

4th International Energy Congress

October 07, 2025 / Sivas Cumhuriyet University, Türkiye



PROCEEDINGS BOOK

EDITORS

Assist. Prof. Dr. Derya Betül UNSAL
Dr. Atabek MOVLYANOV

ISBN: 979-8-89695-202-2
by Liberty Publishing House

4th International Energy Congress

October 07, 2025 / Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

PROCEEDINGS BOOK

EDITORS

Assist. Prof. Dr. Derya Betül UNSAL

Dr. Atabek MOVLYANOV

Copyright © Liberty

Date: **20.10.2025**

Liberty Publishing House

Water Street Corridor New York, NY 10038

www.libertyacademicbooks.com

+1 (314) 597-0372

ALL RIGHTS RESERVED NO PART OF THIS BOOK MAY BE REPRODUCED IN ANY FORM, BY PHOTOCOPYING OR BY ANY ELECTRONIC OR MECHANICAL MEANS, INCLUDING INFORMATION STORAGE OR RETRIEVAL SYSTEMS, WITHOUT PERMISSION IN WRITING FROM BOTH THE COPYRIGHT OWNER AND THE PUBLISHER OF THIS BOOK.

© Liberty Academic Publishers 2025

The digital PDF version of this title is available Open Access and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits adaptation, alteration, reproduction and distribution for noncommercial use, without further permission provided the original work is attributed. The derivative works do not need to be licensed on the same terms.

adopted by Mariam Rasulan

ISBN: **979-8-89695-202-2**

CONGRESS ID

CONGRESS TITLE

4th International Energy Congress

DATE and PLACE

October 07, 2025 / Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

PARTICIPATION

Keynote & Invited

ORGANIZATION

Renewable Energy Research Center Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Sustainability Office, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
IKSAD-Institute of Economic Development and Social Research, Türkiye

PARTICIPANTS COUNTRY

Albania, Algeria, Azerbaijan, Bangladesh, China, India, Kosovo, Lithuania, Malaysia,
Morocco, Serbia, Türkiye, Ukraine, Vietnam, Yemen

Number Of Accepted Papers-**42**

Number Of Rejected Papers-**9**

The number of abstracts from foreign countries-**24**

The number of abstracts from Türkiye-**18**

CONGRESS HONORARY CHAIR

Prof. Dr. Ahmet ŞENGÖNÜL
Sivas Cumhuriyet University Rector

ORGANIZING COMMITTEE CHAIR

Assist. Prof. Dr. Derya Betül UNSAL
Sivas Cumhuriyet University

CONGRESS HONORARY CO-CHAIRS

Prof. Dr. Salih Cem İNAN, Vice Rector of Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. Süleyman DEĞİRMEN, Vice Rector of Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

CONGRESS ADVISORY CHAIR

Assoc. Prof. Dr. Yüksel AYDIN, General Secretary of Sivas Cumhuriyet University Rectorate, Türkiye

TECHNICAL PROGRAM COMMITTEE CHAIRS

Prof. Dr. Ahmet ONEN, University of Doha, QATAR
Prof. Dr. Tülay YILDIRIM, Yıldız Technical University, Türkiye
Prof. Dr. Taha Selim USTUN, Fukushima Renewable Energy Institute, Japan
Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ, Head of Environmental Engineering Department, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. S. M. MUYEEN, Curtin University, Australia
Prof. Dr. Ertan BUYRUK, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Arman JALALI, Tabriz University, Iran

CONGRESS LOCAL COMMITTEE CHAIR

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY, Dean of Engineering Faculty, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

CONGRESS ORGANIZING COMMITTEE

Prof. Dr. Sultan ERKAN, Vice Director of Renewable Energy Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. Serkan AKKOYUN, Vice Director of Artificial Intelligence and Data Science Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. Hülya DOĞAN, Head of Electrical and Electronics Engineering Department, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Ahmet Gürkan YÜKSEK, Head of Artificial Intelligence and Data Science Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

