable architecture. Built with mud bricks for walls, palm trunks as columns, and palm leaves and mud for the roof, these mosques lacked any decorative elements inside or outside the building, embodying the essence of sustainability (Omer, 2013).

The Great Mosque of Djenné in Mali, often called the "Taj Mahal of Africa," represents another example of sustainable design. The mosque is a hallmark of Maghreb architecture, constructed with high-quality mud bricks made from traditional Djenné soil mixed with oil. Wooden beams embedded into the mud walls serve as scaffolding for repairs during the rainy season. Beyond these functional wooden elements, the mosque features no decorative details. It is supported by 99 columns, each named after one of the names of Allah mentioned in the Qur'an. To ventilate the structure, 114 "ladis" (terracotta ventilation shafts) are used, symbolizing the number of chapters (surahs) in the Qur'an (AA, 2014).

These historical and modern examples highlight how sustainable mosque design can draw inspiration from integrating local materials, functional simplicity, and cultural symbolism, emphasizing sustainability principles long before they became formalized concepts.



Figure 1. (a) The first masjid model in Medina (Omer, 2013), (b) Djenne Mosque (Flickr, 2016)

The Ta'la Al-Ali Mosque, located in the Khalda district of Amman, Jordan, features a roof with solar panels designed to reduce the building's carbon emissions to near zero. This mosque is part of a broader initiative to utilize Jordan's abundant sunlight and transition to renewable energy sources to support Amman's goal of becoming a carbon-neutral city by 2050 (World Economic Forum, 2018).

Indonesia, home to the world's largest Muslim population and over 800,000 mosques is actively pursuing a plan to make thousands of these mosques more environmentally friendly. In this context, the Istiqlal Mosque, Southeast Asia's largest mosque with an area of 98,247 m² and a capacity of 200,000 worshippers, became the first place of worship to achieve final certification under the IFC's EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) green building program. The mosque is projected to save 23% on energy, 36% on water, and 81% on embodied energy in materials (IFC, 2022).

These efforts demonstrate a growing commitment to integrating renewable energy and sustainable practices in mosque construction and renovation, aligning with global objectives to combat climate change and promote environmental stewardship.



Figure 2. (a) Ta'la Al-Ali Mosque (TAQAT, 2021), (b) Istiqlal Mosque (Tarigan E. & Fam, M. 2023)

Dubai Electricity and Water Authority (DEWA) inaugurated the world's first green mosque certified under the US Green Building Council's (USGBC) Leadership in Energy and Environmental Design (LEED v4) with a Platinum rating, achieving 83 points. Located in Dubai's Hatta neighborhood, the mosque spans 1,050 square meters and has a capacity for over 600 worshippers. It features a 25-meter-high minaret, a green charging station, parking for cars and motorbikes, and other facilities. The mosque reportedly saves approximately 55% water and 26.5% energy. Solar photovoltaic panels are installed alongside a water treatment unit, allowing water to be reused for cleaning and irrigation. DEWA has also ensured optimal indoor air quality using a high-efficiency air purification system, adhering to the highest international standards to maintain a sustainable and healthy environment within the mosque (Times of India, 2021).

Europe's first eco-friendly mosque, the Cambridge Mosque, was inaugurated in 2019. Officials say, "The mosque is committed to sustainability: its advanced eco-design ensures a near-zero carbon footprint, honors natural forms with sustainable timber vaults, and reminds visitors of our connection to nature." The building is naturally lit year-round by large skylights supported by low-energy LED bulbs. Photovoltaic cells on the roof generate renewable energy from sunlight. The mosque is also well-insulated and naturally ventilated. At the same time, heating and cooling are provided by locally generated energy through high-efficiency heat pumps located in the basement, which produce more energy than they consume. Greywater and rainwater are harvested for toilet flushing and landscape irrigation. The design also prioritizes green transportation, with ample bicycle parking and pedestrian-friendly access, while an underground car park preserves space for the mosque and gardens. The mosque's façade, crafted with traditional Cambridge Gault brickwork interwoven with Qur'anic inscriptions, complements neighboring structures, while the gardens and café make it a welcoming space for all community members (CCM, 2024).



Figure 3. (a) Hatta Mosque (DEWA, 2021), (b) Cambridge Mosque (CCM, 2024)

Morocco plans to generate 52% of its electricity from renewable energy by 2030. As part of this initiative, over 100 mosques have been equipped with energy-efficient technologies, reducing energy costs by more than 40%. An energy-saving mosque has been constructed in Tadmamet, 40 kilometers from Marrakech. Photovoltaic solar panels installed on the mosque's roof provide energy for the mosque and the imam's residence and streetlights (Ceurstemont, 2017; GIZ, 2023).

The UK-based Islamic Foundation for Ecology and Environmental Sciences (IFEES) advocates that mosques can play significant roles in environmental conservation. The foundation supports projects in various mosques, such as gardening, beekeeping, farm visits, nature walks, tree planting, solar panels, and water and waste recycling. It argues that these activities reduce operational costs, help communities work together and get to know each other better, and, most importantly, foster an understanding of how to approach nature. IFEES supports projects such as reusing relatively clean ablution water for landscape irrigation in the United Arab Emirates, planting 5,000 trees at each of Ethiopia's 40,000 mosques within three years, and planting 2.5 million fruit and agroforestry trees in Uganda with mosques as central hubs (IFEES, 2024).

Officials at Palmers Green Mosque in North London have transformed the mosque's garden into a space for growing vegetables and flowers for the congregation. They aim to save on transportation and energy while providing fresh, seasonal produce (The Eco Muslim, 2023).



Figure 4. (a) Tadmamet Mosque (Ceurstemont, 2017), (b) Palmers Green Mosque (The Eco Muslim, 2023)

The Levenshulme 'Al-Markaz Al-Najmi' Mosque in Manchester, UK, is an exemplary eco-mosque. It demonstrates its commitment to conserving natural resources through solar panels, underfloor heating, infrared-sensitive taps to minimize water wastage, energy-efficient lighting, sustainable timber, reclaimed stone, and an energy-saving glass façade that allows natural light to penetrate the interior. Architecturally, one side of the mosque reflects modern Manchester aesthetics with glass and zinc, while the qibla direction incorporates traditional materials like stone, blending two distinct architectural styles. These features have resulted in two significant social outcomes: younger members of the congregation particularly embrace the mosque's green aspects, seeing them as evidence that their faith acknowledges modern challenges, and residents' standard concerns about "another mosque?" were alleviated, garnering their support (Irving, 2010).

In Türkiye, many mosques constructed in the 20th century have been criticized for being unoriginal and of low quality. They are often characterized as arbitrary repetitions of historical forms with mechanical functionality limited to shielding users from environmental elements (Eyüpgiller, 2006; Güzer, 2009; Kuban, 2013). However, some exceptional examples that break away from this pattern do exist.

One example is the Etimesgut Mosque, designed and managed by Cengiz Bektaş, built-in 1967 within a military compound. Instead of a dome, the mosque features a reinforced concrete waffle slab roof, reflecting the architectural belief that structural elements should adhere to contemporary tectonic principles rather than be bound by traditional technical requirements. Although the mosque was initially planned to serve 1,000 people, the architect convinced stakeholders to adopt a more modest capacity of 300, considering needs and available resources (Bektaş, 2008). Bektaş also emphasized the importance of creating a spiritual atmosphere through sensory engagement with space. Architectural elements were designed to avoid isolating users from the natural world, instead integrating variations in daylight at different prayer times into the interior space. Through contrasts of light and shadow, the design aimed to evoke otherworldly emotions (Kavas & Şekerci, 2019).

Another distinguished example of originality is the Turkish Grand National Assembly (TBMM) Mosque, constructed in 1989 in Ankara. The mosque challenges conventional architectural forms, featuring a fully transparent qibla wall and a sunken garden with a landscaped design that creates a strong visual connection between the interior and exterior. Water, symbolically linked to the image of paradise, is incorporated visually

and audibly into the garden design (Tunalı, 2012). The mosque's stepped concrete roof allows natural light to filter through openings, enriching the interior experience with varying light intensities (Kavas & Şekerci, 2019).

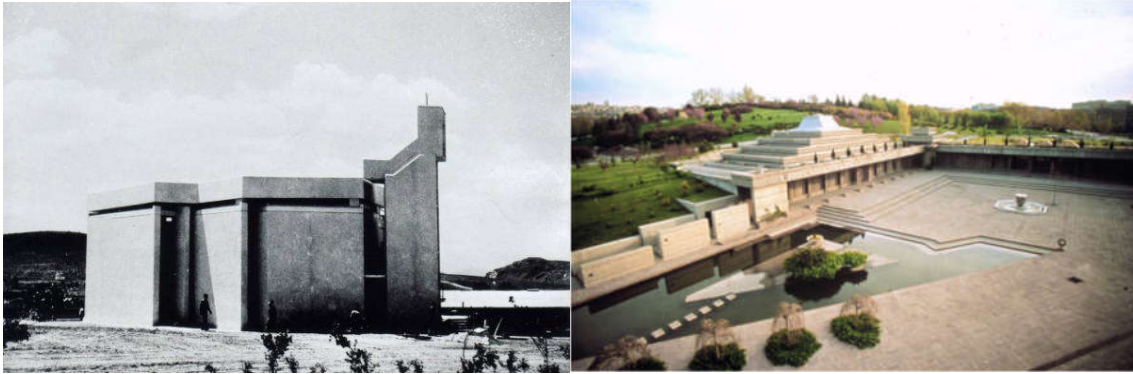


Figure 5. (a) Etimesgut Mosque (XXI, 2016), (b) TBMM Mosque (Kavas & Şekerci, 2019)

The recently inaugurated Karamürsel Akçakoca Mosque is another notable example. Its prayer hall, with a central glass dome referencing the architectural style of the historic Bursa Grand Mosque, combines the city and nature with a minaret designed to resemble a lighthouse, complete with bird nests. Large windows on the qibla-facing wall maximize daylight use while offering worshippers a refreshing view of the Samanlı Mountains. The mosque's architect, Dr. İbrahim Türkeri, stated that the traditional village mosques of Karamürsel inspired the mosque's hipped roof, and the building was designed to serve as both a place of worship and a public urban space that could function as an earthquake assembly area. Instead of imitating traditional designs, the mosque reflects the local context, adapting to the town's conditions, budget, and capacity. The design aims to reduce heating and electricity loads by maximizing natural daylight. During prayer, the architectural intervention in the worship area was intentionally minimized, creating a spatial environment that supports rather than dominates the experience (Özgür Kocaeli, 2023).

Another exemplary case is the Tiryakizade Hacı Süleyman Ağa Mosque, built in 1778 in the Odunpazarı district of Eskişehir, which has been transformed into one of Türkiye's and the world's few accessible mosques. Measures for accessibility include attention to door thresholds, the installation of an elevator for wheelchair access to the upper floor, and innovations for the hearing-impaired congregation. Sermons are projected onto a screen on the qibla wall, transmitted to hearing aids via an induction loop system, and interpreted in sign language by a translator. A tactile carpet surface also facilitates navigation for visually impaired individuals (Çomoğlu, 2023).

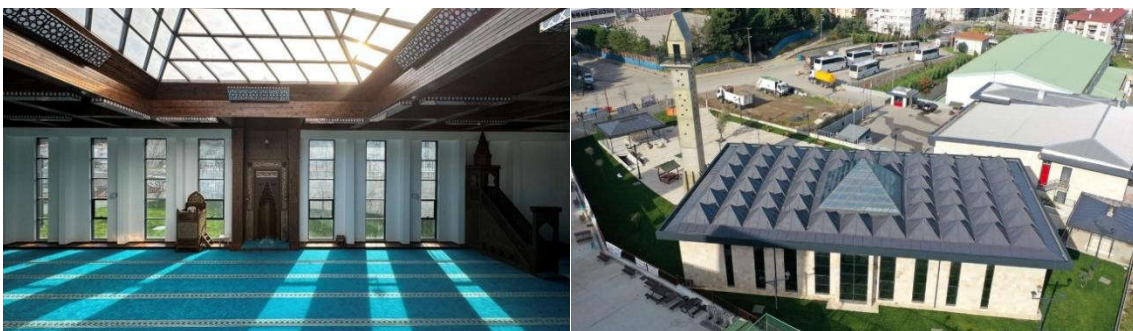


Figure 6. Karamürsel Akçakoca Mosque (TRTHaber, 2024)

Sustainable Design Elements for Mosques

A literature review and the analysis of best practices have developed a general understanding of design elements that can be applied to construct sustainable mosques. However, this study aims to create a comprehensive design checklist that encompasses all dimensions of sustainability—environmental, economic, and social—specifically for mosques. At this stage, the conceptual framework Kim and Rigdon (1998) developed as a guide for sustainable design, presented in Table 1, is considered a helpful reference. The guide is structured around three principles: “Resource Conservation,” “Life Cycle Design,” and “Design for Human Use,” with strategies linked to these principles and methods based on the strategies.

Table 1. Guide for sustainable design (Kim & Rigdon, 1998)

SUSTAINABLE DESIGN		
PRINCIPLES		
Resource Conservation	Life Cycle Design	Design for Human Use
STRATEGIES		
Energy Conservation	Pre-Construction Phase	Conservation of Natural Conditions
Water Conservation	Construction Phase	Urban Design / Land Planning
Material Conservation	Post-Construction Phase	Design for Human Comfort
METHODS		

The principle of resource conservation consists of strategies for conserving energy, water, and materials. Given mosques' functions, large volumes, and frequency and intensity of use, this principle is critically important for their sustainability. Furthermore, each measure to conserve resources will likely raise public awareness of these issues. Within this framework, design elements deemed applicable for conserving mosque natural resources are outlined in Table 2.

Table 2. Design elements for resource conservation for mosques

Design Element
Energy efficient architectural design-passive heating and cooling should be applied.
Renewable energy sources such as solar, wind, water and geothermal should be used.
Embedded low-energy materials that do not require heavy processing and excessive energy use should be used in construction.
Architectural design that provides material conservation such as reducing the building envelope surface, simple geometric shapes, use of standardised building elements should be applied.
Materials such as glass, joinery, facade system, roofing etc. should be selected in a way to save energy.
Energy efficient equipment and technologies should be used in heating, cooling and lighting systems.
Water saving should be ensured with equipment such as rainwater harvesting, low flow pressure armatures.

The principle of life cycle design is based on creating a system in which resources can transform from one beneficial form to another, allowing their useful lifespan to continue indefinitely (Kim & Rigdon, 1998). This principle comprises the pre-, construction, and post-construction phases and methods related to each phase. Design elements applicable within the framework of this principle for sustainable mosque design are presented in Table 3.

Table 3. Design elements to be applied within the scope of life cycle design for mosques

Design Element
Local and natural building materials should be used.
Durable, low maintenance and repair, reusable, recyclable or recycled materials should be used.
Social participation should be ensured in project design.
Paint, carpet, furniture and flooring/wall covering materials that do not contain volatile organic substances and are not harmful to the environment and human health should be used.

The principle of design for human use is the third, and perhaps the most important, principle of sustainable design. It consists of three key strategies: preserving natural environments, urban design, and design for human comfort (Kim & Rigdon, 1998). Preserving the natural environment is crucial when constructing mosques, just as it is for all other types of buildings. Mosques are among the foremost spaces that align with the definition of urban spaces as areas that shape users' cultural identities, contribute to their personal development, and foster interactions that create a sense of urban belonging (İnceoğlu, 2013). In this respect, mosques are significant elements of urban design.

Lastly, mosques must provide minimum user comfort for them to serve as centers of attraction, retain their congregations, and potentially increase attendance. Additionally, as proposed by Siddiqui (2019), mosque architecture should exemplify qualities such as inspiration for society, a connection to a glorious past, humility and submission, functional accessibility, and aesthetic appeal, all of which fall within the scope of the design for human use principle. The proposed design elements within this framework are presented in Table 4.

Table 4. Design elements to be applied within the scope of the principle of design for human for mosques

Design Element
The land should be used in a way to minimise damage to vegetation and trees, to benefit from existing infrastructure and to protect the topographical structure.
An appropriate size garden area and green area should be established for the place of worship.
Thermal comfort should be provided in the building.
Natural ventilation should be provided in the building.
Auditory comfort should be provided in the building.
Natural lighting should be provided in the building.
The building should respond to the needs of users of different physical abilities and disabled people.
The building should be easily accessible.
The building should have a suitable form in terms of physical characteristics such as appearance, density, height and volume.
The form of the building should be in harmony with its surroundings.
Courtyard and outdoor seating areas should be provided.
Toilets and ablution rooms should be designed appropriately.
According to the size of the building, a training area such as seminar room, classroom should be established.
The sections reserved for women should be designed appropriately.
Accessories such as pulpit, sermon pulpit, mihrab, interior walls and building pencil works and lines should be designed in a simple way.
Colour integrity should be ensured in the interior of the building.
The interior of the building should be designed to provide serenity.

Conclusion and Recommendations

The disruption of the ecological balance, rapid depletion of resources, increasing air, soil, and water pollution, global warming, climate change, and numerous economic and social problems such as poverty, unemployment, unhealthy urbanization, and international inequality (Özmehmet, 2008; Low et al., 2002; Hoşkara & Sey, 2008) have reminded humanity of the Native American proverb, "The frog does not drink up the pond in which it

lives," leading to the emergence of the concept of "sustainable development" as a balance between the environment and development. Due to their significant consumption of natural resources—especially materials and energy—and waste generation throughout their life cycles, from design and construction to use and demolition, buildings have become a primary focus of sustainability. As a result, numerous terms with closely related meanings have emerged, such as "green building," "eco-friendly building," "ecological building," and "sustainable building."

As a building type, mosques differ from other structures in terms of their functions, architecture, usage patterns and frequency, and the comfort conditions they must provide, necessitating a separate discussion on the sustainability of mosques. From a functional perspective, the first issue that comes to mind is that mosques are symbols of Islam and, as such, must not contradict the messages of the religion. Many Islamic principles, such as avoiding waste, being frugal, protecting the environment, improving the earth, maintaining individual and societal relationships, and embracing simplicity and modesty, can be aligned with sustainability's environmental, economic, and social dimensions. Moreover, mosques serve as gateways to Islam for Muslims and non-Muslims, emphasizing the importance of being inviting and appealing in their architecture, interior and exterior designs, landscaping, facilities provided to the community, and cleanliness and maintenance.

As architectural works, mosques stand out from other buildings, offering opportunities to break monotony, foster a sense of belonging to the surrounding environment, and develop aesthetic appreciation. Regarding usage patterns and frequency, mosques differ significantly from other public buildings. While they host large congregations for Eid prayers twice a year, fewer people typically use them on regular days. Daily prayers are performed five times a day, year-round, for relatively short durations. Although worshippers stay in the mosque for brief periods, the continuous use of the space, regardless of season, time, or temperature, necessitates the provision of minimum thermal comfort.

Examining the current state of mosques in Türkiye within this unique context reveals a less-than-ideal picture. One notable issue is that women, who make up half of the population, are often overlooked or entirely disregarded in mosque designs, despite Islam viewing mosques as houses of worship for everyone, regardless of gender. Another issue is the lack of proper planning regarding the location and size of mosques. While some centrally located mosques are overcrowded during Friday prayers, many neighborhood mosques are unnecessarily large and numerous. Many mosques are built with domes and excessive sizes, making large spaces difficult and costly to heat, calm, and light. Maintenance, repair, operational challenges and expenses accompany the resulting energy waste. Mosques constructed without considering climatic conditions are often inadequately heated during winter. Consequently, it is not uncommon to find large, elaborately built mosques where the congregation gathers in makeshift spaces in corners or basements for daily prayers, creating a stark contrast.

Furthermore, many mosques occupy the entirety of their plots, leaving no room for landscaping. However, mosques surrounded by trees and green spaces, equipped with benches and urban furniture for the congregation and residents to rest, socialize, and build relationships, could better fulfill their intended functions. The architecture and interior and exterior designs of mosques are also problematic. The preference for traditional mosque architecture often results in missed opportunities for breaking monotony, fostering a sense of belonging, and developing aesthetic appreciation. Conversely, attempts by unqualified architects to create innovative mosque designs often yield results that pale in comparison to traditional mosque architecture. Many mosques also stray far from the Islamic principles of simplicity and modesty. In neighborhood settings, it is common to encounter mosques entirely out of harmony with their surroundings, using mismatched materials on their exterior façades. Interiors often feature walls adorned with poorly coordinated and overly ornate materials, accompanied by similarly unappealing mihrabs, pulpits, and other furnishings. As Kubat (2020) succinctly describes, "There is evident disorder and inconsistency in mosque architecture. Postmodern mosques are concrete masses, devoid of aesthetics and squeezed into narrow spaces between buildings, often lacking even basic amenities such as ablution facilities and fountains. Today, it is crucial to design mosques and their surroundings in harmony with nature, not only for prayer and worship but also to include features that benefit the community and maintain their appeal as centers of attraction."

This study addresses these issues by creating a design checklist to guide stakeholders in making mosques environmentally, economically, and socially sustainable. To this end, relevant literature and best practices were analyzed. Based on the sustainable design framework developed by Kim and Rigdon (1998), 28 specific design elements were identified to enhance mosque sustainability. Implementing these elements could result in

mosques that conserve natural resources and national wealth, enhance user comfort, better represent Islamic principles, support more effective utilization and contribute to social life.