CONGRESS VIRTUAL PLATFORM CHAIR

Ayhan OZDEMİR, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

Congress Coordinator

Dr. Atabek MOVLYANOV - IKSAD Institute

SCIENTIFIC BOARD MEMBERS

- Prof. Dr. Abdülkerim YÖRÜKOĞLU, Türkiye
Prof. Dr. Ahmet ONEN, University of Doha, QATAR
Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ, Konya Technical University, Türkiye
Prof. Dr. Bernie L.DAHL, Purdue University, U.S.A.
Prof. Dr. Beliz OZORHON, Boğaziçi University, Türkiye
Prof. Dr. Claudia JUROWSKI, Northern Arizona University, U.S.A.
Prof. Dr. Dani SARSEKOVA, Wildlife and the Environment of S.Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Kazakhstan
Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. Harpreet KAUR, Mata Sundri College for Women, University of Delhi, India
Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT, Yıldırım Beyazıt University, Türkiye
Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. Nuri AZBAR, Ege University, Türkiye
Prof. Dr. Rashmi GUJRATI, CT University, India
Prof. Dr. Serkan AKKOYUN, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Prof. Dr. S. M. Mueeen, Curtin University, Australia
Prof. Dr. Tuncay BAYRAM, Karadeniz Teknik University, Türkiye
Prof. Dr. Tülay YILDIRIM, Yıldız Technical University, Türkiye
Prof. Dr. Ümit ERDEM, Aegean University, Greece
Prof. Dr. Ümit YILMAZ, University of Georgia, Georgia
Assoc. Prof. Dr. Ahmet Gürkan YÜKSEK, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Bülent ÜNVER, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Enis Baha BİÇER, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Guguli DUMBADZE, Batumi Shota Rustaveli State University, Georgia
Assoc. Prof. Dr. Koray SAYIN, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Maira KUSSAINOVA, Kazakh National Agrarian Research University, Kazakhstan
Assoc. Prof. Dr. Meryem ŞEFERİNOĞLU, Sinop University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Murat FAHRİOĞLU, Middle East Technical University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Murat ORAL, Konya Technical University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Sultan ERKAN, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Arman JALALI, Tabriz University, Iran
Assist. Prof. Dr. Hüseyin ŞAHİNLER, Sinop University, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Nurperihan TOSUN, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Şeyma TAŞTEMUR, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye
Assist. Prof. Uzma NADEEM, Mata Sundri College for Women, University of Delhi, India
Assist. Prof. Dr. Yeliz YOLDAŞ, Kayseri University, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Dr. Zeynep HASIRCI TUĞCU, Karadeniz Technical University, Türkiye
Dr. Barış SANLI, Bilkent University, Türkiye
Dr. Nermin KIBRISLIOĞLU UYSAL, Boston, Massachusetts, U.S.A.
Dr. Mariana GOLUMBEANU, National Institute for Marine Research "Grigore Antipa", Romania
Dr. Şeyda MAHARRAMOVA, Azerbaijan Food Safety Institute, Azerbaijan
Dr. Şeyma KIBRISLIOĞLU BAYKAN, İzmir Research Hospital, Türkiye



Congress Programme

Zoom Meeting ID: 847 7043 0612

Zoom Passcode: 070707

<https://us02web.zoom.us/j/84770430612?pwd=R1xlrqKWESsQEB7YgNCyUzaXFq6woz.1>

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. Hall-1, Ethem KILIÇ

- Welcome Greetings -

Date- 07.10.2025

All schedule is according to GMT +3 time zone (Istanbul)

Dr. Atabek MOVLYANOV - (09.40-09.50)

General Coordinator of IKSAD Institute, Türkiye

Congress Coordinator

Assist. Prof. Dr. Derya Betül UNSAL - (09.30-09.40)

Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

Congress Organizing Committee Chair

Prof. Dr. Süleyman DEĞİRMEN - (09.50-10.00)

Rector of Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

Congress Honorary Chair

Participant Countries: Albania, Algeria, Azerbaijan, Bangladesh, China, India, Kosovo, Lithuania, Malaysia, Morocco, Serbia, Türkiye, Ukraine, Vietnam, Yemen

07.10.2025 / Hall-1, Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Dr. Hikmet ALİM

Authors	Affiliation	Presentation title
Assoc. Prof. Dr. Serdar DİZMAN Vasyl Volodymyrovych BILYK Vasily Yuryevich ULYANOV	Recep Tayyip Erdogan University, Türkiye Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Ukraine Independent researcher, Ukraine	GEOTECHNICAL MONITORING STRATEGIES DURING THE COMPLETION PHASE OF AKKUYU NUCLEAR POWER PLANT CONSTRUCTION
Lect. Dr. Hikmet ALİM	Sivas Cumhuriyet University, Türkiye	TOWARDS NEARLY ZERO-ENERGY BUILDINGS IN RURAL ARCHITECTURAL HERITAGE: THE CASE STUDY OF CALLI VILLAGE ROOM
Assoc. Prof. Dr. Selma AKÇAY Dr. Sezgin YAŞA	Çankırı Karatekin University, Türkiye	INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BATTERY HOUSING GEOMETRY ON LI-ION BATTERY THERMAL MANAGEMENT
Assoc. Prof. Dr. Selma AKÇAY Dr. Sezgin YAŞA	Çankırı Karatekin University, Türkiye	NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF NANOFLUIDS ON THE BATTERY THERMAL MANAGEMENT IN A CORRUGATED MODULE
Salah Bezari Sidi Mohamed El Amine Bekkouche Mohamed Kamal Cherier	Renewable Energy Development Center, Algeria	PASSIVE COOLING OF BUILDINGS IN THE MEDITERRANEAN REGION: A FOCUS ON GHARDAÏA CITY

07.10.2025 / Hall-2, Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Dr. Aynaz UĞUR

Authors	Affiliation	Presentation title
Assist. Prof. Dr. Aynaz UĞUR	İnönü University, Türkiye	RESOLUTION OF INVESTMENT DISPUTES ARISING BETWEEN THE INVESTOR AND THE PARTY STATE WITHIN THE SCOPE OF THE ENERGY CHARTER AGREEMENT THROUGH ARBITRATION
Emin Alimusayev	Baku State University, Azerbaijan	THE CONCEPT OF "GREEN ENERGY" IN THE LEGISLATION OF AZERBAIJAN
Assoc. Prof. Dr. Aleksandra NIKOLOVA MARKOVIĆ	Megatrend University, Serbia	INTERNATIONAL AVIATION LAW AND THE REGULATION OF SUSTAINABLE AVIATION FUELS AND HYDROGEN
Ayoub Ait Akka Nalla Prof. Dr. Ayoub Gounni Prof. Dr. Mustapha Elalami	Hassan II University, Morocco	SEASONAL AND PRE-COOLING EFFECTS ON HIGH-PRESSURE HYDROGEN STORAGE: A COMPARATIVE SIMULATION OF TANK TYPES
Badhon Kumar Rakshit	University of Rajshahi, Bangladesh	POWER AND PROTECTION: BALANCING RENEWABLE ENERGY EXPANSION WITH INDIGENOUS LAND RIGHTS
Lect. Sharif Ahammad Res. Assist. Kazi Estieque Alam Assist. Prof. Dr. Delower Hossain Res. Assist. Ismile Hossain Bhuiyan Res. Assist. Jisan Ahmed	Sher-e-Bangla Agricultural University, Bangladesh	THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND RENEWABLE ENERGY ON AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN BANGLADESH: AN EMPIRICAL ASSESSMENT USING ARDL APPROACH

07.10.2025 / Hall-3, Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Prof. Dr. Sultan Erkan

Authors	Affiliation	Presentation title
Dr. Berk KÖKER Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ	Sivas Cumhuriyet University, Türkiye	WASTEWATER FROM EMERGING ENERGY TECHNOLOGIES: COMPOSITION AND MEMBRANE TREATMENT APPROACHES
Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ Dr. Berk KÖKER	Sivas Cumhuriyet University, Türkiye	INNOVATIVE OSMOTIC MEMBRANES (IOMs): CURRENT APPROACHES IN RESOURCE AND ENERGY RECOVERY
Shaik Mohammad Fazil Assoc. Prof. Dr. J.Salai Thillai Thilagam Assist. Prof. Dr. P.C.Praveen Kumar	G.Pulla Reddy Engineering College (Autonomous), India	ELECTROMAGNETICS FOR WASTE MANAGEMENT
Kaddour ZINEB	University of El-Oued, Algeria	THE ABILITY OF THE SALSOLA BARYOSMA PLANT TO REMOVE THE TURBIDITY OF WASTEWATER
Samra Benkacem Walid Boulif Youghourta Belhocine	University of 20 August 1955, Algeria	CO-CONVERSION OF PLASTICS AND BIOMASS: COPYROLYSIS FOR ADVANCED FUELS