Future research aims to develop a sustainability model for mosques based on statistical methods and tangible indicators. This model will enable evaluating how sustainable mosque projects and existing mosques are. Doing so will assist architects and engineers in creating more sustainable designs and help authorities make existing mosques more sustainable.

References

- AA. (2014). *Afrika'nın kerpiç sarayı: Djenne Ulu Cami*. Retrieved from <https://www.aa.com.tr/tr/yasam/afrika-nin-kerpic-sarayi-djenne-ulu-cami/111843>
- Abd Rahman, N., Hatta, F. A. M., Jalil, M. H., Nasir, Z. M., Mohamad, A. D., Ibrahim, N. L. N., ... & Zain, N. M. (2024). The green mosque and climate change mitigation: A study of green mosques in the Klang Valley. *International Journal of Religion*, 5(10), 1552–1564.
- Abdallah, A. S. H. (2023). Improved energy consumption and smart eco-system for mosques in hot arid climates. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7), 101997.
- Abdou, A., Al-Homoud, M., & Budaiwi, I. (2005a). Mosque energy performance, Part I: Energy audit and use trends based on the analysis of utility billing data. *Engineering Sciences*, 16(1), 165–184.
- Abdou, A., Al-Homoud, M., & Budaiwi, I. (2005b). Mosque energy performance Part II: Monitoring of energy end-use in a hot-humid climate. *Engineering Sciences*, 16(1), 185–202.
- Ahmad, N. A., Khalid, M. K. A., Haron, N., & Haron, N. (2024). Empowering a mosque community in Melaka with solar lighting technologies application: A community-based approach. *Journal of Tourism, Hospitality and Environment Management (JTHERM)*, 9(36).
- Ahmad, T., Thaheem, M. J., Anwar, A., & Din, Z. (2016). Implications of stereotype mosque architecture on sustainability. *Procedia Engineering*, 145, 96–103.
- Al-Alawi, A., Sohail, M., Kayaga, S., & Al-Alawi, A. (2021). Water management in mosques of Oman. *Sustainable Water Resources Management*, 7, 1–10.
- Al-Ali, M., Mattar, Y., Alzaim, M. A., & Beheiry, S. (2023). Analysis of electricity and water consumption in existing mosque buildings in the UAE. *Buildings*, 13(4), 1007.
- Alhamoud, M. S., Abdou, A. A., & Budaiwi, I. M. (2005). Mosque energy performance, part II: Monitoring of energy end use in a hot-humid climate. *Engineering Sciences*, 16(1).
- Alhamoud, M. S., Abdou, A. A., & Budaiwi, I. M. (2009). Assessment of monitored energy use and thermal comfort conditions in mosques in hot-humid climates. *Energy and Buildings*, 41(6), 607–614.
- Alharbi, E. A., & Zin, R. M. (2020). Prediction model to reduce energy consumption of mosque buildings. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 10(1), 2249–6890.
- Almasri, R. A., Al-Anazi, M. A., Almarshoud, A. F., Alshitawi, M. S., & Abu-Hamdeh, N. H. (2023). Investigating energy efficiency and solar energy in Saudi mosques to achieve zero energy or zero bill. *Alexandria Engineering Journal*, 68, 263–280.
- Aydın, D. Ç., Uysal, E., & Akça, Y. B. Ö. (2017). Diyarbakır tarihi Suriçi bölgesi akustik mirasının değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(2), 255–266.
- Aziz, N. S., Ismail, A. S., & Siraj, S. (2022, May). Responsive design approach towards the sustainable mosque architecture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1022, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- Azmi, N. A., & Ibrahim, S. H. (2020). A comprehensive review on thermal performance and envelope thermal design of mosque buildings. *Building and Environment*, 185, 107305.

- Azmi, N. A., & Kandar, M. Z. (2019). Factors contributing in the design of environmentally sustainable mosques. *Journal of Building Engineering*, 23, 27–37.
- Azmi, N. A., Arıcı, M., & Baharun, A. (2021). A review on the factors influencing energy efficiency of mosque buildings. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126010.
- Bektaş, C. (2008). *Etimesgut Cami*. Retrieved from https://www.mimarizm.com/makale/etimesgut-cami-cengiz-bektas_113496
- Bouzir, T. A. K., Berkouk, D., Eisenman, T. S., Schwela, D., Azab, N., Gomma, M. M., & Boucherit, S. (2024). Soundscapes in Arab cities: A systematic review and research agenda. *Sound and Vibration*, 58, 1–24.
- Budaiwi, I. M., & Abdou, A. A. (2013). HVAC system operational strategies for reduced energy consumption in buildings with intermittent occupancy: The case of mosques. *Energy Conversion and Management*, 73, 37–50.
- Budaiwi, I. M., Abdou, A. A., & Al-Homoud, M. (2013). Envelope retrofit and air-conditioning operational strategies for reduced energy consumption in mosques in hot climates. In *Building Simulation*. Springer.
- CCM (Cambridge Central Mosque). (2024). *Welcome*. Retrieved from <https://cambridgecentralmosque.org/>
- Ceurstemont, S. (2017). *The mosque that powers a village*. Retrieved from <https://www.bbc.com/future/article/20170927-can-a-place-of-worship-power-a-village>
- Çomoğlu, Z. S. (2023). *Hayyal el erişilebilir, sürdürülebilir camiye!*. Retrieved from <https://serbestiyet.com/serbestiyet-in-english/ozel-haber-hayyal-el-erisilebilir-surdurulebilir-camiye-144735/>
- DEWA. (2021). *DEWA inaugurates world's first mosque to receive LEED platinum rating for green buildings*. Retrieved from <https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2021/09/dewa-inaugurates-worlds-first-mosque>
- El Fouih, Y., Allouhi, A., Abdelmajid, J., Kousksou, T., & Mourad, Y. (2020). Post energy audit of two mosques as a case study of intermittent occupancy buildings: Toward more sustainable mosques. *Sustainability*, 12(23), 10111.
- Eyüpgiller, K. K. (2006). Türkiye’de 20. Yüzyıl cami mimarisi. *Mimarlık*, 331, 20–27.
- Flickr. (2016). *Great Mosque of Djenné*. Retrieved from <https://www.flickr.com/photos/baronreznik/25939121633>
- GBIG (Green Building Information Gateway). (2024). *Special: Houses of Worship*. Retrieved from <https://www.gbigo.org/collections/4029/activities?page=4>
- GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). (2023). *Green Mosques: For clean energy*. Retrieved from <https://www.giz.de/en/workingwithgiz/41352.html>
- Grigorovschi, M., & Gheorghii, C. (2015). Small landscape designs: A premise for urban sustainability. *Urbanism. Arhitectură. Construcții*, 6(1), 91–93.
- Güzer, A. (2009). Modernizmin gelenekle uzlaşma çabası olarak cami mimarlığı. *Mimarlık*, 348, 21–23.
- Harsritanto, B. I. R., Nugroho, S., Dewanta, F., & Prabowo, A. R. (2021). Mosque design strategy for energy and water saving. *Open Engineering*, 11(1), 723–733.
- Hoşkara, E., & Sey, Y. (2008). Ülkesel koşullar bağlamında sürdürülebilir yapıım. *İTÜ Dergisi/a*, 7(1), 50–61.
- Hurayra, M. A., Ahmed, A., Alim, M. A., & Rahman, A. (2024). Water savings in places of worship: A case study for St Mary’s Mosque in Australia. *Sustainability*, 16(15).
- IFC (International Finance Corporation). (2022). *At the cutting edge of the global push for greener buildings*. Retrieved from <https://www.ifc.org/en/stories/2022/indonesias-national-mosque-green-design>
- IFEES (Islamic Foundation for Ecology and Environmental Sciences). (2024). *Mosques as green project exemplars*. Retrieved from <https://www.ifees.org.uk/projects/green-mosque-projects/mosques-as-green-project-exemplars/>
- İnceoğlu, M. (2013). Sivrihisarda sürdürülebilirlik üzerine üç mimari proje. *Social Sciences*, 8(3), 133–152.

- Irving, S. (2010). *Sustainability and spirituality: Levenshulme's eco-mosque*. Retrieved from <https://radicalmanchester.wordpress.com/2010/09/26/sustainability-and-spirituality-levenshulmes-eco-mosque/>
- Jaffar, N., Harun, N. Z., & Abdullah, A. (2020). Enlivening the mosque as a public space for social sustainability of traditional Malay settlements. *Planning Malaysia*, 18.
- Jamail, M. I., Samsudin, I. L., Rasdi, M. T. M., Sabil, A., & Yola, L. (2023). Sustainable mosque designs from the perspectives of social inclusion: Comparisons of four mosques in Kuala Lumpur, Malaysia. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(5), 328–335.
- Jasim, F. A., & Al-Bazzaz, I. A. (2023). Aesthetic representation levels in mosques: Insights from the Great State Mosque competition in Baghdad, Iraq.
- Kavas, K. R., & Şekerci, A. (2019). 20. Yüzyıl Türk mimarlığının nitelikli örnekleri olarak Etimesgut ve TBMM camilerinin çevre estetiği temelinde okunması. *Akdeniz İnsani Bilimler Dergisi*, 9(2), 389–399.
- Kent Design. (2000). *A guide to sustainable development*. Retrieved from <https://shareweb.kent.gov.uk/Documents/community-and-living/Regeneration/kent-design-guide-2000.pdf>
- Khamis, N. E., & Tantawy, D. E. (2021). Spiritual values between theological symbolism and design globalization in the contemporary mosque architecture. *The Academic Research Community Publication*, 6, 32–54.
- Khashaba, S. (2019). A proposed design approach to support sustainability requirements of the design of new mosques and in the existing mosques. *International Journal of Technical Research and Applications*, 7(3), 01–19.
- Kim, J. J., & Rigdon, B. (1998). *Sustainable architecture module: Introduction to sustainable design*. National Pollution Prevention Center for Higher Education.
- Kubat, M. (2020). İslâm toplumunun birlik ve beraberliğini sağlama merkezleri olarak câmi ve mescidler. *Birey ve Toplum Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(2), 5–31.
- Kuban, D. (2013). Açılış konuşması. In *1. Ulusal Cami Mimarisi Sempozyumu Bildirileri (2–5 Ekim 2012)* (pp. 24–27).
- Low, N., Gleeson, B., Elander, I., & Lidskog, R. (2002). *Consuming cities: The urban environment in the global economy after the Rio Declaration*. London: Routledge.
- Milliyet. (2024). *Türkiye'de toplam kaç cami var? 2024 il il cami sayısı*. Retrieved from <https://www.milliyet.com.tr/ramazan/dini-bilgiler/turkiyede-toplam-kac-cami-var-2024-il-il-cami-sayisi-6337122>
- Mohamed, N. A. S., Shari, Z., Dahlan, N. D., & Idowu, I. A. (2021). Architectural sustainability on the impacts of different air-conditioning operational profiles and temperature setpoints on energy consumption: Comparison between mosques with and without HVLS fan in the city center mosques. *Journal of Design and Built Environment*, 21(2), 19–38.
- Mohammadi, K. A., & Oliveira, E. (2015). The sustainable architecture of bazaars and its relation with social, cultural and economic components (Case study: The historic Bazaar of Tabriz).
- Motawa, I., & Carter, K. (2013). Sustainable BIM-based evaluation of buildings. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 74, 419–428.
- Omer, S. (2013). *The form of the Prophet's Mosque*. Retrieved from <https://www.islamicity.org/7942/the-form-of-the-prophets-mosque/>
- Oxford English Dictionary. (2015). *White elephant*. Retrieved from https://www.oed.com/dictionary/white-elephant_n?tl=true
- Özgür Kocaeli. (2023). *Karamürsel Akçakoca Cami*. Retrieved from <https://www.ozgurkocaeli.com.tr/haber/18023220/karamursel-akcakoca-cami-surdurulebilir-mimarlik-olgusu-ile-tasarlandi>

- Özmehmet, D. E. (2008). Dünyada ve Türkiye'de sürdürülebilir kalkınma yaklaşımları. *Journal of Yaşar University*, 3(12), 1853–1876.
- Perdana, A. (2024, February). Optimizing green sustainable mosque criteria: A case study of Trisakti University Nagrak Campus Mosque design. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1312, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.
- Siddiqui, R. (2019). *Towards eco-friendly socio-economic mosques*. Retrieved from <https://www.islamicity.org/18154/eco-friendly-socio-economic-mosques/>
- Siraj, S. M. M., Rodzi, K. A. M., Adnan, N. A., & Ismail, A. S. (2023). A documentation of environmentally sustainable mosques in Malaysia. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(6), 224–233.
- Sobri, M. I. M., Ismail, S., Sabil, A., Yusof, H., Asif, N., & Setiyowati, E. (2021). Systematic review of sustainable design approach for mosques. *Journal of Islamic Architecture*, 6(4), 369–375.
- Syamsiyah, N. R., Dharoko, A., Utami, S. S., & Ayob, A. (2022). Sustainability relationship between space configuration, activity patterns, and mosque acoustics quality. *Journal of Islamic Architecture*, 7(2).
- TAQAT. (2021). *Mosques*. Retrieved from <https://taq.at/mosques/>
- Tarigan, E., & Fam, M. (2023). *Muslims around the world*. Retrieved from <https://apnews.com/article/muslims-green-ramadan-climate-solar-panels-mosques-605c7274fcf619647725c20351a25f98>
- The Eco Muslim. (2023). *Happy hands-on Muslim action at Palmers Green Mosque's community gardens*. Retrieved from <https://www.theecomuslim.co.uk/2012/08/green-mosque-community-garden.html>
- Times of India. (2021). *Dubai gets world's first 'green' mosque*. Retrieved from <https://timesofindia.indiatimes.com/travel/travel-news/dubai-gets-worlds-first-green-mosque/articleshow/85978163.cms>
- TRTWorld. (2021). *Total of 3.6 million mosques serve Muslims around the world*. Retrieved from <https://www.trtworld.com/life/total-of-3-6-million-mosques-serve-muslims-around-the-world-52009>
- Tunalı, İ. (2012). *Estetik*. İstanbul: Remzi Kitabevi.
- Wan Ali, W. N. A., Hassan, N., Abdullah, M., Ismail, M., & Johari, N. (2020). An analytical study of mosques and public spaces: Integration space for spiritual and community bonding. In *Charting a Sustainable Future of ASEAN in Business and Social Sciences: Proceedings of the 3rd International Conference on the Future of ASEAN (ICoFA) 2019—Volume 1* (pp. 237–252). Springer Singapore.
- Wikipedia. (2024). *List of largest mosques*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_mosques
- World Economic Forum. (2018). *Jordan's capital is creating green mosques and schools to tackle emissions*. Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2018/10/with-green-mosques-and-schools-amman-pushes-for-zero-emissions/>
- XXI. (2016). *Cengiz Bektaş Arşivi: Çoklu Okumalar*. Retrieved from <https://xxi.com.tr/i/cengiz-bektas-arsivi-coklu-okumalar>

**AI-DRIVEN PREDICTION OF GRID ELECTRICITY IMPORTS FOR INDUSTRIAL BUILDINGS:
A CASE STUDY USING GRU IN KONSTANZ****Soha SAMI**

Soha Sami, Master's Student, University of Tehran, Faculty of Aburaihan, Department of Technology and Agriculture, Tehran-Iran

Jafar MASSAH

Prof. Dr. Jafar Massah, University of Tehran, Faculty of Aburaihan, Department of Technology and Agriculture, Tehran-Iran (Responsible Author: Jafar Massah)

Mohammad HAJIAN

Mohammad hajian, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Water and Soil Engineering, Department of Biosystems Engineering, Gorgan, Iran

Tayyeb NAZGHELICHI

Dr. Tayyeb Nazghelichi, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Water and Soil Engineering, Department of Biosystems Engineering, Gorgan, Iran

Seyed Reza HASSAN-BEYGI

Prof. Dr. Seyed Reza Hassan-Beygi, University of Tehran, Faculty of Aburaihan, Department of Technology and Agriculture, Tehran-Iran

Abstract

Forecasting electricity import from the network in buildings, especially in the industrial sector, is crucial for optimal energy management and cost reduction. Considering the fluctuations of energy production and consumption and the need for the stability of power grids, accurate prediction of this parameter can help plan load management, optimize consumption, and reduce operating costs. The aim is to forecast the electricity import from the grid for an industrial building in Konstanz, Baden-Württemberg, Germany. For this purpose, a primary dataset was extracted from the Open Power System Database (OPSD) and supplemented with weather and time data. Performing a correlation analysis, identify more effective input parameters. The GRU (Gated Recurrent Unit) model was deepened by adding multiple layers and selected as the primary prediction algorithm by adjusting the hyperparameter. Evaluation of the model with four error indices including (R2 Score = 0.90), (MAE = 0.032), (MSE = 0.0024), and (RMSE = 0.049) showed the high accuracy of the model. This research indicates that applying advanced artificial intelligence algorithms to a comprehensive dataset is a highly effective tool for accurately forecasting electricity imports and optimizing energy management in the industrial sector.

Keywords: import electricity - artificial intelligence - deep learning - time series algorithms

Introduction

Integrating artificial intelligence (AI) and neural networks in predicting household energy import from the power grid is a burgeoning field that addresses the complexities of modern energy demands. As energy consumption patterns evolve, traditional forecasting methods often fall short, necessitating advanced predictive models. AI techniques, and intense learning algorithms, have shown promise in enhancing the accuracy of load forecasting and energy management in smart grids. Recent studies highlight the effectiveness of various AI models, such as long short-term memory (LSTM) networks, in predicting energy parameters, thereby minimizing losses and optimizing power generation capacity (Zafar, 2024). The use of AI for disaster impact prediction further illustrates its potential to enhance grid resilience (Rahimighazvini, 2024).

Forecasting electricity imports from the grid is crucial for several reasons. First, operational efficiency is significantly improved through accurate forecasting, enabling utilities to optimize energy generation and

distribution, reduce operational costs, and enhance reliability. This is essential for effective capacity scheduling and power system management (Hammad, 2020). Moreover, AI-assisted tools for grid stability assessment and fault diagnosis have emerged, showcasing significant advancements in managing power systems ((Niu, 2024); (You, 2020)). These tools contribute to maintaining a demand-supply balance, which is vital for preventing outages and ensuring a stable power supply, especially given the increasing energy consumption and variability of renewable energy sources (Ananthi, 2024).

By anticipating energy needs, utilities can minimize reliance on expensive peak power generation and optimize energy storage systems, leading to significant cost reductions for both utilities and consumers (Nabavi, 2021). Effective forecasting also supports the integration of renewables into the grid, facilitating the transition to more sustainable energy systems and allowing better management of the variability associated with renewables (Chung, 2022). Furthermore, market strategies benefit from accurate forecasts, informing bidding strategies in electricity markets and enabling producers and consumers to make informed decisions for cost savings and improved efficiency (Razak, 2015).

The prediction of electricity import from the grid using artificial intelligence (AI) and neural networks has gained significant attention due to the increasing complexity of modern power systems. Traditional methods of forecasting electricity demand and supply often fall short in accuracy and responsiveness, particularly in the face of dynamic consumption patterns and the integration of renewable energy sources. AI techniques, especially artificial neural networks (ANNs), have emerged as powerful tools for enhancing the reliability and efficiency of electricity forecasting ((Almasoudi, 2023); (Onaolapo, 2022)).

Research indicates that AI can significantly improve load forecasting accuracy, which is critical for maintaining grid stability and optimizing energy distribution (Yuan, 2024). For instance, studies have demonstrated the effectiveness of hybrid models combining convolutional neural networks (CNNs) with recurrent neural networks (RNNs) for real-time fault detection and load classification (Alves, 2023). Furthermore, the application of fuzzy logic alongside ANNs has shown promise in long-term demand forecasting, yielding low error rates (Marpaung, 2024).

The integration of AI in power systems not only enhances forecasting capabilities but also supports the transition to smart grids, which are essential for sustainable energy management (Dimitrijevic, 2014). As the energy landscape evolves, leveraging AI technologies will be crucial for developing resilient and efficient electricity systems that can adapt to future challenges ((Kotur, 2016); (Zhang, 2022)). Overall, the incorporation of AI in predicting electricity import is vital for ensuring a reliable and sustainable energy future.

However, despite these advancements, a substantial gap remains in the integration of AI-driven electricity import forecasting models that concurrently consider the variability of renewable energy sources, the dynamics of consumer behavior, and the resilience of the grid. Addressing this gap could unlock further potential for enhancing the efficiency and sustainability of energy systems.

Materials and Methods

2.1. data

The data utilized in this study were extracted from the Open Power System Data (OPSD) website. A specific subset of this data, pertaining to household energy consumption and production, included information on photovoltaic energy production and electricity importation from the grid by an industrial facility located in the city of Konstanz, Germany. These datasets served as the primary inputs for the analyses and forecasts conducted in this research.

Initially, a data preprocessing procedure was implemented to render the raw data obtained from the OPSD website suitable for forecasting models. This phase included the removal of invalid data, management of missing values, normalization of the dataset, and extraction of relevant features from the raw data. Following these procedures, the data were organized into a clean and structured format, making it ready for subsequent modeling and analysis.