07.10.2025 / Hall-4, Session-1 / TSI Time - 10⁰⁰:12⁰⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Dr. Poh-Yee LOH

Authors	Affiliation	Presentation title
M.A. Bossi B. Mehdaoui R. Fakhreddine L. Bih A. El Bouari	University Hassan II of Casablanca, Morocco Moulay Ismail University, Morocco	SYNTHESIS, MORPHOLOGY, STABILITY THERMIC AND PARTICLES SIZE EFFECT ON GAP ENERGY AND DIELECTRIC PROPERTIES IN MG ₂ SiO ₂
Ilir Xhebexhia	European University of Tirana, Albania	FROM DETERRENCE TO PREDICTION: HOW ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESHAPES THE CONCEPT OF SECURITY IN THE WESTERN BALKANS
El mostafa Benharaf Ikram Mennas A .Arif Abdellah Zeroual Mohammed El idrissi	Sultan Moulay Slimane University, Morocco Chouaib Doukkali University, Morocco	INVESTIGATION OF QUINOXALINE DERIVATIVES AS ELECTRON DONORS IN ORGANIC SOLAR CELLS USING DFT/TD-DFT
Arnab HAZRA Debashis DE	Netaji Subhash Engineering College, India Maulana Abul Kalam Azad University of Technology, India	DRORES: DRONE SWARM PATH PLANNING FOR WIND- INDUCED DISASTER RESPONSE
Chaymae SERGENT Mohammed OUACHEKRADI Dr. Mohammed ELKABOUS Amal ATMANE Prof. Dr. Yasser KARZAZI	University Mohammed First, Morocco	MOLECULAR ENGINEERING OF π -SPACER SENSITIZERS FOR IMPROVED CHARGE INJECTION INTO TiO ₂ IN DYE- SENSITIZED SOLAR CELLS
Poh-Yee LOH Payam SHAFIGH	Universiti Malaya, Malaysia Wenzhou University of Technology, China	OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF USING COLOURED CONCRETE AS A PASSIVE URBAN COOLING SOLUTION

07.10.2025 / Hall-1, Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Prof. Dr. Vagif NEVRUZOGLU

Authors	Affiliation	Presentation title
Assist. Prof. Dr. Cenker AKTEMUR Assist. Prof. Dr. Barış KAVASOĞULLARI	Sivas University of Science and Technology, Türkiye	THE EFFECT OF RECUPERATOR INTEGRATION ON ORGANIC RANKINE CYCLE PERFORMANCE: ENERGY AND ECONOMIC ANALYSES
Prof. Dr. Ertan BUYRUK Assist. Prof. Dr. Deniz GÖLBAŞI Assist. Prof. Dr. Mustafa CANER Yaren Su AĞBABA	Sivas Cumhuriyet University, Türkiye	WATER SOURCE HEAT PUMP APPLICATION IN A TOURISM REGION IN AFYONKARAHİSAR PROVINCE
Assist. Prof. Dr. Nilay AKÇAY Assist. Prof. Dr. Halim BÜYÜKUSLU	Recep Tayyip Erdoğan University, Türkiye Giresun University, Türkiye	CONTRIBUTION OF VARIOUS MODEL COMPONENTS TO THE FISSION CROSS-SECTION OF 186, 184, 183, 182W FOR 3He-INDUCED REACTIONS
Assoc. Prof. Dr. Bülent BÜYÜK Assoc. Prof. Dr. Miraç KAMIŞLIOĞLU Prof. Dr. Ş. İpek KARAASLAN Assoc. Prof. Dr. İsmail KOÇAK Canan CAN	Bandırma Onyedli Eylül University, Türkiye Yeditepe University, Türkiye	PROTON-BORON FUSION for THE CLEAN ENERGY and TÜRKİYE
Canan CAN Assoc. Prof. Dr. Miraç KAMIŞLIOĞLU Assoc. Prof. Dr. Bülent BÜYÜK	Bandırma Onyedli Eylül University, Türkiye	DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF BORON BASED TARGET MATERIALS IN PROTON-BORON FUSION STUDIES
Prof. Dr. Vagif NEVRUZOGLU Büşra TOPCU Dr. Melih MANIR	Recep Tayyip Erdogan University, Türkiye	PRODUCTION AND INVESTIGATION OF CdS/CdTe SOLAR CELLS BASED ON CdTe PRODUCED BY THE COLD SUBSTRATE METHOD