The use of accurate and processed data from reliable sources such as OPSD enhances the precision and reliability of the results derived from forecasts and analyses. Particularly in the realm of electricity consumption forecasting and photovoltaic generation in industrial buildings, such data are instrumental in improving model accuracy and optimizing energy consumption.

2.2. Data Preprocessing

Features such as industrial electricity consumption, ambient temperature, hour of the day, and temporal variables, including the day of the month and week of the year, were extracted to prepare the data for modeling. To effectively model the periodic behavior of these temporal variables, sine and cosine transformations (e.g., Day_cos and Day_sin) were applied.

2.3. Data Normalization

To minimize the impact of varying scales of the variables on the performance of deep learning models, the MinMaxScaler method was used. This method scales each feature to a range of [0, 1]. The normalization process ensures that each feature contributes equally to the model's training, preventing variables with larger scales from dominating the learning process.

2.4. Time Sequence Creation

A sequence-based approach was employed to model the data. Time sequences of 24-hour duration were constructed, utilizing 24 consecutive observations as input to predict subsequent values. This process of sequence creation enables the model to learn from a series of historical values, thereby facilitating the capture of temporal dependencies within the data.

2.5. Data Splitting

The dataset was divided into training and testing subsets in an 80-20 ratio. To preserve the temporal structure of the data, the splitting process was performed without shuffling the observations. This ensures that the model is evaluated on data that is chronologically consistent and realistic.

2.6. Model Evaluation

To evaluate the model's performance, the predicted values were rescaled to their original range. Four metrics were used for evaluation:

- **Mean Absolute Error (MAE):** MAE computes the average magnitude of the prediction errors. This metric is robust to outliers and provides an easily interpretable measure of average error.
- **Mean Squared Error (MSE):** MSE calculates the average squared differences between the actual and predicted values, emphasizing larger errors. It is useful for identifying large deviations between predictions and actual values.
- **Root Mean Squared Error (RMSE):** RMSE, the square root of MSE, provides the prediction error in the same unit as the original data. This metric is particularly sensitive to larger errors, making it useful for identifying significant deviations in predictions.
- **Coefficient of Determination (R²):** R² measures the proportion of variance in the target variable explained by the model. R² values range from 0 to 1, where 1 indicates perfect prediction accuracy, and negative values suggest that the model performs worse than a simple mean-based prediction.

These metrics collectively provide a comprehensive assessment of the model's accuracy, with MAE and RMSE offering measures of error magnitude and R² reflecting the explanatory power of the model.

2.7. process

the data was thoroughly examined and analyzed to simulate the exact course of electricity imports from the grid. These analyses were conducted based on various time parameters such as month, year, and days of the week to determine the amount of electricity imports during these time periods.

Analysis of Monthly Electricity Import from the Grid in the Building, as Illustrated in Figure 1

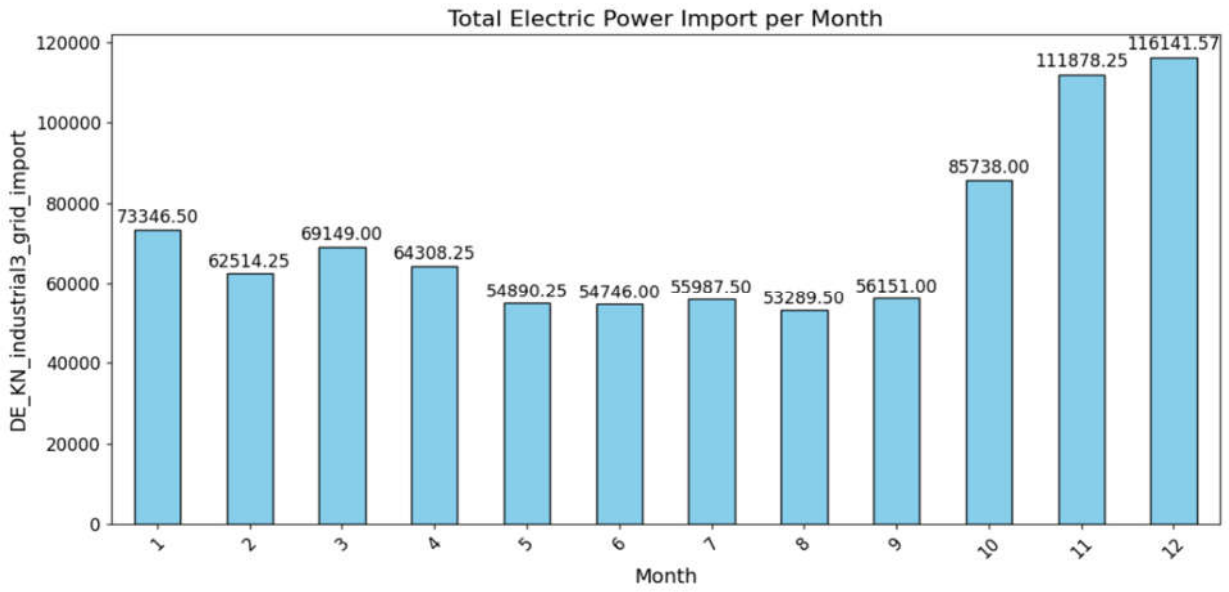
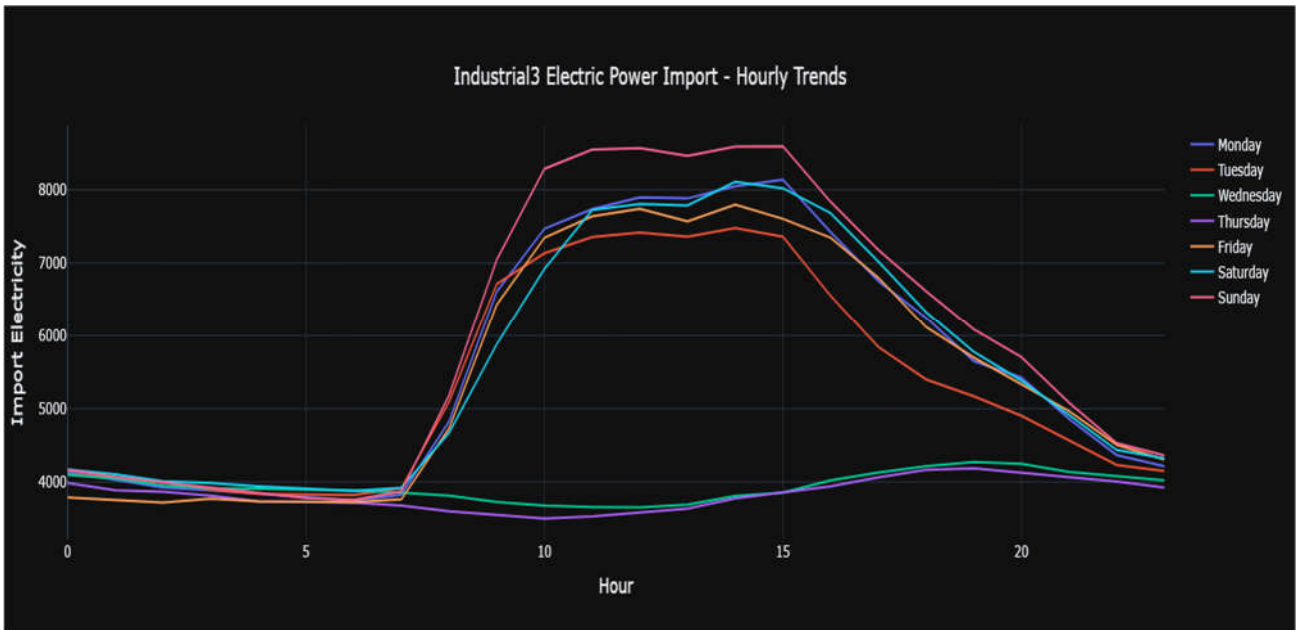


Figure 1. Total electric power import per month



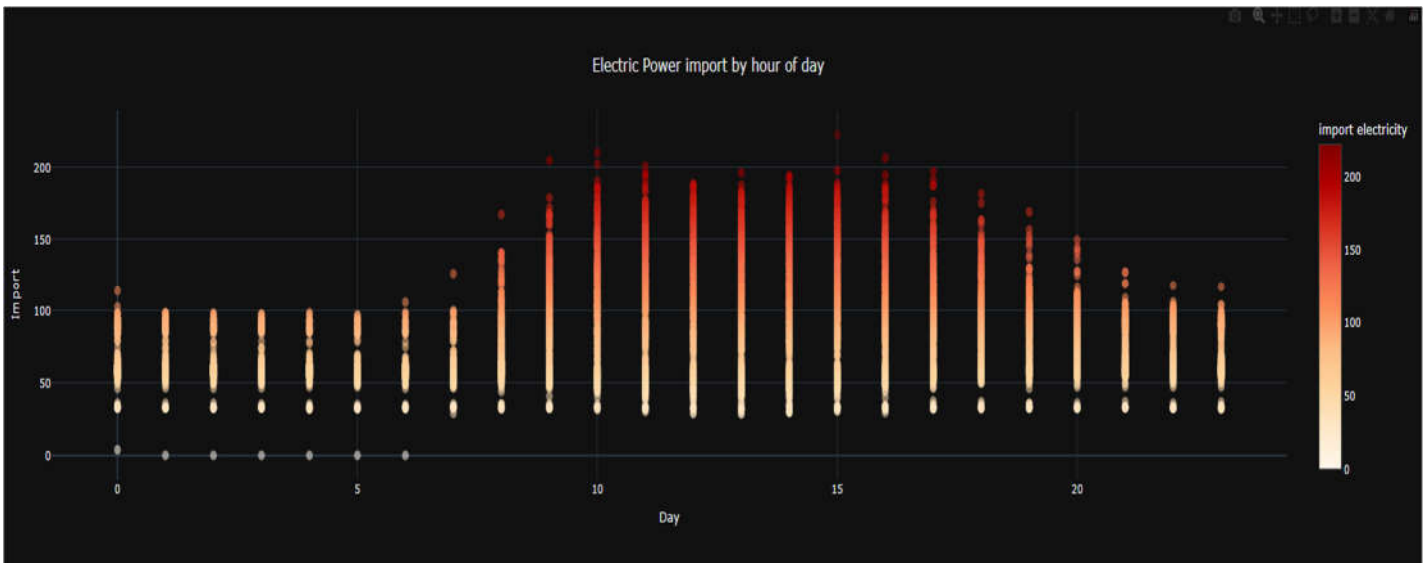


Figure 3. Electric Power import by hour of day

2.8. Description of model

2.8.1. GRU

The Gated Recurrent Unit (GRU) is utilized for the prediction of energy consumption in building networks through the analysis of time-series data pertaining to building energy usage and meteorological variables. This model effectively captures complex interrelationships among various factors, resulting in accurate predictions based on historical data.

As a sophisticated methodology within the realm of deep learning, the GRU exhibits notable proficiency in modeling intricate time-series data and extracting nonlinear features across diverse temporal scales. It employs gating mechanisms to regulate the flow of information within its architecture, thereby adeptly addressing both long-term and short-term temporal dependencies.

The implementation of the GRU for forecasting energy consumption in building networks significantly enhances prediction accuracy, as it possesses the capability to learn temporal patterns and optimize parameters without the necessity for manual feature engineering. This attribute positions it as an optimal solution for dynamic environments in which energy consumption patterns are influenced by numerous interdependent factors.

2.8.2. Network Structure of GRU

The network structure was designed and implemented as described in Table 1.

1. GRU Layers:

- The network consists of three GRU layers, each with 100 units.
- The first and second GRU layers are configured to return their sequential outputs to the next layer (using the parameter `return_sequences=True`), while the third GRU layer outputs only the final state.

2. Dropout Layers:

- A Dropout layer with a rate of 0.2 is added after each GRU layer to prevent overfitting and enhance the model's generalization performance.

3. Dense Layers:

- Two hidden Dense layers with 50 and 25 neurons are included, each with a ReLU activation function.
- The output layer is a single neuron with a linear activation function for generating the final predictions.

4. Network Compilation:

- The network is compiled using the Adam optimizer and the Mean Squared Error (MSE) loss function.

This structure was designed to address the complexities inherent in time-series data and effectively extract nonlinear features. The optimization of model parameters was conducted throughout the training process, utilizing the training dataset. To enhance accuracy and mitigate the risk of overfitting, early stopping and learning rate reduction (ReduceLROnPlateau) were implemented as callback mechanisms.

Table 1. Network Structure of GRU

Layer Number	Layer Type	Number of Neurons	Additional Parameters
1	GRU	100	Return_sequences=True, Input_shape=(SEQ_LENGTH, X_train.shape[2])
2	Dropout	-	Rate: 0.2
3	GRU	100	Return_sequences=True
4	Dropout	-	Rate: 0.2
5	GRU	100	-
6	Dropout	-	Rate: 0.2
7	Dense	50	Activation: Relu
8	Dropout	-	Rate: 0.2
9	Dense	25	Activation: Relu
10	Dropout	-	Rate: 0.2
11	Dense	1	Output

Findings and Discussion

4.1. Model Performance Evaluation

To evaluate the accuracy and performance of the model, standard regression evaluation metrics—including R^2 , Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), and Root Mean Squared Error (RMSE), were employed. The values obtained for these metrics are presented in Table 2.

Table 2. Values obtained for metrics for test data

Evaluation Metric	Value
R^2 (Coefficient of Determination)	0.9011
Mean Absolute Error (MAE)	0.0320
Mean Squared Error (MSE)	0.0024
Root Mean Squared Error (RMSE)	0.0493

These results indicate that the model exhibits a high degree of accuracy in predicting trends within the data, as evidenced by the R^2 value, which reflects the model's alignment with the actual data. Furthermore, the low values of Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) suggest that the prediction errors are minimal.

4.2. Comparison of Actual and Predicted Values

To further investigate, the actual and predicted values were compared for the test samples. A portion of this comparison for several test data samples is presented in Table 3:

Table 3. Comparison of Actual and Predicted Values

Sample Number	Actual Value	Predicted Value	Absolute Error
1	80.50	73.18	7.32
2	73.75	68.55	5.20
3	59.00	64.21	5.21
4	58.25	59.85	1.60
5	57.25	59.65	2.40

As shown in the table, the predicted values are in good agreement with the actual values, with the absolute error being low in most cases.

4.3. Chart Analysis

Two sets of charts have been provided to examine the model's accuracy:

1. **Comparison of Real and Predicted Values for the Test Data:** In Figure 4, the comparison between real (blue line) and predicted (yellow line) values for the test data is displayed. The model has been able to predict the overall trend of the data with high accuracy, with only minor discrepancies at certain points.

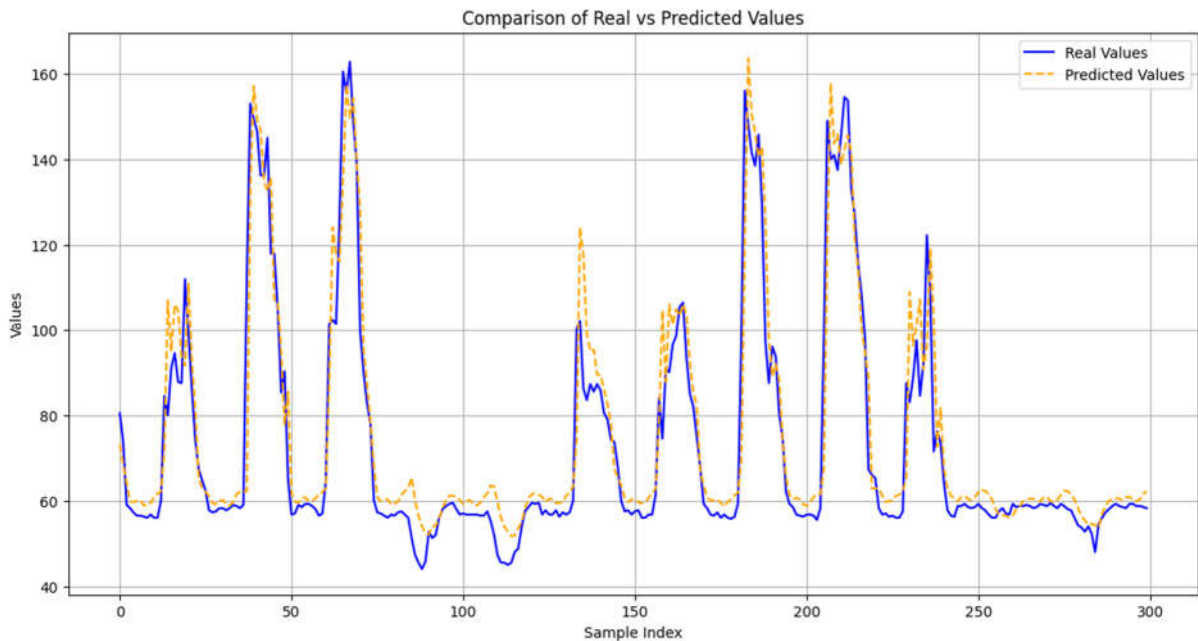


Figure 4. Comparison of Real and Predicted Values for Test Data

2. Comparison of Values in Training and Test Data:

- In the upper part of Figure 5, the comparison of real (green) and predicted (red) values for the training data is provided.
- In the lower part of Figure 5, the similar comparison is made for the test data. These charts demonstrate the strong performance of the model across both data sets.

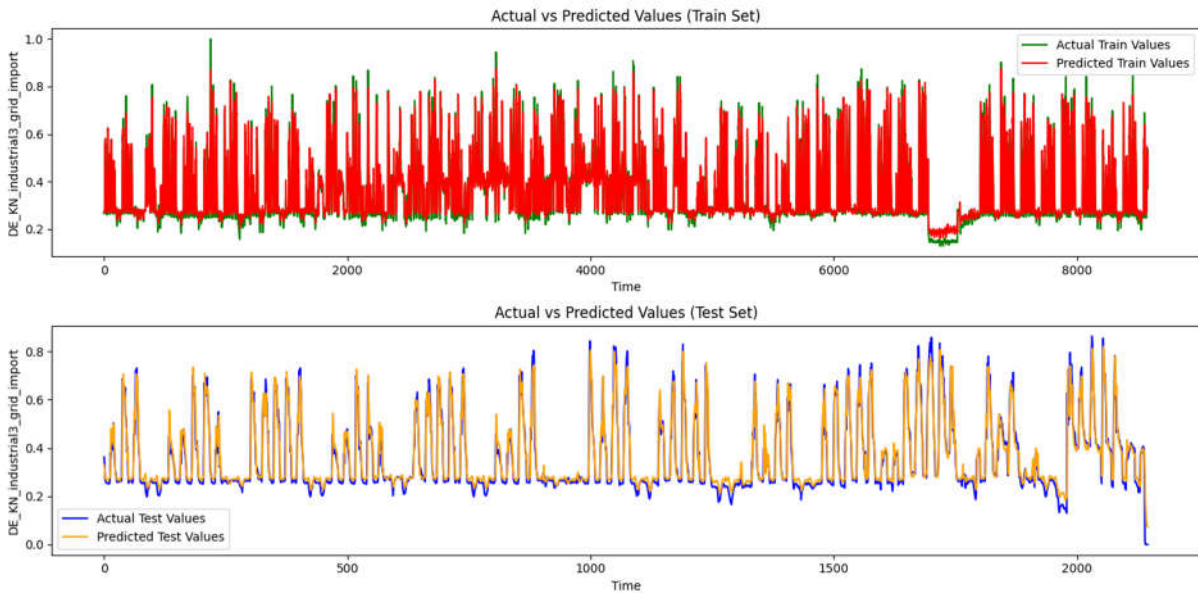


Figure 5. Comparison of Values in Training and Test Data

4.4 Impact of Input Data on Model Performance

One of the pivotal factors contributing to the success of the model was the quality and comprehensiveness of the input data utilized for training and evaluation. In this study, the input data comprised a full year (365 days) of information, encompassing a diverse array of behavioral patterns as well as seasonal, daily, and weekly fluctuations. The incorporation of such extensive data has facilitated the model's capacity to discern latent patterns and trends within the dataset more effectively. Moreover, using a full year of data helped prevent the issue of **overfitting**, because:

1. The model was required to learn from a wide variety of changes, rather than focusing on specific features of a limited subset of data.
2. This broad range of data allowed the model to improve its ability to generalize and make predictions on new data.

The analysis of the results and the charts comparing actual and predicted values (shown above) also demonstrate that the model has been able to replicate the trends in the data over time with high accuracy. This is particularly evident in the test data, where the model has performed well even with new data.

4.5 Final Conclusion on the Impact of Data

Given the use of a full year's worth of data in this study, it can be concluded that:

- **Comprehensiveness of the Data:** The presence of all seasonal and behavioral changes in the data helped the model identify complex, nonlinear patterns.
- **Improved Prediction Accuracy:** Due to access to a wide variety of data, the model was able to predict the actual values accurately.
- **Prevention of Overfitting:** The diversity and breadth of the data helped prevent the model from learning only from specific subsets, thus improving its ability to generalize.

5. Conclusion

This study has elucidated the critical input parameters essential for forecasting electricity imports from the grid through a rigorous correlation analysis and comprehensive data evaluation. The identified parameters of significance include both temporal and meteorological data. By employing an enhanced Gated Recurrent Unit

(GRU) model with optimized hyperparameters, the study achieved precise predictions across all analyzed parameters.

The model's performance on the test dataset exhibited substantial accuracy and minimal error rates, with results indicating $R^2 = 0.90$, $MAE = 0.032$, $MSE = 0.0024$, and $RMSE = 0.049$. These findings underscore the efficacy of the proposed model in forecasting electricity imports and highlight its potential applicability in energy planning and consumption optimization for industrial facilities.

References

- Zafar, A et al. (2024). Machine learning autoencoder-based parameters prediction for solar power generation systems in smart grid. *IET Smart Grid*. <https://doi.org/10.1049/stg2.12153>
- Gao, Z et al. (2024). Research on Integrated Architecture of Multiple Optimization Algorithms for Artificial Intelligence Verification Platform for Power Grid Dispatching. 2024 6th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP), 926-930. <https://doi.org/10.1109/ICESEP62218.2024.10651796>
- Rahimighazvini, H et al. (2024). Disaster impact prediction in the power grid using artificial intelligence based on Texas synthetic grid data replication. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0881>
- Niu, D et al. (2024). Artificial Intelligence-based Digital Fault Diagnosis and Prediction for Power Grids. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2303>
- You, S et al. (2020). A Review on Artificial Intelligence for Grid Stability Assessment. 2020 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), 1-6. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm47815.2020.9302990>
- Thenmozhi, M et al. (2024). Grid Power 2.0: Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) Optimizations in Smart Power Grids. 2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence For Internet of Things (AIIoT), 1-6. <https://doi.org/10.1109/AIIoT58432.2024.10574687>
- Hammad, M et al. (2020). Methods and Models for Electric Load Forecasting: A Comprehensive Review. *Logistics & Sustainable Transport*, 11, 51 - 76. <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0004>
- Ananthi, K et al. (2024). An Insight of Deep Neural Networks Based on Demand Forecasting in Using: Ann Algorithm. 2024 10th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 1, 2469-2472. <https://doi.org/10.1109/ICACCS60874.2024.10717110>
- Nabavi, S A et al. (2021). Deep Learning in Energy Modeling: Application in Smart Buildings With Distributed Energy Generation. *IEEE Access*, 9, 125439-125461. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110960>
- Chung, J, Jang, B (2022). Accurate prediction of electricity consumption using a hybrid CNN-LSTM model based on multivariable data. *PLOS ONE*, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278071>
- Razak, I et al. (2015). Support vector machine for day ahead electricity price forecasting. <https://doi.org/10.1063/1.4915865>
- Almasoudi, F M (2023). Enhancing Power Grid Resilience through Real-Time Fault Detection and Remediation Using Advanced Hybrid Machine Learning Models. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15108348>
- Onaolapo, A et al. (2022). A Comparative Assessment of Conventional and Artificial Neural Networks Methods for Electricity Outage Forecasting. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15020511>
- Yuan, W et al. (2024). Research on Load Forecasting Technology of Power System Based on Artificial Intelligence. 2024 9th International Conference on Electronic Technology and Information Science (ICETIS), 639-643. <https://doi.org/10.1109/ICETIS61828.2024.10593782>
- Alves, G H et al. (2023). Battery Storage Systems Control Strategies with Intelligent Algorithms in Microgrids with Dynamic Pricing. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16145262>

Marpaung, F S et al. (2024). Long term demand forecasting in Jakarta distribution grid system using fuzzy logic and artificial neural network method. Journal of Physics: Conference Series. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2828/1/012033>

Dimitrijevic, M et al. (2014). IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS BASED AI CONCEPTS TO THE SMART GRID. Facta universitatis. Series electronics and energetics, 27, 411-424. <https://doi.org/10.2298/FUEE1403411D>

Kotur, D, Žarković, M (2016). Neural network models for electricity prices and loads short and long-term prediction. 2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA), 1-5. <https://doi.org/10.1109/EFEA.2016.7748787>

Zhang, L et al. (2022). Research on the application of artificial intelligence technology in power metering condition monitoring. 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS), 1287-1293. <https://doi.org/10.1109/IC2ECS57645.2022.10088041>

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A HYBRID AI ALGORITHM FOR ENHANCING THE ACCURACY OF PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION PREDICTION**Soha SAMI**

Soha Sami, Master's Student, University of Tehran, Faculty of Aburaihan, Department of Technology and Agriculture, Tehran-Iran

Jafar MASSAH

Prof. Dr. Jafar Massah, University of Tehran, Faculty of Aburaihan, Department of Technology and Agriculture, Tehran-Iran

Mohammad HAJIAN

Mohammad hajian, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Water and Soil Engineering, Department of Biosystems Engineering, Gorgan, Iran

Tayyeb NAZGHELICHI

Dr. Tayyeb Nazghelichi, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Water and Soil Engineering, Department of Biosystems Engineering, Gorgan, Iran(Responsible Author: Tayyeb NAZGHELICHI)

Seyed Reza HASSAN-BEYGI

Prof. Dr. Seyed Reza Hassan-Beygi, University of Tehran, Faculty of Aburaihan, Department of Technology and Agriculture, Tehran-Iran

Abstract

Variable electricity generation by photovoltaic power plants can affect the stability of the power grid; therefore, accurate solar power forecasting is essential and can enhance system reliability. This research examines supervised and unsupervised methods integrated with deep learning for predicting photovoltaic power generation. Initially, a comprehensive dataset was compiled and developed using reliable sources, including data from 300 small power plants in Sydney, and weather-related information for the region of interest. Subsequently, three machine learning algorithms—GBR¹, RFR², and SVR³—were applied to the main dataset and datasets were separated based on unsupervised algorithms optimized using deep learning techniques. The performance of the models was evaluated using MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error), and RMSE (Root Mean Squared Error). After comparing and analyzing the results, the hybrid model designed demonstrated a prediction error reduction ranging from at least 10% to a maximum of 93% in error variables.

Keywords: Prediction, Clustering, Photovoltaic Power, Supervised Learning, Unsupervised Learning.

Introduction

Reliable estimates and predictions of the output power from photovoltaic (PV) systems play a crucial role in supporting the widespread integration of this technology into energy networks(Visser et al., 2023).

Given that solar systems experience uncertainty in power output due to fluctuating weather patterns, the importance of forecasting increases(Poti et al., 2023). This process is a prerequisite for evaluating various conditions for the construction of these power plants and allows for more accurate predictions, which can provide valuable insights for engineers and decision-makers. A proper and precise evaluation of the predicted power generation can aid in improving decisions related to the design, operation, and maintenance of PV plants.

¹ Gradient Boosting Regression Model

² Random Forest Regression Model

³ Support Vector Regression

In this regard, machine learning and deep learning models, utilizing their complex and powerful algorithms, have played a significant role in facilitating and improving the accuracy of predictions. These models can analyze large and complex datasets, uncover hidden patterns within the data, and provide accurate forecasts(Chandel et al., 2023).

Photovoltaic technologies are expected to play a significant role in future energy generation. In parallel, machine learning has gained prominence due to factors, such as advancements in computational hardware, data collection and storage, and data-driven algorithms(Sohani et al., 2022).

On the one hand, optimal and efficient solar energy development still faces challenges. These include issues related to efficiency, reliability, and the costs of installation and operation, all of which fundamentally rely on the need for advanced data analysis methods and machine learning to improve and optimize solar energy generation systems(Abualigah et al., 2022).

On the other hand, hybrid methods, which refer to combinations of more than one computational intelligence method or the optimization of one method using learning algorithms, can help reduce the issues associated with using single methods in large datasets and enhance system performance(Mekhilef et al., 2011). Thus, the main advantages of these methods are their scalability, reliability, and adaptability in large renewable energy datasets. Forecasting energy generation from renewable sources is critical, as accurate forecasting ensures better coordination with the grid and can mitigate the impact of fluctuations. Energy producers can also benefit from more accurate predictions(Das et al., 2018).

Renewable sources such as solar and wind energy are significantly unstable, and with the injection of renewable energy, maintaining system stability becomes challenging. Predicting solar power can improve system stability by providing estimates of future electricity production to system control engineers, and this can optimally affect energy dispatch from hydropower plants. Machine learning algorithms, particularly in time-series predictions and random forests, have shown excellent performance and can therefore be used for power prediction using weather parameters as model inputs(Goh et al., 2022).

Clustering photovoltaic power patterns is a key tool that provides information about the impact of integrating photovoltaic systems into the electrical grid without complex analyses and simulations. A study explored various clustering methods to determine the optimal number of clusters for photovoltaic power pattern datasets(Munshi & Yasser, 2016).

A case study based on measurements of an independent solar system and storage system with biogas power plants through anaerobic digestion was used to examine the usefulness of clustering results. The study concluded that three different clustering methods could determine the correct nominal capacity of a photovoltaic farm with acceptable energy storage capacity using 36 and 46 solar radiation profiles instead of 1457 radiation profiles(Lai et al., 2017).

In another study, anomaly detection and monitoring in photovoltaic energy management systems used mean-shift clustering for pre-classification and anomaly detection in solar radiation data. Group learning with a multilayer perceptron was employed, providing better results compared to single classifiers and offering improved accuracy and performance in anomaly detection(de Guia et al., 2020).

Previous studies have shown a significant gap in hybrid clustering-based algorithms to reduce prediction errors caused by various uncertainties. Therefore, this research explores and develops an algorithm to significantly reduce prediction errors. This research is jointly conducted by the Faculty of Agricultural Technology at the University of Tehran and the University of Agricultural Sciences and Natural Resources in Gorgan. This study aims to develop a hybrid clustering-based model that can reduce prediction errors in photovoltaic power forecasting, especially considering the uncertainties caused by unstable weather conditions. In this research, methods to address these challenges have been developed.

Materials and Methods

The methodology and steps of this research are based on examining the impact of clustering on the original and clustered datasets, implementing machine learning and deep learning algorithms, and evaluating their results in forecasting photovoltaic power generation. The present research has been conducted in a specific order and priority: initially, three main algorithms—SVR, RFR, and GBR—were implemented on both the

original and clustered datasets. Then, to validate and compare the models, several error metrics were used to assess performance.

Supervised learning includes two main types of algorithms: classification and regression, while unsupervised learning allows models to learn from data automatically without explicit instructions. This method includes four types of algorithms: clustering, association, anomaly detection, and artificial neural networks, with our primary focus being the examination of clustering and its related patterns.

The supervised learning methods examined in this research are as follows:

- **Gradient Boosting Regression (GBR):** Gradient Boosting is a powerful ensemble learning method that combines several weak models, typically decision trees, to create a stronger model. It works by making sequential updates and reducing errors in a gradient-based manner.
- **Random Forest Regression (RFR):** Random Forest is an ensemble learning algorithm based on combining multiple decision trees. It produces the final model by creating a "forest" of decision trees and combining their results through averaging.
- **Support Vector Regression (SVR):** Support Vector Regression is an extension of the Support Vector Machine (SVM) algorithm used for regression tasks. It aims to create a linear model in the feature space that predicts data with minimal error.

Figure 1 presents a complete and concise depiction of the execution steps of the project.

In this study, photovoltaic generation data and other information from 300 households in Sydney, measured in kilowatt-hours, were collected from the IPART⁴ website and analyzed using geographical data. The geographical coordinates of this region are 33.8688°S latitude and 151.2093°E longitude.

Subsequently, weather data from the Sydney area, including various weather conditions related to photovoltaic energy generation and consumption, were analyzed. This information included solar radiation, temperature, humidity, and other environmental factors. Using these data, a comprehensive dataset was created. Pearson's correlation coefficient was used to examine the relationships and interdependencies between the variables.

Pearson's correlation coefficient represents the degree and direction of the relationship between variables, and it helps identify and select the key variables that affect the target variable.

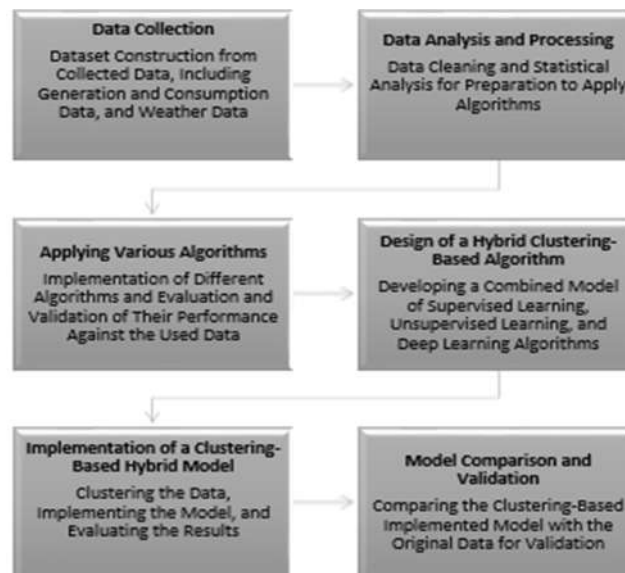


Figure 1. Steps of the Project Execution.

⁴ (Independent Pricing and Tribunal)

Based on the results obtained from these analyses, the parameters that had a significant direct or inverse impact on photovoltaic energy production were identified and selected, as shown in Figure 2, which is a heatmap. These parameters were then converted into a new dataset for photovoltaic energy production forecasting. This step is one of the most critical stages of data preprocessing for prediction. Incorrect variable selection can increase the prediction error.

Additionally, using this method for feature selection and minimizing the number of variables, the time required to execute the code and apply the model to the data can be reduced, leading to a more accurate and practical model with a lower cost function in most algorithms.

Moreover, focusing on influential features reduces the need for large amounts of data for prediction.

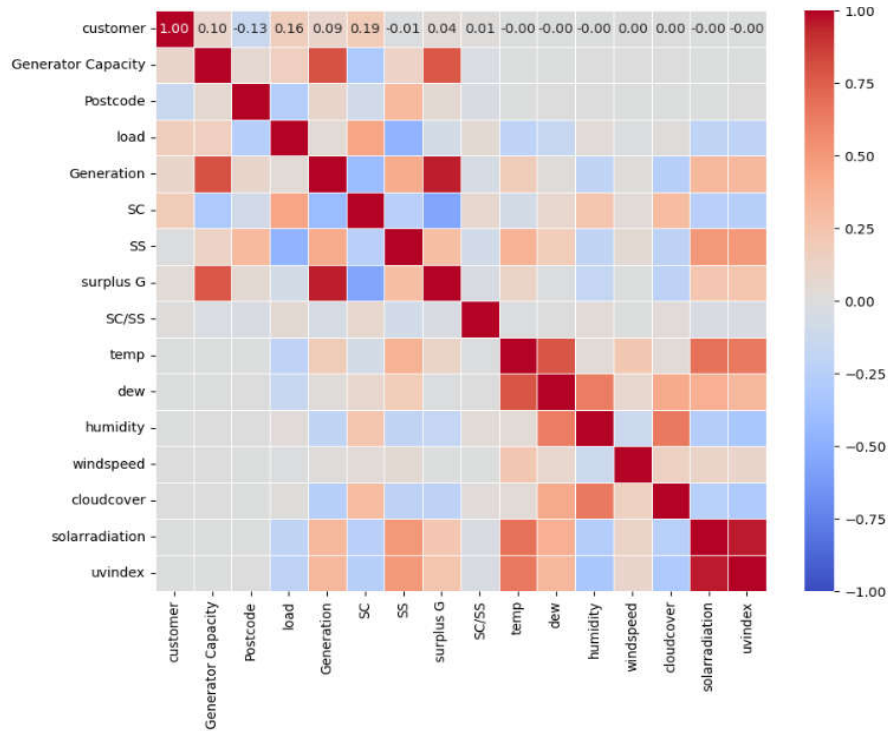


Figure 2. Correlation Analysis of Variables Display

The selected parameters for prediction included temperature, photovoltaic generation capacity, ultraviolet radiation index, solar radiation, and regional cloud coverage. The units of the utilized parameters are presented in Table 1. Ultraviolet radiation was considered a dimensionless parameter.

Table 1. Units of Utilized Parameters Display

Parameter	Unit of Measurement
Air Temperature (T)	Celsius (°C)
Precipitation (Precip)	Millimeters (mm)
Cloud Cover	Percentage (%)
Solar Radiation	Watts per square meter (W/m ²)
Solar Energy	Megajoules per square meter (MJ/m ²)
Actual Generation	Kilowatts per hour (KW/h)

2- Dataset Analysis and Data Preprocessing

After creating the final dataset, preprocessing and data preparation were performed. As shown in Table 2, all statistical information of the dataset was analyzed for preprocessing, and the data was prepared for applying the intended algorithms.

Table 2. Statistical Details of the Created Dataset

Parameter	Mean	Min	Max	Rows	Std Dev
Production Capacity	8.86	1	9.99	26,969	1.03
Actual Generation	6.82	0	67.69	26,969	5.96
Temperature	22.57°C	17.3°C	32°C	26,969	2.34°C
Precipitation	3.28 mm	0 mm	19.60 mm	26,969	10.81 mm
Cloud Cover	56.72%	4.6%	93.8%	26,969	25.32%
Solar Energy	25.89 MJ/m ²	2.8 MJ/m ²	34 MJ/m ²	26,969	6.56 MJ/m ²
Solar Radiation	299.77 W/m ²	95.6 W/m ²	318.5 W/m ²	26,969	75.87 W/m ²
Ultraviolet Index	8.87	3	10	26,969	1.83

3- Application of Algorithms on the Original Dataset

After standardizing the data, the three specified algorithms were implemented on the original dataset. The results obtained, optimized through iterative parameter tuning, were saved in their best-performing state to facilitate comparison with the clustered datasets.

4- Clustering the Data

Clustering is an unsupervised learning method in machine learning algorithms. Different clustering methods were tested to find the best performance among them. After multiple evaluations, clustering methods such as KNN (K-Nearest Neighbors), density-based clustering (DBSCAN), DBGMM (Density-Based Gaussian Mixture Model), GMM (Gaussian Mixture Model), and hierarchical clustering were considered. Among them, DBGMM exhibited the best performance based on the nature of the data.

In all clustering processes, the deep learning algorithm of Autoencoder was employed to enhance clustering performance and accuracy. The encoding technique helps the clustering algorithm better identify similarities and differences between the data, resulting in more accurate clusters. By reducing noise and dimensionality, Autoencoder increased the clustering accuracy and revealed hidden patterns in the data, leading to better results.

Before performing the clustering, Principal Component Analysis (PCA) was applied to reduce the dimensionality of the dataset. The results of this reduction were visualized in the plot shown in Figure 2. The dataset was divided into 10 distinct clusters, each with different sizes. Within each cluster, the data points were grouped based on their highest similarity to each other.

In Figure 3, the horizontal and vertical axes represent the summarized influential parameters, utilized for clustering and column reduction through PCA. For this study, clusters with more than 1,000 data points were selected for implementing the previous algorithms. Due to the homogeneity and consistency within these clusters, they were specifically analyzed for further evaluation.

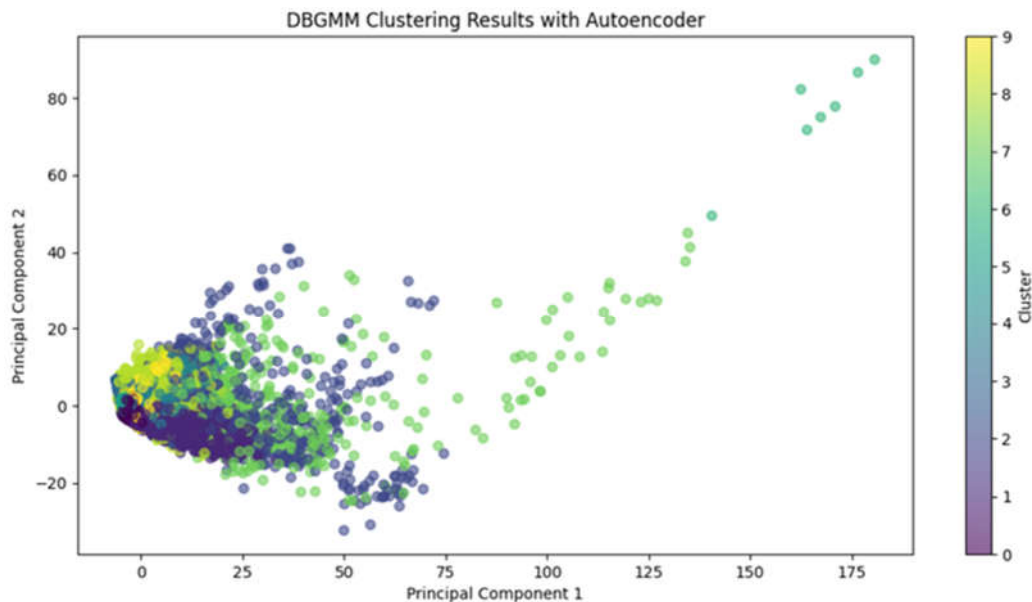


Figure 3. *Displaying Data Based on Clustering*

5-Application of Supervised Algorithms on Clusters Separated from the Original Dataset:

SVM, RF, and GBR algorithms were applied to the clustered data. After evaluating the results, the GBR algorithm was selected as the chosen algorithm for comparison between the original and clustered data. To better evaluate the results, experiments were conducted with different random sample sizes including 500, 600, 700, 800, 900, and 1000 samples in clusters 1, 2, 5, 6, and 7, which had more than 1000 data points. The results were then thoroughly analyzed and reviewed.