07.10.2025 / Hall-2, Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Dr. Ebubekir Siddik AYDIN

Authors	Affiliation	Presentation title
Assist. Prof. Dr. Ebubekir Siddik AYDIN	Sivas University of Science and Technology, Türkiye	HYDROGEN PRODUCTION VIA MOLTEN-METAL-ASSISTED CONTINUOUS METHANE PYROLYSIS: A NASA CEA-BASED MODELING STUDY
Lect. Özgenur DİNÇER ŞAHAN Prof. Dr. Ahmet KARADAĞ	Yozgat Bozok University, Türkiye Bursa Uludağ University, Türkiye	THE ROLE OF CO-CULTURE FERMENTATION IN BIOETHANOL PRODUCTION: HIGH-EFFICIENCY CONVERSION STRATEGIES FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS
Talha KURU Yigit Osman AKYILDIZ Ali KELEŞ Barış ARICI Emre ASLAN İmren HATAY PATİR	YEO Technology R&D Center, Türkiye Selçuk University, Türkiye	INVESTIGATION OF BENTONITE-SUPPORTED MoS _x PHOTOCATALYSTS FOR PHOTOCATALYTIC HYDROGEN PRODUCTION
Yigit Osman AKYILDIZ Talha KURU Ali KELEŞ Barış ARICI Emre ASLAN İmren HATAY PATİR	YEO Technology R&D Center, Türkiye Selçuk University, Türkiye	INFLUENCE OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON ELECTROCHEMICAL NITROGEN REDUCTION REACTION PERFORMANCE OF NANO-SCALE WS ₂ CATALYSTS
Assist. Prof. Dr. Alisan AYVAZ	Amasya University, Türkiye	DETERMINING THE OPTIMAL POWER RATIO BETWEEN WIND ENERGY AND PEM ELECTROLYSIS SYSTEMS FOR ECONOMIC GREEN HYDROGEN PRODUCTION: A CASE STUDY FOR SAMSUN PROVINCE, TÜRKİYE
Amina Yahia	Oum el Bouaghi University, Algeria	GIS-BASED MULTICRITERIA ANALYSIS FOR OPTIMAL GREEN HYDROGEN (GH ₂) PRODUCTION SITE SELECTION
Amina Yahia	Oum el Bouaghi University, Algeria	TOWARDS ENERGY SUSTAINABILITY IN ALGERIA: OPTIMIZING HYBRID SYSTEMS COMBINING RENEWABLE ENERGIES AND SMART TECHNOLOGIES

07.10.2025 / Hall-3, Session-2 / TSI Time - 12³⁰:14³⁰



Zoom ID: 847 7043 0612 / Passcode: 070707



Moderator: Dr. Atabek MOVLYANOV

Authors	Affiliation	Presentation title
Bui Xuan Vuong Vo Kim Ngan Pham Thi Thuy Trang Bui Thi Hoa	Sai Gon University, Vietnam Electric Power University, Vietnam	GREEN PRODUCTION OF HIGH-SURFACE-AREA BIOCHAR FROM SUGARCANE BAGASSE AND ITS INCORPORATION INTO TOOTHPASTE FORMULATION
Jūratė LIEBUVIENĖ Vida JOKUBYNIENĖ	Higher Education Institution, Lithuania	THE POTENTIAL OF HYDROTREATED VEGETABLE OIL (HVO) IN REDUCING EMISSIONS FROM ROAD TRANSPORT
Pallabi Pahari Sushanta Kumar Mohapatra Jitendra Kumar Das	Kalinga Institute of Industrial Technology (KIIT) Deemed to be University, India	PERFORMANCE ANALYSIS OF III-V COMPOUND SEMICONDUCTOR-BASED DGTFT WITH GATE DIELECTRIC ENGINEERING
Ikram Mennas Prof. Dr. Mohammed El Idrissi Prof. Dr. Abdelkhalek Aboulouard El Mostafa Benharaf Ahmed Arif	Sultan Moulay Slimane University, Morocco	UNVEILING STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIPS IN NON-FULLERENE ACCEPTORS FOR ORGANIC SOLAR CELLS USING DFT/TD-DFT
Dinore HASANI Assist. Prof. Dr. Gjelo VATAJ Assist. Prof. Dr. Labinot TOPILLA	University of Applied Sciences in Ferizaj, Kosovo	ANALYSIS OF THE INCREASE OF ELECTRICITY EFFICIENCY IN PUBLIC SECTOR IN THE MUNICIPALITY OF FERIZAJ, CASE STUDY – FERIZAJ
Hana MERAH Mohammed JAMEEL Abderahmane ABID Abdelmalek GACEM Djilani BENATTOUS	University of El-Oued, Algeria Sana'a University, Yemen	OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF SVC DEVICES FOR ENHANCED STABILITY IN RENEWABLE ENERGY INTEGRATED POWER SYSTEMS
Hana MERAH Abderahmane ABID Mohammed JAMEEL Abdelmalek GACEM Djilani BENATTOUS	University of El-Oued, Algeria Sana'a University, Yemen	OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS INCLUDING STOCHASTIC RENEWABLE ENERGY SOURCES USING SPIDER WASP OPTIMIZATION ALGORITHM