Findings and Discussion

After evaluating and analyzing 9 unsupervised algorithms and 3 supervised algorithms, and combining the results obtained from them, an effective hybrid algorithm⁵ was identified. This hybrid algorithm allows for a more detailed examination of the results and enables improved performance and accuracy of the analysis by applying the supervised algorithm to the original dataset. This hybrid approach leads to the optimization of analytical processes and increased reliability of the final results.

In a set of 500 random data points, as shown in Figure 4, improved performance in all error metrics was observed. Column 1 shows the results of the algorithm implementation in the entire dataset.

A reduction in MAE error was recorded, with a minimum decrease of 12% in cluster 6 and a maximum decrease of 50% in cluster 4. Additionally, the RMSE error metric had a maximum reduction of 76% in Cluster 4 and a minimum reduction of 40% in Cluster 6. Similarly, for RMSE error, a minimum reduction of 22% in Cluster 6 and a maximum reduction of 60% in Cluster 4 was noted.

⁵ A hybrid algorithm is a combination of two or more algorithms designed to improve performance.

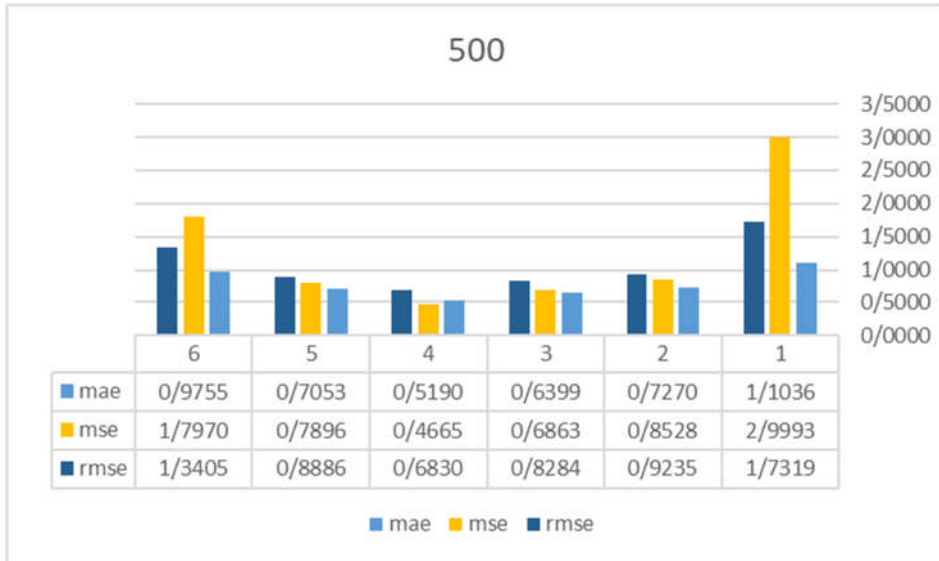


Figure 4 .Comparison of Clustered and Overall Data with 500 Random Data Points

The comparison was also conducted with 600 random data points, and the results were analyzed. In the hybrid algorithm, better results were obtained, and the errors under review decreased clearly in all clusters, as shown in Figure 5. This comparison was also conducted for random data sets of 700, 800, 900, and 1000 points, as shown in Figure 6, Figure 7, Figure 8, and Figure 9. Column 1 displays the results related to the application of the algorithm on the entire dataset, while the remaining columns correspond to the error analysis applied to the clustered data.

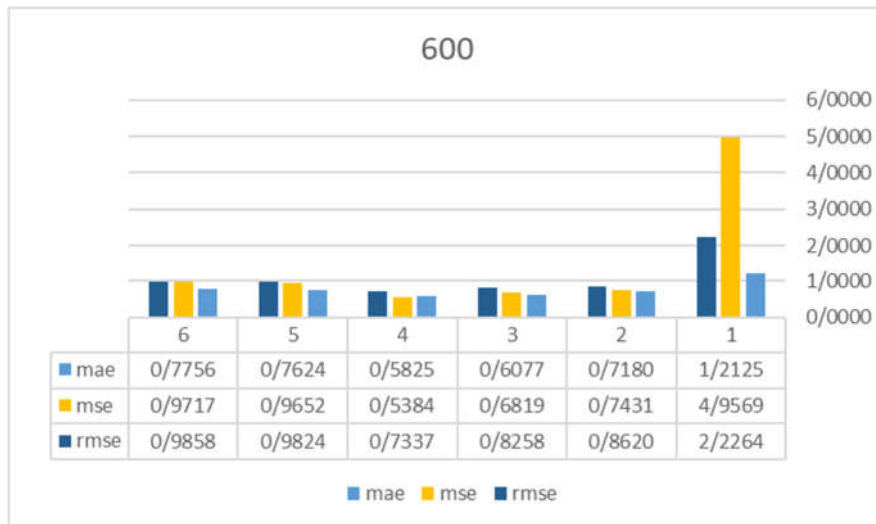


Figure 5 .Comparison of clustered data and the entire dataset with 600 random data points.

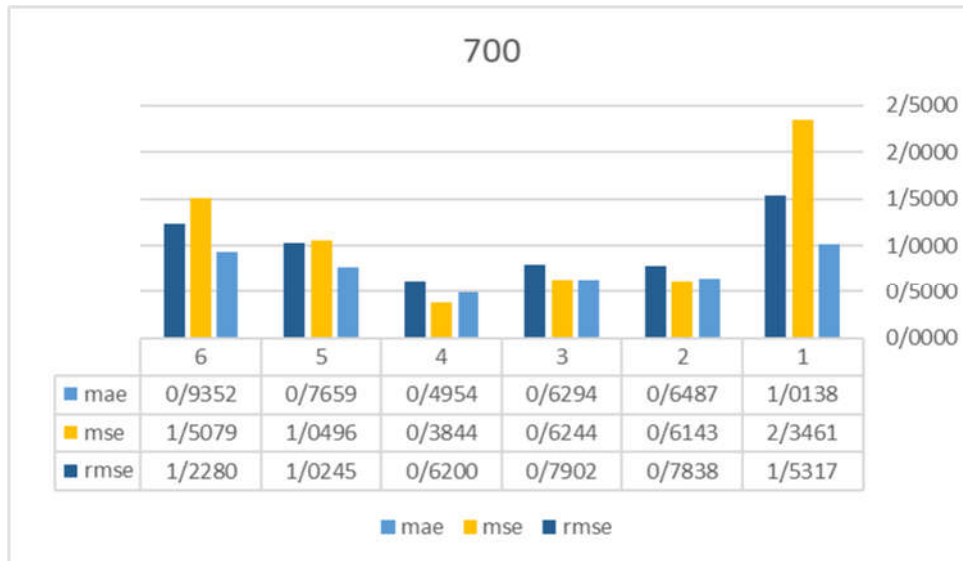


Figure 6. Comparison of clustered data and the entire dataset with 700 random data points.

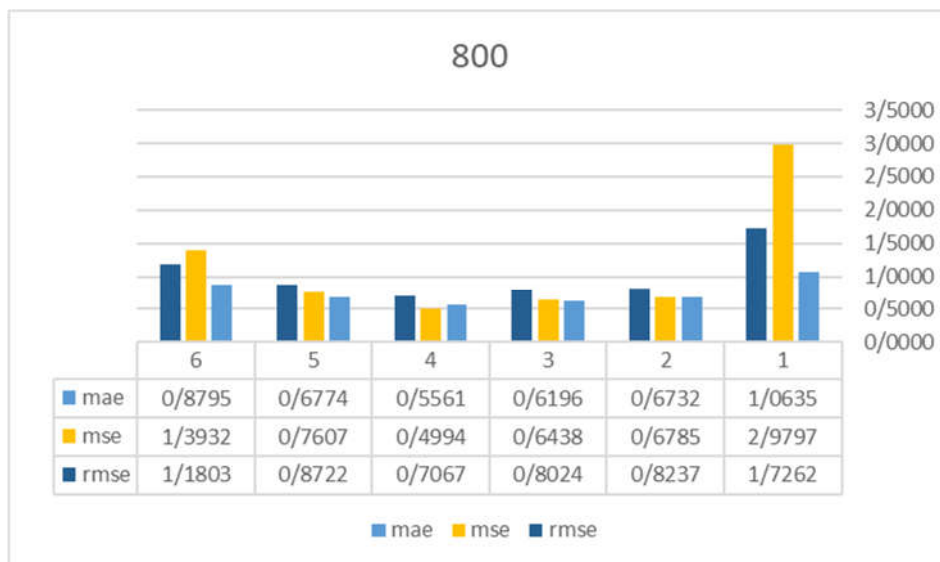


Figure 7. Comparison of clustered data and the entire dataset with 800 random data points.

With 800 random data points, the reduction in all three error types is visible across all examined clusters, ranging from a maximum of 45% to a minimum of 13%, as shown in Figure 7. This demonstrates the significant impact of the implemented model in reducing errors.

In Figure 8, with 900 random data points, the reduction in the MAE variable is observed to range from approximately 13% to 56%. Meanwhile, for the MSE variable, error reduction is observed in the range of a maximum of 80% to a minimum of 35%.

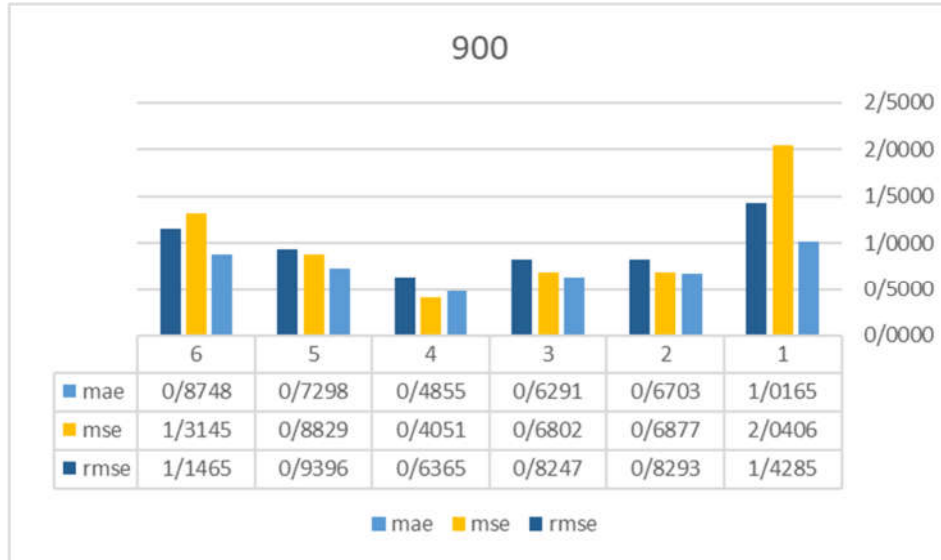


Figure 8. Comparison of clustered data and the entire dataset with 900 random data points.

In the final iteration, 1000 random data points were examined within the selected clusters. According to the results shown in Figure 9, error reduction in the MAE variable is observed in the range of approximately 13% to 56%. For the MAE variable, a minimum reduction of 46% in Cluster 6 and 93% in Cluster 4 was recorded. In the RMSE error variable, a minimum reduction of 15% and a maximum of 71% were observed and recorded.

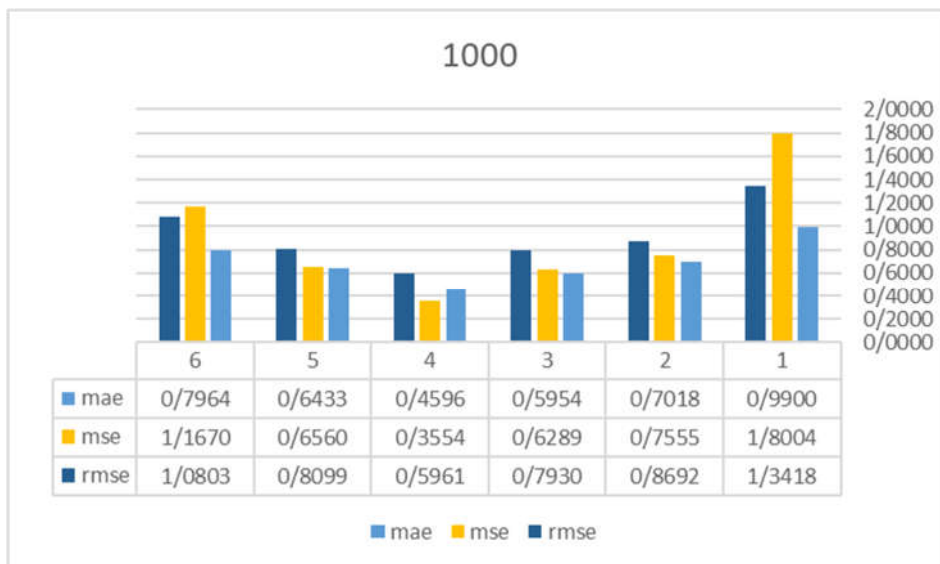


Figure 9. Comparison of clustered data and the entire dataset with 1000 random data points.

In all experiments, prediction error reduction was observed in all three variables under study. This error reduction indicates the effective performance of the hybrid algorithm used in the modeling process. Overall, the results obtained from this algorithm were evaluated as acceptable and effective.

General Conclusion

After a comprehensive review of supervised and unsupervised algorithms, an optimal hybrid algorithm was identified, combining deep learning, supervised learning, and unsupervised learning techniques. The model was then applied to a real dataset, which included weather and production data from 300 power plants. The results demonstrated that this approach significantly and meaningfully reduced the MSE, MAE, and RMSE errors across six iterations with random data. Compared to the original dataset, the accuracy of the hybrid model was validated with a high percentage of error reduction. This reduction in prediction errors has contributed to improving the accuracy of power plant production forecasts, playing a crucial role in the feasibility of establishing photovoltaic power plants.

References

- Abualigah, L., Zitar, R. A., Almotairi, K. H., Hussein, A. M., Abd Elaziz, M., Nikoo, M. R., & Gandomi, A. H. (2022). Wind, solar, and photovoltaic renewable energy systems with and without energy storage optimization: A survey of advanced machine learning and deep learning techniques. *Energies*, *15*(2), 578.
- Chandel, S. S., Gupta, A., Chandel, R., & Tadjour, S. (2023). Review of deep learning techniques for power generation prediction of industrial solar photovoltaic plants. *Solar Compass*, *8*, 100061.
- Das, U. K., Tey, K. S., Seyedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Idris, M. Y. I., Van Deventer, W., Horan, B., & Stojcevski, A. (2018). Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 912–928.
- de Guia, J. D., Concepcion, R. S., Calinao, H. A., Lauguico, S. C., Dadios, E. P., & Vicerra, R. R. P. (2020). Application of ensemble learning with mean shift clustering for output profile classification and anomaly detection in energy production of grid-tied photovoltaic system. *2020 12th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 286–291.
- Goh, H. H., He, R., Zhang, D., Liu, H., Dai, W., Lim, C. S., Kurniawan, T. A., Teo, K. T. K., & Goh, K. C. (2022). A multimodal approach to chaotic renewable energy prediction using meteorological and historical information. *Applied Soft Computing*, *118*, 108487.
- Lai, C. S., Jia, Y., McCulloch, M. D., & Xu, Z. (2017). Daily clearness index profiles cluster analysis for photovoltaic system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *13*(5), 2322–2332.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(4), 1777–1790.
- Munshi, A. A., & Yasser, A.-R. M. (2016). Photovoltaic power pattern clustering based on conventional and swarm clustering methods. *Solar Energy*, *124*, 39–56.
- Poti, K. D., Naidoo, R. M., Mbungu, N. T., & Bansal, R. C. (2023). Intelligent solar photovoltaic power forecasting. *Energy Reports*, *9*, 343–352.
- Sohani, A., Sayyaadi, H., Cornaro, C., Shahverdian, M. H., Pierro, M., Moser, D., Karimi, N., Doranehgard, M. H., & Li, L. K. B. (2022). Using machine learning in photovoltaics to create smarter and cleaner energy generation systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *364*, 132701.
- Visser, L., AlSkaif, T., Hu, J., Louwen, A., & van Sark, W. (2023). On the value of expert knowledge in estimation and forecasting of solar photovoltaic power generation. *Solar Energy*, *251*, 86–105.

INVESTIGATION OF THE FIRST ACCEPTOR LEVEL CREATED BY COPPER ATOMS IN THE ENERGY BAND OF A $Ge_{1-x}Si_x$ (18 AT. % SI) SOLID SOLUTION CRYSTAL

A.I. Hashimova

Sumgait State University Sumgait AZ 5001, Sumgait, Azerbaijan

Abstract

In this work, the first acceptor level created by copper atoms in the energy zone of a solid solution crystal (18 at. % Si) obtained by applying a control ring was studied. For this purpose, additional atoms of Cu were added by diffusion to the samples cut in the form of a parallelepiped from the single crystal obtained by the zone melting method. By creating suitable conditions for the regular distribution of Cu atoms in the entire volume of the samples, the temperature dependence of the Hall coefficient in the doped samples was studied. The activation energy of the acceptor level created by Cu additives in the forbidden zone was determined by investigating the resolution of the neutrality band of the crystal.

Keywords: crystal, neutrality, electron, temperature, concentration, single crystal

In order to determine the first acceptor level formed by copper in the $Ge_{1-x}Si_x$ crystal, the $Ge_{1-x}Si_x$ single crystal is doped with donor and acceptor type additives separately in the growth process, and then Cu is added to them by diffusion. In doubly doped samples, it is done by choosing the ratio of doping concentrations in such a way that each of the multiplet levels of copper can be separately active over a fairly wide temperature range. The temperature dependence of copper solubility in $Ge_{1-x}Si_x$ solid solution was previously determined in order to ensure that the ratio of additive concentrations could be correctly selected. This dependence is approximately linear and retrograde near the melting temperature. In order to observe the donor level of copper, the crystal is doped with indium, which creates a shallow acceptor level in addition to copper. Under these conditions, the donor centers of Cu behave as pseudo-acceptor levels by donating their electrons to the centers formed by In. The first acceptor level of Cu was studied in \bar{p} -type samples.

It is more convenient to observe and study the acceptor levels of foreign atoms in a crystal doped with another element. However, since it is difficult to grow a single crystal with a specific conductivity, it is possible to study the first acceptor level of copper in p-type crystals, where the concentration of shallow acceptor centers in the crystal is much smaller than the concentration of copper. For this purpose, Ge crystal doped with *In* and *Sb* atoms was used in the work. Figure 1 shows the temperature dependence of the Hall coefficient for one such example. Hall coefficient and electrical conductivity were measured by the compensation method in the same process in the temperature range of $77 \div 500 K$. Dependence 1 in the figure was obtained before Cu addition atoms were added to the composition, and 2 dependence was obtained after Cu addition. It can be seen from the figure that before doping with copper atoms, the Hall coefficient remains practically constant in the temperature interval $77 \div 350 K$, since the dopant levels in such a sample are depleted at liquid nitrogen temperature. It can be seen from the graph that after the addition of copper dopant atoms then (2 dependence) 3 different intervals are observed in the temperature dependence of the Hall coefficient. At low temperatures ($77 \div 140K$), the Hall coefficient remains constant, and at intermediate temperatures ($140 \div 250K$), the Hall coefficient decreases with increasing temperature and stabilizes again at a temperature close to room temperature, reaching the saturation value. It is clear from this that a new additive level has formed in the sample, which strongly affects its electrical properties. This level of copper atoms It is the first acceptor level created in the Ge-Si system. During the addition, the second and third acceptor levels also appear in the crystal.

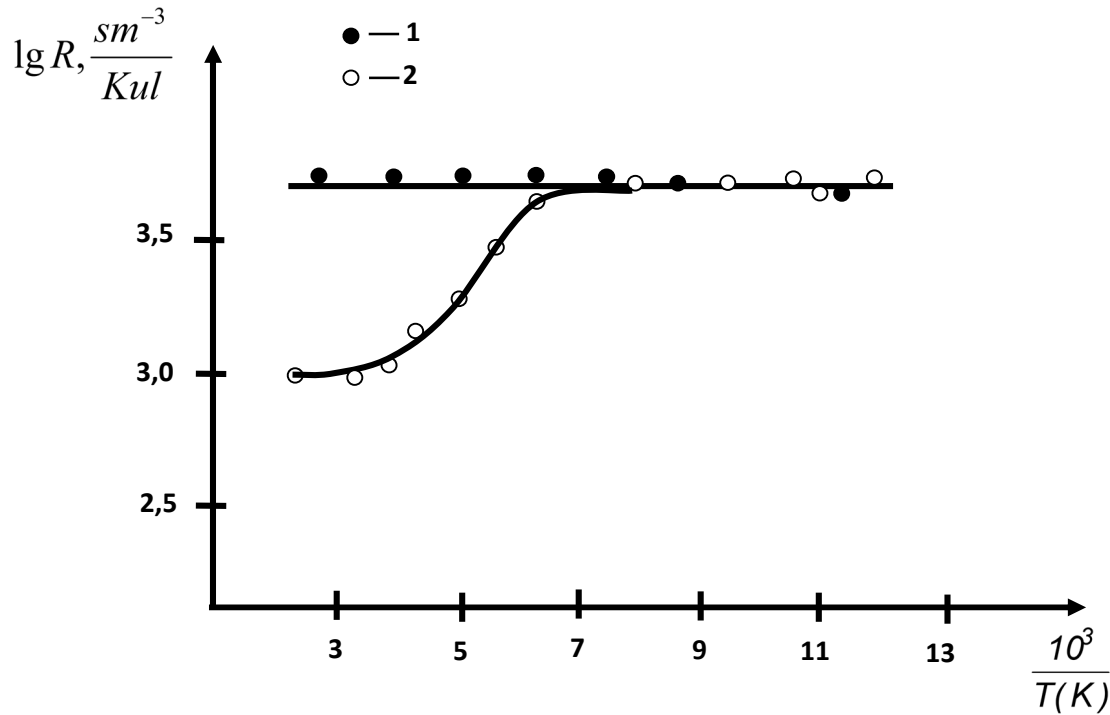


Fig. 1. Additive Cu atom is not injected(1) and additive atom injected (2) temperature dependence of the Hall coefficient for the $Ge_{1-x}Si_x$ crystal

Let us examine the neutrality equation of the crystal to determine the energy of the first additional level formed by copper in the $Ge_{1-x}Si_x$ crystal. Since the shallow acceptor levels are practically completely depleted at liquid nitrogen temperatures, the conductivity is mainly determined by the contribution of these levels. At low temperatures, the effect of Cu additions on conductivity is negligible. In this range of temperature, the Hall coefficient remains constant and the concentration of holes is close to the concentration of shallow acceptor levels. As the temperature increases in the intermediate temperature interval, electrons from the valence band gradually move to the first acceptor level of copper and the level is filled with electrons. In the upper temperature range, the Hall coefficient remains constant again. In this case, the concentration of holes is equal to the sum of the concentration of shallow acceptor centers and the concentration of the first acceptor level of copper. The neutrality equation of the crystal for the intermediate interval is as follows:

$$p = N_a + (N_{Cu} - n_{Cu}^I) \quad (1)$$

Here, the left side is positive and the right side is the amount of negative charges per unit volume of the crystal. p – the concentration of free holes in the valence zone, N_a – the concentration of shallow acceptor centers, N_{Cu} – the concentration of the first acceptor level of copper, n_{Cu}^I – the concentration of neutral centers in the first acceptor level of copper.

$$p = N_v \exp\left(-\frac{F + \Delta E_g}{kT}\right) \quad (2)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (3)$$

$$n_{Cu1} = \frac{N_{Cu}}{\frac{1}{\gamma_1} \exp\left(\frac{F + \Delta E_g - \varepsilon^I_{Cu}}{kT}\right) + 1} \quad (4)$$

Burada, ΔE_g – the width of the forbidden zone, F – Fermi level, ε^I_{Cu} – activation energy of the first acceptor level of copper, m_p^* – effective mass of holes calculated from the density of states, γ_1 – the statistical weight of the first level of copper, T – absolute temperature, k – Boltzmann's constant, h – Planck's constant. Taking expressions (2)-(4) into account in the $C_p(t) = C_0 \cdot \frac{t}{t_1}$ equation, we make certain transformations and simplifications and get:

$$pT^{-3/4} = C \exp\left(-\frac{\varepsilon^I_{Cu}}{2kT}\right).$$

$$\lg(pT^{-3/4}) = \lg C - \frac{0,4343\varepsilon^I_{Cu}}{2 \cdot 10^3 k} \cdot \frac{1000}{T} \quad (5)$$

As can be seen, the dependence of $\lg(pT^{-3/4})$ on $\frac{1000}{T}$ gives a straight line, and from the slope of this straight line the energy corresponding to the first additional level:

$$\varepsilon^I_{Cu} = 0,4 \text{tg} \alpha \text{ (eV)}$$

Here $\text{tg} \alpha$ is the slope of the straight line.

If we write the value of k from (5) instead of $\left(k = 8,625 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right)$ and perform simple calculations $\text{tg} \alpha = 2,518 \varepsilon^I_{Cu}$ and from here we get (6); we will buy to increase the calculation accuracy ε^I_{Cu} , such a parameter p' is used, which covers a wider interval that can be determined in a simple way.

$$p' = \frac{p^2 - pN_a}{(N_a + N_{Cu}) - p}$$

Here, p is the current concentration of holes in the temperature range where the level is active. N_a is determined by the saturation value of the Hall coefficient at low temperature, and the sum $(N_a + N_{Cu})$ is determined by the saturation value at high temperature.

The p' parameter, on the other hand, is expressed as:

$$p' = \frac{N_v}{\gamma_1} \exp\left(-\frac{\varepsilon^I_{Cu}}{kT}\right)$$

From here, the activation energy of the first level of Cu is expressed in this form from the linear dependence of $\lg(p'T^{-3/2}) - \frac{1000}{T}$.

$$\varepsilon^I_{Cu} = 0,2 \text{tg} \alpha'$$

Figure 2 shows the dependence of $\lg(p'T^{-3/2})$ on $\frac{1000}{T}$ for the first acceptor level of copper.

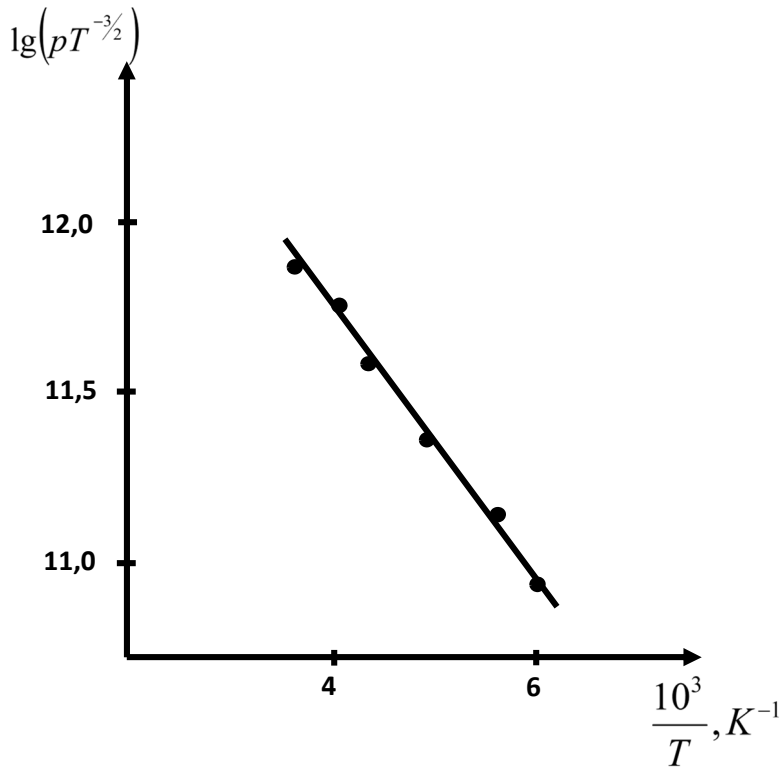


Fig.2 Dependence of $\lg(p'T^{-3/2})$ on $\frac{1000}{T}$

The activation energy calculated from the inclination angle of dependence for the first acceptor level of Cu is equal to $\varepsilon_{Cu}^I = 0,11 eV$ in the case where the amount of Cu-additive in the crystal is equal to 18 at.%.

References

1. A. I. Hashimova et al., Int. J. Mod. Phys. B 34, 2050178 (2020).
2. Brunco, D. P. et al. Germanium MOSFET devices: Advances in materials understanding, process development, and electrical performance. J. Electrochem. Soc. 155, H552 (2008)
3. Sze, M. S. Semiconductor Devices, Physics and Technology (Wiley, 1985).
4. Huang, S.; Li, C.; Zhou, Z.; Chen, C.; Zheng, Y.; Huang, W.; Lai, H.; Chen, S. Depth-dependent etch pit density in Ge epilayer on Si substrate with a self-patterned Ge coalescence island template. Thin Solid Films 2012, 520, 2307–2310.
5. Benedikovic, D.; Aubin, G.; Haetmann, J.-M.; Amar, F.; Le Roux, X.; Alonso-Ramos, C.; Cassan, É.; Marris-Morini, D.; Boeuf, F.; Fédéli, J.-M.; et al. Silicon-Germanium Avalanche Receivers with fJ/bit Energy Consumption. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2022, 28, 3802508.
6. V. I. Tagirov, S. I. Tagirov, A. A. Kuliev, and M. G. Shakhtakhtinskii, Sov. Phys. Crystallogr. **10**, 632 (1965)

THE FINANCIAL AND ENERGY SECURITY IMPLICATIONS OF IRAN'S MISSILE DEVELOPMENT ON REGIONAL ECONOMIC STABILITY IN THE MIDDLE EAST**¹Abdulgaffar Muhammad**

Independent Researcher Ahmadu Bello University, Zaria

²Halima Abdulaziz

Department of International Studies Ahmadu Bello University, Zaria

Anthony Kolade Adesugba

Department of Business Administration Ahmadu Bello University, Nigeria

⁴ Ibrahim Mallam Fali

Department of Accounting University of Calabar

⁵ Anthony Unyime Abasido

Department of Business Administration Ahmadu Bello University

Abstract

This study investigates the financial implications of Iran's missile development on regional security and economic stability in the Middle East. Focusing on key missile systems such as the Shahab-3, Ghadr-110, and Fateh-313, the research explores the broader economic consequences of Iran's military capabilities, particularly in the context of geopolitical tensions. Iran's missile program, driven by strategic defense needs, has had significant economic ramifications both domestically and regionally. The analysis covers how missile advancements impact Iran's defense budget, exacerbate economic sanctions, and influence global oil prices and financial markets. Furthermore, the study examines how these developments affect investor confidence and economic security in neighboring states. By exploring the intersection of military power and economic outcomes, this paper highlights the ongoing trade-offs between national security and economic growth in Iran, offering insights into the broader regional security dynamics shaped by missile deployment.

Keywords: Iranian missile development, regional security, economic stability, military expenditure, oil prices, geopolitical tensions

1. Introduction

Iran's missile development program has grown significantly since its inception in the late 20th century, positioning it as one of the most formidable missile arsenals in the Middle East. The Iranian missile program was initially motivated by the need for deterrence and self-defense, especially following the Iran-Iraq War in the 1980s. Over the years, Iran has invested heavily in ballistic and cruise missile technology, with a particular focus on medium- and long-range ballistic missiles. These systems provide Iran with the ability to project power across the region, reaching targets in neighboring Gulf states, Israel, and even parts of Europe.

The **Shahab series**, particularly the **Shahab-3**, represents a major milestone in Iran's ballistic missile development. This missile has a range of approximately 2,000 kilometers, allowing Iran to target key strategic locations across the Middle East (Taleblu & Behnam, 2020). Additionally, advancements in solid-fuel missiles, such as the **Fateh-313** and **Ghadr-110**, have enhanced the accuracy, mobility, and operational readiness of Iran's missile forces (Cordesman & Toukan, 2014).

The geopolitical context of the Middle East is deeply intertwined with the development and deployment of Iranian missiles. The region, characterized by long-standing rivalries, sectarian divisions, and competition for dominance, has seen Iran's missile capabilities as both a symbol of national strength and a tool for deterrence. Iran's missile program is a key component of its asymmetric warfare strategy, compensating for its relatively limited air force capabilities.

Moreover, Iran's missile development has not occurred in isolation; it has influenced, and been influenced by, broader geopolitical dynamics. For instance, the missile program has exacerbated tensions between Iran and its regional rivals, particularly Saudi Arabia and Israel. These nations perceive Iran's missile capabilities as a direct threat to their security, leading to a regional arms race (Katzman, 2021).

Economically, Iran's missile program has been both a burden and a tool of leverage. On the one hand, international sanctions, particularly from the United States and its allies, have severely impacted Iran's economy. The development and proliferation of missile technology, in defiance of international pressure, have led to additional sanctions, further isolating Iran from global financial markets (Gordon, 2019). On the other hand, Iran's missile capabilities allow it to exert influence over the global oil supply, particularly through threats to close the Strait of Hormuz, a critical chokepoint for global oil shipments (Erdbrink, 2018).

This study aims to explore the financial and economic implications of Iran's missile development on both its domestic economy and the broader Middle East. Specifically, it seeks to examine how Iran's missile capabilities influence defense spending, foreign policy, and the economic security of neighboring states. Additionally, the study will investigate the impact of Iranian missile development on global financial markets, particularly with respect to oil prices and energy security.

The scope of the study will include an analysis of Iran's missile arsenal, the economic trade-offs associated with military spending, and the reactions of regional and global actors to Iran's missile advancements. Through this lens, the study will offer insights into the complex interplay between military power, economic stability, and geopolitical strategy in one of the world's most volatile regions.

2. Iran's Missile Arsenal: Range, Capabilities, and Implications

Types of Missiles (Ballistic, Cruise, Short-Range, etc.)

Iran has developed a diverse missile arsenal over the years, consisting of ballistic missiles, cruise missiles, and short-range tactical systems. These missile types serve different strategic and tactical purposes within Iran's military doctrine, enabling Tehran to enhance its defensive and offensive capabilities.

Ballistic Missiles: The backbone of Iran's missile forces is its arsenal of ballistic missiles. These include short-range, medium-range, and intermediate-range ballistic missiles (SRBMs, MRBMs, and IRBMs). The **Shahab** series, particularly the **Shahab-3**, is one of the most prominent MRBMs, with a range of up to 2,000 kilometers, allowing it to target locations across the Middle East, including Israel and parts of Europe (Hosseini, 2019). Iran has also developed the **Sejjil** missile, a solid-fueled MRBM with greater mobility and faster launch capabilities than its liquid-fueled counterparts (Eisenstadt, 2016).

Cruise Missiles: Iran has also invested heavily in developing cruise missile technology, which offers greater flexibility in targeting. Cruise missiles, such as the **Soumar**, have a range of approximately 2,500 kilometers, providing Iran with the ability to launch precision strikes against both naval and land-based targets (Elleman, 2020). These missiles are low-flying and highly maneuverable, making them harder to detect and intercept compared to ballistic missiles.

Short-Range Missiles: In addition to long-range systems, Iran maintains a substantial inventory of short-range missiles, such as the **Fateh-110** and its variants. These missiles are primarily designed for tactical use in regional conflicts and have been used by Iran's allies and proxies in the region, including Hezbollah in Lebanon and the Houthi rebels in Yemen (Jones, 2021). The **Fateh-110** has a range of up to 300 kilometers and is known for its accuracy and quick deployment capabilities.

Technological Advancements in Iranian Missiles

Iran's missile technology has evolved significantly, particularly in terms of range, accuracy, and payload capacity. Initially reliant on foreign assistance, especially from North Korea and China, Iran has now developed a largely indigenous missile production capability (Eisenstadt, 2016). This self-sufficiency in missile production has allowed Iran to circumvent international arms embargoes and sanctions, maintaining and expanding its missile arsenal despite external pressures.

A key advancement in Iran's missile program has been the shift from liquid-fueled to **solid-fueled** missiles. Solid-fueled missiles, such as the **Sejjil-2** and **Fateh-313**, offer several advantages, including faster launch times, greater mobility, and less vulnerability to preemptive strikes. This makes Iran's missile forces more flexible and resilient in a conflict scenario (Jones, 2021).

Another significant development is the improvement in missile **guidance systems**. Iran has made strides in increasing the accuracy of its missiles, transitioning from systems with rudimentary targeting to those capable of hitting targets with precision. This is particularly important for Iran's cruise missiles, which are designed to strike high-value targets, such as military bases and critical infrastructure (Elleman, 2020). The integration of advanced guidance systems into Iran's ballistic and cruise missiles represents a major leap in its military capabilities.

Strategic Importance of Iran's Missile Program

The strategic importance of Iran's missile program lies in its role as a **deterrent** and a tool for **asymmetric warfare**. Lacking a strong conventional air force, Iran relies on its missile capabilities to deter regional adversaries, including Israel, Saudi Arabia, and the United States. The ability to strike distant targets with ballistic and cruise missiles enhances Iran's strategic reach, providing a counterbalance to the superior airpower of its rivals (Hosseini, 2019).

Moreover, Iran's missile program is closely tied to its regional influence, particularly through its support of non-state actors. Iran has supplied short-range missiles and rocket systems to groups such as Hezbollah, Hamas, and the Houthis, extending its influence across the Middle East and threatening adversaries through proxy forces (Jones, 2021). This network of allied groups armed with Iranian missile technology presents a significant challenge to the stability of the region.

The missile program also gives Iran the ability to threaten critical infrastructure, particularly in the energy sector. The **Strait of Hormuz**, through which a large portion of the world's oil supply flows, is vulnerable to Iranian missile strikes. In times of heightened tension, Iran has leveraged this threat to deter foreign intervention and influence global oil markets (Elleman, 2020).

In summary, Iran's missile arsenal is a crucial component of its national defense and foreign policy strategy. The technological advancements in its missile systems, combined with the strategic importance of these capabilities, make Iran a formidable player in the Middle East's security landscape.

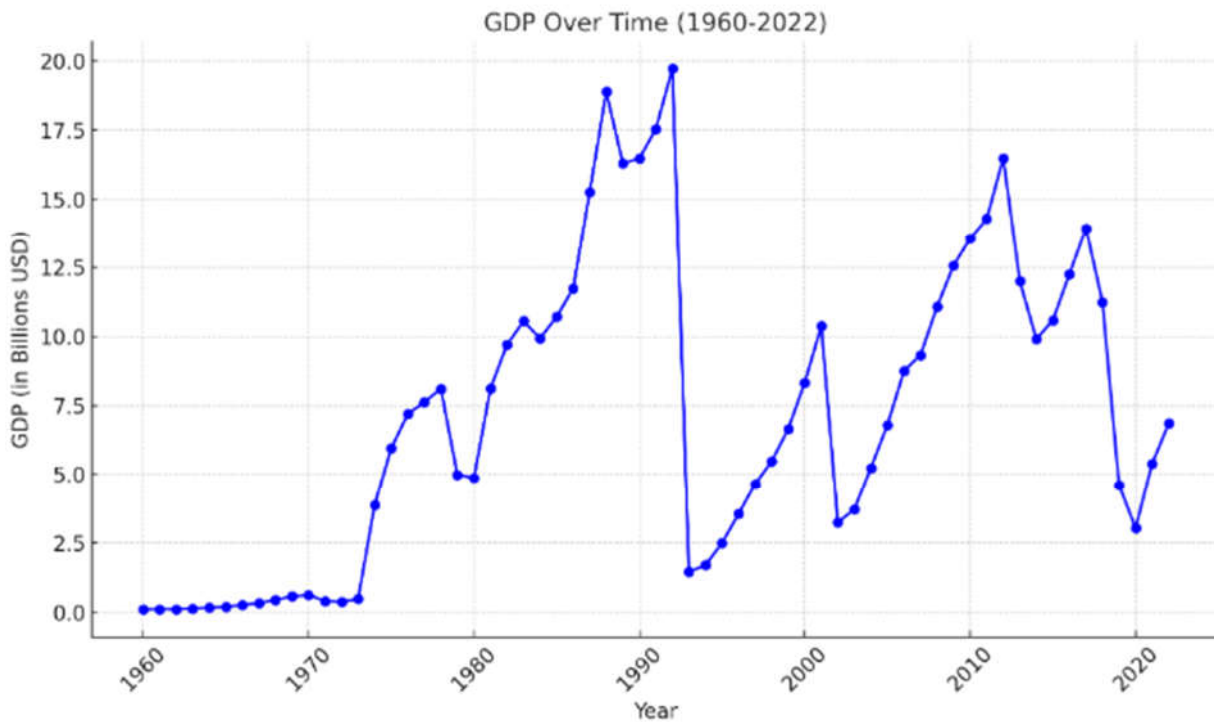
3. Economic Impact of Missile Development on Iran's Domestic and Foreign Policy

Military Expenditure and Defense Budget

Iran's missile development program is a significant component of its overall defense strategy, which is reflected in the country's military expenditure. Over the years, Iran's defense budget has fluctuated, influenced by external pressures, economic sanctions, and changing geopolitical realities. According to data from Macrotrends, Iran's military spending reached **\$6.85 billion** in 2022, accounting for **2.59%** of the country's Gross Domestic Product (GDP) (Macrotrends, 2024).

Historically, Iran's defense budget has seen significant variation. For instance, in **2017**, military spending peaked at **\$13.93 billion**, representing **2.84%** of GDP. This high level of expenditure coincided with increased regional tensions and a renewed focus on missile development in the face of international isolation (Hosseini, 2019). However, economic challenges, including sanctions and domestic financial strains, forced Iran to reduce military expenditure in subsequent years, with spending dropping to **\$5.39 billion** in 2021, or **2.19%** of GDP.

Iran's investment in missile technology, despite economic constraints, underscores its prioritization of defense and deterrence capabilities. Ballistic and cruise missiles offer Iran a relatively cost-effective means of maintaining strategic leverage, particularly against adversaries like Israel and Saudi Arabia. This focus on missile development reflects the country's reliance on asymmetric warfare strategies, where conventional military inferiority is compensated by missile threats (Elleman, 2020).