content

ABSTRACTS		
Salah Bezari Sidi Mohamed El Amine Bekkouche Mohamed Kamal Cherier	PASSIVE COOLING OF BUILDINGS IN THE MEDITERRANEAN REGION: A FOCUS ON GHARDAÏA CITY	2
Emin Alimusayev	THE CONCEPT OF "GREEN ENERGY" IN THE LEGISLATION OF AZERBAIJAN	3
Aleksandra NIKOLOVA MARKOVIĆ	INTERNATIONAL AVIATION LAW AND THE REGULATION OF SUSTAINABLE AVIATION FUELS AND HYDROGEN	4
Ayoub Ait Akka Nalla Ayoub Gounni Mustapha Elalami	SEASONAL AND PRE-COOLING EFFECTS ON HIGH- PRESSURE HYDROGEN STORAGE: A COMPARATIVE SIMULATION OF TANK TYPES	5
Badhon Kumar Rakshit	POWER AND PROTECTION: BALANCING RENEWABLE ENERGY EXPANSION WITH INDIGENOUS LAND RIGHTS	6
Sharif Ahammad Kazi Estieque Alam Delower Hossain Ismile Hossain Bhuiyan Jisan Ahmed	THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND RENEWABLE ENERGY ON AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN BANGLADESH: AN EMPIRICAL ASSESSMENT USING ARDL APPROACH	7
Kaddour ZINEB	THE ABILITY OF THE SALSOLA BARYOSMA PLANT TO REMOVE THE TURBIDITY OF WASTEWATER	8
Samra Benkacem Walid Boulfif Youghourta Belhocine	CO-CONVERSION OF PLASTICS AND BIOMASS: COPYROLYSIS FOR ADVANCED FUELS	9
M.A. Bossi B. Mehdaoui R. Fakhreddine L. Bih A. El Bouari	SYNTHESIS, MORPHOLOGY, STABILITY THERMIC AND PARTICLES SIZE EFFECT ON GAP ENERGY AND DIELECTRIC PROPERTIES IN MG ₂ NI ₂ O ₇	10
El mostafa Benharaf Ikram Mennas A .Arif Abdellah Zeroual Mohammed El idrissi	INVESTIGATION OF QUINOXALINE DERIVATIVES AS ELECTRON DONORS IN ORGANIC SOLAR CELLS USING DFT/TD-DFT	11
Arnab HAZRA Debashis DE	DRORES: DRONE SWARM PATH PLANNING FOR WIND-INDUCED DISASTER RESPONSE	13
Chaymae SERGENT Mohammed OUACHEKRADI Mohammed ELKABOUS Amal ATMANE Yasser KARZAZI	MOLECULAR ENGINEERING OF π -SPACER SENSITIZERS FOR IMPROVED CHARGE INJECTION INTO TiO ₂ IN DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS	14
Poh-Yee LOH Payam SHAFIGH	OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF USING COLOURED CONCRETE AS A PASSIVE URBAN COOLING SOLUTION	15
Ebubekir Siddik AYDIN	HYDROGEN PRODUCTION VIA MOLTEN-METAL- ASSISTED CONTINUOUS METHANE PYROLYSIS: A NASA CEA-BASED MODELING STUDY	16
Özgenur DİNÇER ŞAHAN Ahmet KARADAĞ	THE ROLE OF CO-CULTURE FERMENTATION IN BIOETHANOL PRODUCTION: HIGH-EFFICIENCY CONVERSION STRATEGIES FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS	18