The Role of Sanctions and Economic Pressures

International sanctions, particularly those imposed by the United States, have profoundly impacted Iran's economy, affecting both its military capabilities and civilian sectors. Following the U.S. withdrawal from the Joint Comprehensive Plan of Action (JCPOA) in 2018, renewed sanctions targeted Iran's oil exports and financial transactions, which significantly reduced government revenues. The economic pressures have had a direct effect on Iran's defense budget and its ability to fund missile development (Erdbrink, 2018).

Despite these sanctions, Iran has managed to continue developing its missile capabilities, primarily by relying on domestic expertise and circumventing international restrictions through illicit channels (Eisenstadt, 2016). The missile program is seen by Tehran as a crucial component of its defense strategy, particularly as sanctions weaken other areas of the military, such as its conventional air force. The ongoing development of missile systems, even under financial constraints, illustrates Iran's commitment to maintaining a credible deterrent against foreign intervention.

Sanctions have also shaped Iran's foreign policy by pushing it closer to non-Western powers such as Russia and China. These alliances have provided Iran with technical assistance and equipment, enabling continued advancements in missile technology. Moreover, Iran's military exports to proxy groups in the region, including Hezbollah and the Houthis, have increased, allowing Tehran to project influence without directly engaging in conflict (Jones, 2021).

Trade-Offs Between Military Spending and Economic Growth

The heavy emphasis on military spending, particularly on missile development, has created significant trade-offs for Iran's domestic economy. Resources allocated to defense reduce the funds available for crucial sectors such as healthcare, education, and infrastructure. This imbalance is particularly evident during periods of economic downturn, such as those caused by sanctions or fluctuations in global oil prices (Gordon, 2019).

Iran's economic growth has been hampered by the need to prioritize military expenditures over domestic investment. The defense budget's share of GDP has remained relatively high, even during times of economic hardship, indicating that the regime places a higher priority on security and deterrence than on immediate economic stability. For example, during the 2010s, as sanctions intensified and the economy contracted, Iran maintained substantial defense spending, with **\$12.26 billion** allocated in **2016** (Macrotrends, 2024).

While the missile program bolsters Iran's strategic position, it also contributes to a cycle of economic stagnation, where military spending diverts resources from productive sectors of the economy. This trade-off has long-term implications for Iran's ability to modernize its economy and improve the quality of life for its population.

In conclusion, Iran's missile development has had profound economic impacts, both domestically and in the context of its foreign policy. The substantial military expenditure, despite economic constraints and sanctions, highlights the regime's commitment to maintaining its strategic capabilities. However, this prioritization comes at a significant cost to economic growth and domestic welfare, raising questions about the sustainability of such an approach in the long term.

4. Financial Markets, Oil Prices, and Regional Security

Impact of Iranian Missiles on Regional Financial Stability

The Iranian ballistic missile attack on Israel has far-reaching implications for regional financial stability. Military conflicts in the Middle East, particularly between key regional powers like Iran and Israel, create heightened investor uncertainty. The October 1 missile attack intensified concerns about regional security, prompting shifts in financial markets as investors anticipated potential escalations in conflict. Stock markets across the Middle East saw short-term volatility as the attack raised fears of broader instability, especially in countries reliant on foreign investments and exports. Investors tend to adopt a risk-averse stance during such periods, reallocating assets away from emerging markets, particularly those within conflict zones, toward safer options like U.S. treasuries and gold (CNN, 2024). Additionally, the financial systems of neighboring countries are affected by disrupted trade routes, increased military spending, and heightened inflationary pressures as governments brace for possible broader economic repercussions.

Influence on Oil Prices and Global Energy Markets

Iran's missile attacks immediately impacted oil prices, given the country's strategic position as a major oil producer and its influence over critical shipping routes like the Strait of Hormuz. When conflict threatens energy supply chains, oil prices tend to surge in response to fears of production disruptions or military blockades. Following the attack, Brent crude oil prices rose as markets speculated on the risk of further conflict that could disrupt the global supply of oil. Historically, tensions in the Middle East have significant ripple effects on global energy markets, leading to price hikes and supply shocks (Axios, 2024). This is particularly true when major oil-producing nations are involved, as their ability to maintain regular output is jeopardized. Increased prices exacerbate inflationary pressures worldwide, particularly in energy-dependent regions such as Europe and Asia.

Responses from Middle Eastern Economies and International Investors

Middle Eastern economies responded to the missile attack with a mixture of caution and diplomatic efforts aimed at preventing further destabilization of the region. Gulf countries, which maintain economic ties with both Western nations and Iran, were notably concerned about the potential for expanded military conflict, as this could disrupt their own energy sectors and financial markets. In particular, economies like the United Arab Emirates and Saudi Arabia, which rely heavily on oil exports, sought to ensure continuity in energy supply to maintain investor confidence and prevent economic downturns (IISS, 2024).

On a global scale, international investors monitored the situation closely, with some divesting from Middle Eastern assets as a precaution. Countries with significant trade relationships with Israel and Iran, such as China and Russia, urged diplomatic resolutions to avoid prolonged conflict. The reactions from financial markets and investors reflected broader concerns about geopolitical risks associated with military actions in the region, especially in an environment where energy markets are already facing pressures from other global events like the war in Ukraine (The Guardian, 2024).

5. Visual Representation of Iranian Missile Systems

a. Detailed Diagrams and Technical Breakdown of Key Missiles

Below are the diagrams and technical details of three key Iranian missile systems: **Shahab-3**, **Ghadr-110**, and **Fateh-313**.



Shahab-3

- **Range:** 1,280 - 1,930 km (796 - 1,199 miles)
- **Payload Capacity:** 760 - 1,200 kg
- **Launch Platform:** Mobile launchers

The Shahab-3, a medium-range ballistic missile (MRBM), is one of Iran's longest-serving missile systems.

Ghadr-110

- **Range:** 2,000 - 2,500 km (1,243 - 1,553 miles)
- **Payload Capacity:** 700 - 1,000 kg
- **Launch Platform:** Mobile platforms (can be launched from various terrains)

Ghadr-110 is a development of the Shahab series and represents Iran's advances in MRBM technology. With an increased range and improved accuracy, it is capable of reaching distant targets, including Israel and parts of Europe.

Fateh-313

- **Range:** 500 km (311 miles)
- **Payload Capacity:** 450 kg
- **Launch Platform:** Mobile launchers, compatible with road-mobile systems

The Fateh-313 is a solid-fuel short-range ballistic missile (SRBM) that Iran uses for precision strikes in regional conflicts. It's known for its quick deployment capabilities and enhanced accuracy compared to older systems.

b. Analysis of Missile Range, Payload Capacity, and Launch Platforms

1. **Shahab-3:**

- Its medium-range capability allows it to reach strategic targets in Israel, Saudi Arabia, and other Gulf nations.
- The missile can carry a heavy payload, making it versatile for both conventional and unconventional warheads.
- Its mobility increases survivability, as it can be launched from multiple locations and is harder to detect.

2. **Ghadr-110:**

- With its extended range, Ghadr-110 poses a threat to regional stability, capable of striking targets deep within enemy territory.
- The missile's payload flexibility allows it to deliver conventional and potentially nuclear warheads, which elevates its strategic importance.
- Ghadr-110's road-mobile launch platform enhances its operational readiness, allowing it to be quickly deployed in response to threats.

3. **Fateh-313:**

- The Fateh-313's shorter range limits its reach to more immediate targets in the region, such as U.S. bases in the Persian Gulf or neighboring Arab countries.
- Its lighter payload is suited for precision strikes rather than massive destruction, but it provides critical tactical advantages in local conflicts.
- This missile's mobility allows it to be used in rapid, short-notice deployments, enhancing Iran's tactical missile strike capabilities.

c. Strategic Implications of Missile Deployments

The deployment of these missile systems has significant strategic implications for regional security and military balances:

- **Shahab-3** and **Ghadr-110** represent Iran's ability to project power beyond its borders, particularly towards Israel and Gulf Cooperation Council (GCC) countries, thereby enhancing its deterrence and offensive capabilities.
- The increased precision of **Fateh-313** strengthens Iran's ability to conduct targeted strikes against military installations or infrastructure in nearby nations, including U.S. bases.
- These systems collectively form part of Iran's broader asymmetric warfare strategy, where missile capability compensates for other military deficiencies, serving both as a deterrent and as a tool for power projection in conflicts with adversaries.

References

Cordesman, A. H., & Toukan, A. (2014). Iran's Rocket and Missile Forces and Strategic Options. Center for Strategic and International Studies.

Erdbrink, T. (2018, July 25). Iran's Military Threatens to Block Key Oil Route, as U.S. Tensions Rise. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2018/07/25/world/middleeast/iran-military-threatens-to-block-key-oil-route.html>

Gordon, M. R. (2019, September 17). U.S. Accuses Iran of 'State-on-State' Attack on Saudi Oil Site. *The Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/articles/u-s-accuses-iran-of-state-on-state-attack-on-saudi-oil-site-11568725775>

Katzman, K. (2021). Iran's Foreign and Defense Policies. Congressional Research Service.

- Taleblu, B., & Behnam, R. (2020). *Iran's Ballistic Missiles: The Strategic Context*. Foundation for Defense of Democracies.
- Eisenstadt, M. (2016). *The Role of Missiles in Iran's Military Strategy*. Washington Institute for Near East Policy.
- Elleman, M. (2020). *Iran's Ballistic Missile Program: The Impact on Regional Security and U.S. Policy*. International Institute for Strategic Studies.
- Hosseini, S. (2019). *Iran's Ballistic Missile Capabilities: Implications for the Middle East*. *Middle Eastern Studies*, 55(4), 529-548.
- Jones, S. G. (2021). *Iran's Asymmetric Warfare Strategy and Its Regional Impact*. Center for Strategic and International Studies.
- Eisenstadt, M. (2016). *The Role of Missiles in Iran's Military Strategy*. Washington Institute for Near East Policy.
- Elleman, M. (2020). *Iran's Ballistic Missile Program: The Impact on Regional Security and U.S. Policy*. International Institute for Strategic Studies.
- Erdbrink, T. (2018, July 25). *Iran's Military Threatens to Block Key Oil Route, as U.S. Tensions Rise*. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2018/07/25/world/middleeast/iran-military-threatens-to-block-key-oil-route.html>
- Gordon, M. R. (2019, September 17). *U.S. Accuses Iran of 'State-on-State' Attack on Saudi Oil Site*. *The Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/articles/u-s-accuses-iran-of-state-on-state-attack-on-saudi-oil-site-11568725775>
- Hosseini, S. (2019). *Iran's Ballistic Missile Capabilities: Implications for the Middle East*. *Middle Eastern Studies*, 55(4), 529-548.
- Jones, S. G. (2021). *Iran's Asymmetric Warfare Strategy and Its Regional Impact*. Center for Strategic and International Studies.
- Macrotrends. (2024). *Iran Military Spending/Defense Budget - Historical Data*. <https://www.macrotrends.net/global-metrics/countries/IRN/iran/military-spending-defense-budget>
- Axios. (2024, October 1). *Iran launches missile attack on Israel*. Retrieved from <https://www.axios.com/2024/10/01/iran-missile-attack-israel>
- CNN. (2024, October 1). *Iran missile attack on Israel raises global security concerns*. Retrieved from <https://www.cnn.com/2024/10/01/politics/iran-missile-attack-israel/index.html>
- IISS. (2024, July). *Removing the hype from Iran's hypersonic conqueror*. Retrieved from <https://www.iiss.org/online-analysis/military-balance/2023/07/removing-the-hype-from-irans-hypersonic-conqueror/>
- The Guardian. (2024, October 1). *Stopping Iran's attack would have forced Israel to use sophisticated defenses*. Retrieved from <https://www.theguardian.com/world/2024/oct/01/stopping-iran-attack-would-have-forced-israel-to-use-sophisticated-and-expensive-defences>

THE NEED OF THE WORLD: GREEN ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT**Dr. Neha**

Associate Professor, Swami Vivekanand Subharti University, Meerut, Uttar Pradesh, 250005 India

Abstract

As the global population expands and economies grow, energy demands are surging at an unprecedented rate. Simultaneously, the adverse environmental impacts of fossil fuels, including greenhouse gas emissions, climate change, and resource depletion, are escalating. This paper explores the critical role of green energy—derived from renewable sources such as solar, wind, hydro, and geothermal power—in achieving sustainable development. It discusses the multidimensional benefits of green energy, including environmental preservation, economic resilience, and social equity, while examining the barriers to its adoption. The research highlights the urgent need for global collaboration, policy support, and technological innovation to accelerate the transition toward renewable energy systems. The paper concludes with actionable recommendations for a sustainable and equitable energy future.

1. Introduction

The world is at a pivotal moment in its energy journey, grappling with the dual challenges of meeting increasing energy demands and mitigating the environmental impacts of traditional fossil fuels. Green energy, derived from renewable and sustainable resources, offers a transformative pathway toward sustainable development. This paper investigates why green energy is essential, how it contributes to sustainability, and what barriers must be addressed to achieve widespread adoption. Energy is the backbone of human development, powering industries, homes, and transportation systems worldwide. However, the environmental and societal costs of fossil fuel dependency are becoming unsustainable. The burning of coal, oil, and natural gas accounts for a significant portion of global greenhouse gas emissions, contributing to climate change, environmental degradation, and health crises.

In contrast, green energy offers a sustainable alternative that aligns with the objectives of the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs). This paper aims to highlight the urgent need for green energy adoption, analyze its benefits and challenges, and propose strategies to ensure its global integration for a sustainable future. Energy is a cornerstone of modern society, driving economic activities, improving quality of life, and enabling technological advancement. However, reliance on fossil fuels has led to environmental degradation, climate change, and resource depletion. Sustainable development, which seeks to meet present needs without compromising future generations' ability to meet theirs, requires a shift toward renewable, clean, and efficient energy sources. This paper explores the necessity of green energy in achieving sustainable development, evaluates its potential, and identifies challenges and solutions to its implementation.

2. Understanding Green Energy and Sustainable Development**2.1 Green Energy**

Green energy refers to energy produced from natural and renewable resources, including sunlight, wind, water, biomass, and geothermal heat. These resources are abundant, sustainable, and have minimal environmental impacts compared to fossil fuels.

2.2 Sustainable Development

Sustainable development emphasizes meeting present needs without compromising the ability of future generations to meet theirs. It integrates economic growth, environmental stewardship, and social inclusion to create long-term solutions to global challenges.

3. Benefits of Green Energy

3.1 Environmental Benefits

Green energy mitigates environmental degradation by reducing greenhouse gas emissions and dependency on finite resources. It contributes to cleaner air and water, curbing health issues associated with pollution.

3.2 Economic Benefits

Investments in green energy drive economic growth by creating jobs in manufacturing, installation, maintenance, and research. Renewable energy also diversifies energy sources, enhancing national energy security and reducing vulnerability to price fluctuations in global fossil fuel markets.

3.3 Social Benefits

Access to green energy improves living standards, particularly in underserved regions. Electrification of remote areas supports essential services such as healthcare, education, and local businesses, fostering social equity and poverty alleviation.

4. Challenges to Green Energy Adoption

4.1 Technological Barriers

Intermittency issues in solar and wind energy necessitate advancements in energy storage and grid management. These technologies are still in developmental phases, requiring significant investment.

4.2 Financial Constraints

The high upfront costs of green energy infrastructure can deter investments, particularly in developing nations. While operational costs are low, initial financing remains a significant hurdle.

4.3 Policy and Institutional Challenges

The lack of coherent policies, regulatory frameworks, and incentives for renewable energy hinders its adoption. Fossil fuel subsidies further distort energy markets, creating unfair competition for renewable energy.

5. Strategies for Transitioning to Green Energy

5.1 Innovation and Research

Investing in research and development (R&D) is critical to overcoming technological barriers. Innovations in energy storage, smart grids, and energy efficiency can enhance the reliability and scalability of renewable energy systems.

5.2 Policy Support

Governments play a pivotal role in facilitating the green energy transition through subsidies, tax incentives, and regulatory support. Phasing out fossil fuel subsidies and enforcing carbon pricing can level the playing field for renewables.

5.3 Public-Private Partnerships

Collaborations between governments, private entities, and non-governmental organizations can mobilize resources, expertise, and innovation to scale renewable energy projects.

5.4 International Cooperation

Global challenges require global solutions. International agreements like the Paris Accord highlight the importance of collaborative efforts to finance, implement, and monitor renewable energy initiatives.

6. Case Studies of Green Energy Success

6.1 Germany: A Pioneer in Renewable Energy

Germany's Energiewende (energy transition) policy has made it a global leader in renewable energy adoption, with over 40% of its electricity generated from renewable sources in 2021. Strategic investments in solar and wind energy, coupled with robust policy frameworks, have driven this transformation.

6.2 India: Scaling Solar Power

India's National Solar Mission has significantly boosted its renewable energy capacity, with a target of 450 GW by 2030. Large-scale solar farms and decentralized solar systems are providing affordable electricity to millions.

6.3 Africa: Advancing Energy Access

Projects like Kenya's Lake Turkana Wind Power and Morocco's Noor Solar Complex demonstrate how renewable energy can bridge energy access gaps in developing regions while contributing to economic growth.

Case Studies and Success Stories

Countries like Germany and Denmark demonstrate how comprehensive green energy policies can result in substantial economic and environmental benefits. Emerging economies, such as India and China, are also making significant strides in renewable energy deployment.

7. Recommendations

1. **Enhance Policy Frameworks:** Governments should enact and enforce policies promoting renewable energy adoption, including tax incentives, renewable energy mandates, and carbon pricing.
2. **Increase Investments:** Financial institutions and international bodies must increase funding for renewable energy projects, particularly in developing nations.
3. **Strengthen Education and Awareness:** Public education campaigns can build support for renewable energy initiatives and promote energy conservation practices.
4. **Foster Global Partnerships:** International collaboration on technology transfer, financing, and policy development is essential to accelerate the energy transition.

8. Conclusion

Green energy is not merely an option but a necessity for sustainable development. It addresses pressing environmental concerns, drives economic growth, and enhances social equity. The global community must act decisively to overcome the challenges to renewable energy adoption, ensuring a sustainable and resilient future for all.

Green energy is indispensable for sustainable development, offering environmental protection, economic resilience, and social inclusivity. Despite challenges, the global transition to renewable energy is achievable through innovation, strategic policies, and collaboration. A concerted effort from governments, businesses, and individuals is imperative to create a sustainable and energy-secure future.

References

- International Energy Agency. (2021). *Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026*. Retrieved from <https://www.iea.org>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. Retrieved from <https://sdgs.un.org>
- World Bank. (2020). *The role of renewable energy in addressing energy poverty*. Retrieved from <https://www.worldbank.org>
- Zhao, X., Zhang, S., & Li, N. (2021). Barriers and solutions for renewable energy integration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111084. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111084>



A COMPREHENSIVE COMPARISON OF MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING ALGORITHMS FOR SYSTEM MARGINAL PRICE FORECASTING IN ELECTRICITY MARKETS

Cumali TÜRKMENOĞLU

Dr., Fatih Sultan Mehmet Vakif University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Management Information Systems, İstanbul-Türkiye

(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-1026-0725

Murat İN

Hitsoft Harmony of Information Technologies, R&D Department, İstanbul / Turkey

ORCID: 0009-0008-2307-6741

İsmail KARADAĞ

Hitsoft Harmony of Information Technologies, R&D Department, İstanbul / Turkey

ORCID: 0000-0001-5051-9888

Abstract

This study presents a comprehensive comparison of Machine Learning and Deep Learning algorithms for forecasting the System Marginal Price (SMP) in the Turkish electricity market from January 2017 to March 2022. We evaluate three ML algorithms (Support Vector Regression, eXtreme Gradient Boosting, and Extreme Learning Machine) against three DL algorithms (Long Short-Term Memory, Bidirectional LSTM, and Convolutional LSTM). Our methodology employs a rolling window approach to generate hourly predictions for 7 hours ahead, with performance assessed over the final three months using Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The analysis encompasses both standard market conditions and exceptional circumstances, including weekends, holidays, and high volatility periods. Results indicate that DL algorithms, particularly BiLSTM and ConvLSTM, generally outperform ML approaches in forecasting accuracy and resilience to market volatility. BiLSTM achieves the lowest overall MAPE of 6.42%, followed by ConvLSTM at 6.57%. Among ML algorithms, XGBoost performs best with a MAPE of 7.93%. The performance gap widens during challenging market conditions, with BiLSTM maintaining the lowest MAPE across all scenarios. However, ML algorithms offer advantages in computational efficiency and model interpretability, with XGBoost providing valuable insights through feature importance rankings and partial dependence plots. This study offers a multifaceted evaluation considering prediction accuracy, computational resources, and interpretability. Our findings reveal trade-offs between approaches, highlighting that ML and DL model choice depends on application requirements, forecast horizons, and explainability needs. We examine algorithm performance across time horizons and market conditions, providing a comprehensive view of their strengths and limitations. The study utilizes a rich dataset with 30 attributes, including historical SMP values, electricity production, exchange rates, and weather data. These insights guide energy market participants and policymakers in selecting forecasting methodologies and informing strategies for market operation and risk management in complex electricity markets.

Keywords: Electricity Price Forecasting, Deep Learning, Machine Learning, System Marginal Price (SMP), Algorithm Comparison.

Introduction

The global electricity sector has transformed significantly since the 1980s, evolving from monopolistic systems to liberalized markets. This shift has created new challenges in price forecasting, particularly for System Marginal Price (SMP), which is crucial for market participants' profitability. In Turkey's electricity market, accurate SMP forecasting is essential due to its complex structure encompassing day-ahead, intra-day, and balancing markets.

Recent technological advances have enabled new forecasting approaches. While traditional machine learning methods have shown success, emerging deep learning architectures offer potential improvements in handling temporal dependencies. Recent advances in computational capabilities and algorithmic developments have opened new possibilities for addressing these forecasting challenges. Traditional machine learning approaches, such as Support Vector Regression (SVR) (Drucker et al. 1996), eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) (Chen & Guestrin 2016) and Extreme Learning Machines (Huang, Wang & Lan, Y., 2011) have demonstrated considerable success in capturing complex market dynamics. However, the emergence of deep learning architectures, particularly variants of Long Short-Term Memory (LSTM) networks, offers potential improvements in handling the temporal dependencies and non-linear relationships inherent in electricity price data.

Our study provides a comprehensive comparison of these approaches, utilizing data from January 2017 to March 2022, with 30 distinct attributes including production sources, financial indicators, and weather data.

This research addresses key gaps in existing literature by: (1) systematically comparing ML and DL approaches, (2) evaluating performance across various market conditions, and (3) considering multiple performance metrics beyond accuracy. Our methodology employs sophisticated preprocessing techniques and provides insights for both practitioners and researchers in the energy sector.

Literature Review

Research in SMP prediction has evolved from traditional statistical approaches to advanced machine learning and deep learning algorithms (Wang & Ramsay, 1997). Recent studies demonstrate various successful applications: Shim et al. (2023) proposed a 2-Step method combining multiple ML models, while Lynch et al. (2019) achieved significant improvements using SVR in the Irish market.

Deep learning applications have shown promising results, with Panapakidis and Moschakis (2019) demonstrating the effectiveness of neural networks in the Greek market. LSTM networks have gained attention for their ability to capture temporal dependencies, while hybrid approaches, such as Zhao et al.'s (2022) windowed XGBoost model, have shown success in combining multiple techniques.

Market-specific studies highlight the importance of considering local conditions. Li et al. (2017) emphasized adaptive approaches for Irish markets, while Sirin and Yilmaz (2021) examined the impact of renewable energy on Turkish market dynamics.

Methodology

Dataset Description: Our study utilizes data from Energy Exchange Istanbul (2017-2022), comprising 45,790 hourly observations across 30 attributes. The dataset includes historical SMP values in multiple currencies, electricity production from various sources, financial indicators (exchange rates, stock indices), and temperature readings from five major Turkish cities. This comprehensive dataset provides a robust foundation for analyzing price dynamics in the Turkish electricity market.

Data Preprocessing: We implemented a systematic preprocessing approach combining linear interpolation for missing values and IQR method for outlier handling. Two smoothing techniques were employed: Gaussian Filter and Exponential Smoothing, with Gaussian Filter selected as the primary method based on comparative performance. Feature selection utilized the mRMR algorithm to optimize relevance while minimizing redundancy, followed by z-score normalization for consistent scaling.

Performance Metrics: The evaluation of our forecasting models employs a comprehensive set of performance metrics, with the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) serving as our primary metric due to its interpretability and scale-independent nature. MAPE provides a clear percentage-based measure of prediction accuracy that is particularly valuable for stakeholders in the energy sector. To ensure a thorough assessment of model performance, we supplement MAPE with several supporting metrics, including Root Mean Square Error (RMSE) for sensitivity to large errors, Mean Absolute Error (MAE) for absolute deviation assessment, and R-squared (R^2) for explaining the proportion of variance captured by our models.

Testing Scenarios: The evaluation focused on the final three months of data (December 24, 2021, to March 24, 2022), with each model executing multiple runs for statistical robustness. All forecasts were generated for 7

hours ahead, and performance metrics were averaged across tens of independent runs with different initializations. This approach ensured comprehensive assessment across various market conditions while maintaining consistent evaluation criteria.

Machine Learning Algorithms

Support Vector Regression (SVR): Support Vector Regression extends Support Vector Machine principles to regression problems by constructing optimized hyperplanes in high-dimensional space. Our implementation utilizes both RBF and linear kernels to handle non-linear relationships in the data. The model's performance is optimized through careful tuning of key parameters: C for controlling the trade-off between model complexity and error tolerance, and ϵ (epsilon) for defining the width of the insensitive tube around the regression function. The model effectively handles non-linear patterns in time series data while maintaining computational efficiency.

XGBoost Regressor: The eXtreme Gradient Boosting Regressor implements an advanced gradient boosting framework, constructing an ensemble of decision trees through iterative optimization. Our implementation incorporates both L1 and L2 regularization to prevent overfitting, while employing tree pruning techniques to optimize model complexity. The algorithm's distinctive features include parallel processing capabilities and sophisticated handling of missing values through learned directional prediction. The model builds trees to a specified maximum depth before bottom-up pruning, ensuring optimal performance while maintaining model interpretability.

Extreme Learning Machine (ELM): ELM implements a unique single-hidden layer feedforward neural network architecture that distinguishes itself through its training approach. The model initializes input-to-hidden layer weights randomly and determines output weights analytically, significantly reducing training time compared to traditional neural networks. This approach eliminates the need for iterative parameter tuning while maintaining strong generalization capabilities. Despite its architectural simplicity, ELM demonstrates robust performance in capturing complex patterns in time series data.

Deep Learning Algorithms

Long Short-Term Memory (LSTM): Our LSTM implementation features a specialized recurrent neural network architecture designed to capture long-term temporal dependencies in sequential data. The network consists of memory cells working in conjunction with three gates: input gates controlling new information flow, forget gates managing memory retention, and output gates regulating information propagation to subsequent layers. This architecture effectively addresses the vanishing gradient problem common in traditional RNNs while maintaining a robust internal state for temporal pattern recognition.

Bidirectional LSTM (BiLSTM): BiLSTM enhances the standard LSTM architecture by processing sequences in both forward and backward directions simultaneously. The model combines two LSTM layers: one processing the input sequence from start to end, and another processing it from end to start. This bidirectional approach enables the network to capture both past and future dependencies in the data, creating a more comprehensive understanding of temporal patterns. The outputs from both directions are combined to create rich temporal representations, particularly valuable for complex time series forecasting.

Convolutional LSTM (ConvLSTM): ConvLSTM represents an innovative hybrid architecture that integrates convolutional operations within the LSTM framework. The model replaces traditional matrix multiplications with convolution operations, enabling simultaneous capture of both spatial and temporal dependencies. Our implementation utilizes 3D tensor operations for both input and hidden states, with convolutional structures in input-to-state and state-to-state transitions. This architecture proves particularly effective in capturing spatiotemporal patterns while maintaining the LSTM's ability to model long-term dependencies.

Preprocessing Methods

Feature Selection with mRMR: The Minimum Redundancy Maximum Relevance algorithm provides a sophisticated approach to feature selection. This method operates by simultaneously maximizing the mutual information between selected features and the target variable while minimizing redundancy among the selected

features. The algorithm evaluates each feature's contribution to the prediction task while ensuring that the selected feature set remains optimal and non-redundant. This approach leads to improved model efficiency and reduced overfitting by identifying the most relevant features for SMP prediction.

Smoothing Techniques: We employ two complementary signal processing techniques: Gaussian Filtering and Exponential Smoothing. The Gaussian Filter processes time series data by implementing a weighted average system based on the Gaussian distribution, effectively removing noise while preserving underlying trends and patterns. Exponential Smoothing complements this by assigning exponentially decreasing weights to older observations, emphasizing recent data points while maintaining historical context. This combination of techniques helps identify significant patterns while reducing the impact of random fluctuations in the data.

Results and Discussion

Our analysis reveals distinct performance patterns across model types. Deep learning models demonstrated superior accuracy, with BiLSTM achieving 6.42% MAPE, followed by ConvLSTM (6.57%) and LSTM (7.1%). Machine learning models showed competitive but slightly higher error rates: XGBoost (7.93%), SVR (9.2%), and ELM (11.1%).

Model architecture significantly influenced performance. Deep learning models benefited from larger training periods (500 epochs for BiLSTM/ConvLSTM vs. 250 for LSTM) and group sizes (120 vs. 64), reflecting their increased complexity. The small performance gap (0.68%) among deep learning models suggests robust capability in capturing price dynamics.

Table 1. The overall performance of all Deep Learning models (Number of forecasts: 7)

Test data	Start date of train dataset	Feature selection	Target feature	MAPE(%)		
				SVR	XGBoostR	ELM
24.12.2021 24.03.2022	01.01.2019 to test start date/hour	mRMR	SmfDolar	9.2	7.93	13.1

Table 2. The overall performance of all machine learning models (Number of forecasts: 7)

Test data	Start date of train dataset	Feature selection	Target feature	MAPE(%)		
				LSTM	BILSTM	CONVLSTM
24.12.2021 24.03.2022	01.01.2019 to test start date/hour	mRMR	SmfDolar	7.1	6.42	6.57

The performance gap between different architectural approaches provides valuable insights into the nature of SMP forecasting. The relatively small difference of 0.68% between the best and worst performing deep learning models suggests that all three architectures capture significant aspects of the underlying price dynamics. The BiLSTM's superior performance can be attributed to its ability to process sequences bidirectionally, capturing both past and future dependencies in the time series data. The ConvLSTM's close second-place performance indicates that spatial-temporal feature extraction provides nearly equivalent benefits to bidirectional processing.

In comparing machine learning and deep learning approaches, we observe a meaningful but not dramatic advantage for deep learning methods. The best-performing deep learning model (BiLSTM) outperformed the best machine learning model (XGBoost) by 1.51%, a significant but not overwhelming margin. This difference must be considered in the context of the increased computational complexity and longer training times required by deep learning approaches. The larger performance gap among machine learning models (3.17% between XGBoost and ELM) suggests greater sensitivity to model selection within the traditional machine learning paradigm.

These findings have important practical implications for the implementation of SMP forecasting systems. While BiLSTM provides the highest accuracy, the computational overhead may not justify the incremental improvement for all applications. XGBoost emerges as a particularly attractive option, offering a compelling balance between prediction accuracy and computational efficiency. The choice between machine learning and deep learning approaches should be guided by specific application requirements, available computational resources, and the relative importance of prediction accuracy versus model simplicity and training efficiency.

The study also highlights the importance of architectural considerations in model selection. The success of both BiLSTM and ConvLSTM architectures suggests that temporal relationship processing is crucial for accurate SMP forecasting. However, the competitive performance of simpler architectures indicates that significant predictive power can be achieved without the full complexity of advanced deep learning models. This observation has important implications for practical implementations, particularly in resource-constrained environments.

Practical Applications and Market Strategies

The analysis of our forecasting results against actual System Marginal Price (SMP) and Market Bid Price (MBP) reveals several valuable applications for market participants in the Turkish electricity market. Our examination of multiple dates demonstrates how accurate forecasting can be strategically leveraged to optimize market operations and maximize profitability.

The most significant application emerges from the comparison between forecasted values and MBP. During several periods, the actual SMP substantially exceeded the Market Bid Price, presenting opportunities for strategic energy allocation. Electricity producers can benefit by not committing their entire production capacity to the Day-Ahead Market (DAM), instead reserving a portion for the intraday market when prices are more favorable. This strategy is particularly effective during hours where actual prices significantly exceed market bids, as observed in our analysis.

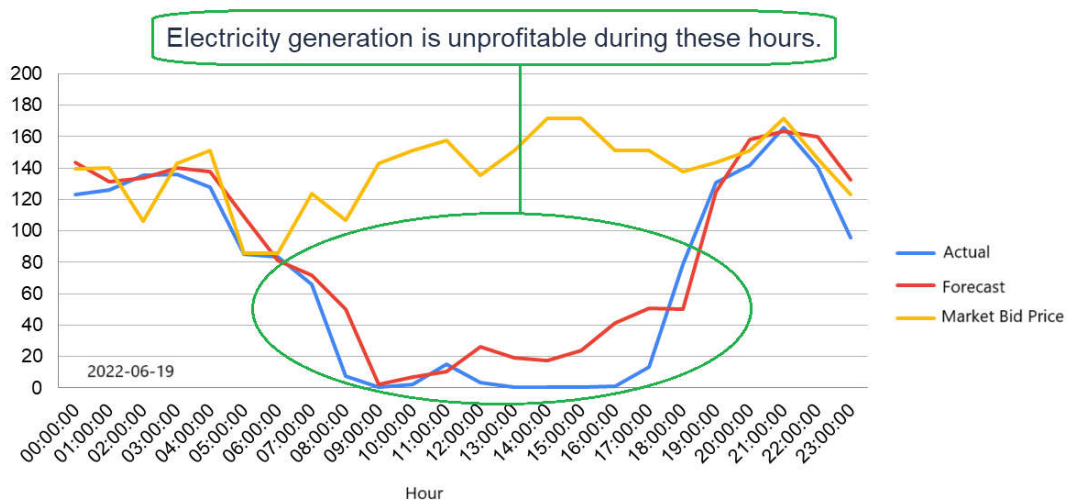


Figure 1. Profitability scenario for producers with flexible generation capabilities

Our data from June 19, 2022, illustrates another crucial application where market prices occasionally fall below economically viable production levels (Figure 1). In such scenarios, producers with flexible generation capabilities can adjust their production schedules to minimize losses during low-price periods. This approach is especially valuable for facilities where operational costs are close to typical market prices, allowing them to optimize their production timing based on accurate price forecasts.

The June 20, 2022 data highlights opportunities for market arbitrage, taking advantage of the four-hour gap between MBP announcement and actual delivery (Figure 2). Producers can use this window, combined with accurate forecasts, to make informed decisions about whether to participate in the DAM or reserve capacity

for intraday trading. This strategy becomes particularly effective during periods of high price volatility, where the potential for profit optimization is greatest.

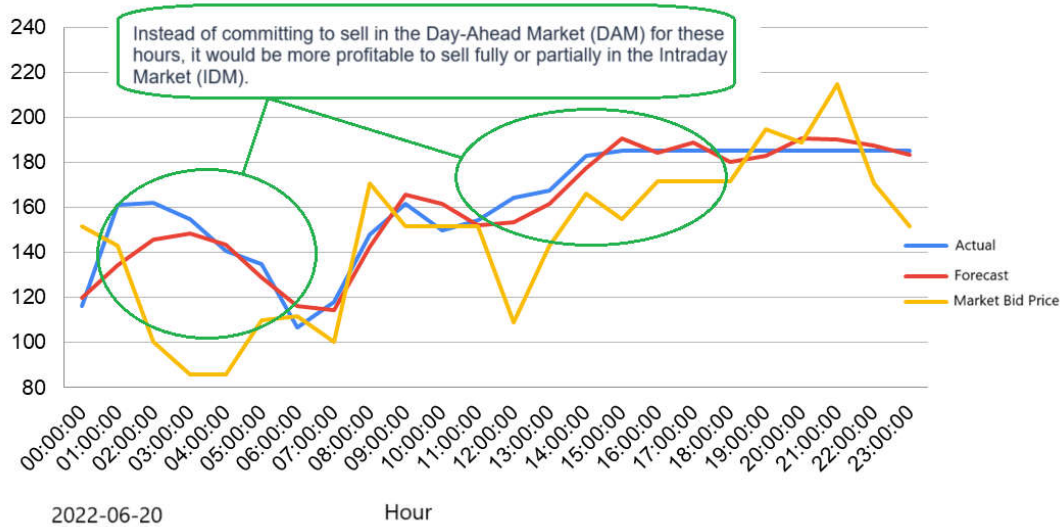


Figure 2. Profitability scenario for holding energy bid for IDM

The consistent performance of our forecasting models, maintaining accuracy within a 0%-7% MAPE range, provides a reliable foundation for these market strategies. This reliability enables market participants to develop confident trading approaches, balancing the risks and opportunities between day-ahead commitments and intraday market participation. The success of these strategies ultimately depends on both forecast accuracy and the ability to implement responsive trading decisions within the market's operational constraints.

References

1. Shim, S.W., Lee, D.H., Roh, J.H. et al. (2023). A Machine Learning-Based Algorithm for Short-Term SMP Forecasting Using 2-Step Method. *Journal of Electrical Engineering & Technology*.
2. Lynch, C., Kehoe, J., Bain, R., Zhang, F., Flynn, J., O'Leary, C., and Feijoo, F. (2019). Application of a SVM-based model for day-ahead electricity price prediction for the single electricity market in Ireland. In *Proceedings of the 39th International Symposium on Forecasting (ISF)*, Thessaloniki, Greece, pp. 16-19.
3. İpek, A. B. (2023). Analysis of System Marginal Price in the Turkish Electricity Market. In *Considerations of Territorial Planning, Space, and Economic Activity in the Global Economy*, IGI Global, pp. 225-240.
4. Panapakidis, I. P., and Moschakis, M. N. (2019). Comparison of Machine Learning Models for the Prediction of System Marginal Price of Greek Energy Market. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13(3), 148-152.
5. Zhao, X., Li, Q., Xue, W., Zhao, Y., Zhao, H. and Guo, S. (2022). Research on Ultra-Short-Term Load Forecasting Based on Real-Time Electricity Price and Window-Based XGBoost Model. *Energies*, 15(19), p.7367.
6. Li, P., Arci, F., Reilly, J., Curran, K., Belatreche, A., and Shynkevich, Y. (2017). Predicting short-term wholesale prices on the Irish single electricity market with artificial neural networks. In *2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, Killarney, Ireland, pp. 1-8.
7. Sirin, S.M. and Yilmaz, B.N. (2021). The impact of variable renewable energy technologies on electricity markets: An analysis of the Turkish balancing market. *Energy Policy*, 151, p.112093.

8. Wang, A.J. and Ramsay, B. (1997). Prediction of system marginal price in the UK Power Pool using neural networks. Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97), 4, pp.2116-2120.
9. Drucker, H., Burges, C. J., Kaufman, L., Smola, A., and Vapnik, V. (1996). Support vector regression machines. In Advances in neural information processing systems, 9.
10. Chen, T. and Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, New York, NY, USA, pp. 785-794.
11. Huang, G. B., Wang, D. H., and Lan, Y. (2011). Extreme learning machines: a survey. International journal of machine learning and cybernetics, 2, 107-122.



T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Mühendislik Fakültesi Dekanlığı
Personel İşleri Birimi



Sayı : E-98038103-622.01-734271
Konu : Toplantı ve Etkinlik İşleri

17.10.2024

**ENERJİ DÖNÜŞÜMLERİ ARAŞTIRMA VE UYGULAMA
MERKEZİ MÜDÜRLÜĞÜNE**

İktisadi Kalkınma ve Sosyal Araştırmalar Enstitüsü (IKSAD) işbirliği ile 06-08 Aralık 2024 tarihleri arasında bu yıl 4.sü planlanan "4th International World Energy Conference" isimli konferans düzenleme kurulunda aşağıda unvan ve isimleri yazılı olan öğretim üyelerinin Fakültemiz Akademisyen Temsilcisi olarak görevlendirilmesi Dekanlığımızca uygun görülmüştür.

Bilgilerinizi ve gereğini rica ederim.

Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER
Dekan

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ – Enerji Sistemleri Mühendisliği
Prof. Dr. Gamze GENÇ – Enerji Sistemleri Mühendisliği
Doç. Dr. Gülşah ELDEN – Enerji Sistemleri Mühendisliği
Doç. Dr. Şükrü Taner AZGIN – Çevre Mühendisliği
Dr. Öğr. Üyesi Saltuk Buğra SELÇUKLU – Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Belge Doğrulama Kodu :BSEKJL822 Pin Kodu :43142

Belge Takip Adresi : <https://www.turkiye.gov.tr/erciyes-universitesi-ebys>

Adres:Köşk Mahallesi Ahmet El Biruni Caddesi 38030 Melikgazi KAYSERİ

Telefon:+90 352 437 57 55 Faks:+90 352 437 57 84

e-Posta:mfdekanlik@erciyes.edu.tr Web:http://mf.erciyes.edu.tr/

Kep Adresi:erciyesuni@hs01.kep.tr

Bilgi için: Tuğba ÖZKAN USTA

Unvanı: Büro Personeli

Tel No: 0





IWECC

4. International World Energy Conference

Ref : IWECC.24-00250
Topic : Akademik Teşvik

15/12/2024

İlgili makama;

4. ULUSLARASI DÜNYA ENERJİ KONGRESİ, 6-8 Aralık 2024 tarihleri arasında Kayseri’de 22 farklı ülkenin akademisyen/araştırmacılarının katılımıyla gerçekleşmiş, sözlü sunumları kongre kitaplarında yayınlanmıştır. Kongre 16 Ocak 2020 Akademik Teşvik Ödeneği Yönetmeliğine getirilen “Tebliğlerin sunulduğu yurt içinde veya yurt dışındaki etkinliğin uluslararası olarak nitelendirilebilmesi için Türkiye dışında en az beş farklı ülkeden sözlü tebliğ sunan konuşmacının katılım sağlaması ve tebliğlerin yarından fazlasının Türkiye dışından katılımcılar tarafından sunulması esastır.” değişikliğine uygun düzenlenmiştir.

Bilgilerinize arz edilir,
Saygılarımla

Atabek Movlyanov
Kongre Genel Koordinatörü