Talha KURU Yigit Osman AKYILDIZ Ali KELEŞ Bariş ARICI Emre ASLAN İmren HATAY PATİR	INVESTIGATION OF BENTONITE-SUPPORTED MoS _x PHOTOCATALYSTS FOR PHOTOCATALYTIC HYDROGEN PRODUCTION	20
Yigit Osman AKYILDIZ Talha KURU Ali KELEŞ Bariş ARICI Emre ASLAN İmren HATAY PATİR	INFLUENCE OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON ELECTROCHEMICAL NITROGEN REDUCTION REACTION PERFORMANCE OF NANO-SCALE WS ₂ CATALYSTS	23
Amina Yahia	GIS-BASED MULTICRITERIA ANALYSIS FOR OPTIMAL GREEN HYDROGEN (GH ₂) PRODUCTION SITE SELECTION	25
Amina Yahia	TOWARDS ENERGY SUSTAINABILITY IN ALGERIA: OPTIMIZING HYBRID SYSTEMS COMBINING RENEWABLE ENERGIES AND SMART TECHNOLOGIES	26
Bui Xuan Vuong Vo Kim Ngan Pham Thi Thuy Trang Bui Thi Hoa	GREEN PRODUCTION OF HIGH-SURFACE-AREA BIOCHAR FROM SUGARCANE BAGASSE AND ITS INCORPORATION INTO TOOTHPASTE FORMULATION	27
Jūratė LIEBUVIENĖ Vida JOKUBYNIENĖ	THE POTENTIAL OF HYDROTREATED VEGETABLE OIL (HVO) IN REDUCING EMISSIONS FROM ROAD TRANSPORT	28
Pallabi Pahari Sushanta Kumar Mohapatra Jitendra Kumar Das	PERFORMANCE ANALYSIS OF III-V COMPOUND SEMICONDUCTOR-BASED DGTFT WITH GATE DIELECTRIC ENGINEERING	29
Ikram Mennas Mohammed El Idrissi Abdelkhalek Aboulouard El Mostafa Benharaf Ahmed Arif	UNVEILING STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIPS IN NON-FULLERENE ACCEPTORS FOR ORGANIC SOLAR CELLS USING DFT/TD-DFT	30
Hana MERAH Mohammed JAMEEL Abderahmane ABID Abdelmalek GACEM Djilani BENATTOUS	OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF SVC DEVICES FOR ENHANCED STABILITY IN RENEWABLE ENERGY INTEGRATED POWER SYSTEMS	31
Hana MERAH Abderahmane ABID Mohammed JAMEEL Abdelmalek GACEM Djilani BENATTOUS	OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS INCLUDING STOCHASTIC RENEWABLE ENERGY SOURCES USING SPIDER WASP OPTIMIZATION ALGORITHM	32
FULL TEXTS		
Serdar DİZMAN Vasyl Volodymyrovych BILYK Vasily Yuryevich ULYANOV	GEOTECHNICAL MONITORING STRATEGIES DURING THE COMPLETION PHASE OF AKKUYU NUCLEAR POWER PLANT CONSTRUCTION	34
Selma AKÇAY Sezgin YAŞA	INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BATTERY HOUSING GEOMETRY ON LI-ION BATTERY THERMAL MANAGEMENT	42
Selma AKÇAY Sezgin YAŞA	NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF NANOFLUIDS ON THE BATTERY THERMAL MANAGEMENT IN A CORRUGATED MODULE	53

Aynaz UĞUR	RESOLUTION OF INVESTMENT DISPUTES ARISING BETWEEN THE INVESTOR AND THE PARTY STATE WITHIN THE SCOPE OF THE ENERGY CHARTER AGREEMENT THROUGH ARBITRATION	65
Berk KÖKER Meltem SARIOĞLU CEBECİ	WASTEWATER FROM EMERGING ENERGY TECHNOLOGIES: COMPOSITION AND MEMBRANE TREATMENT APPROACHES	73
Meltem SARIOĞLU CEBECİ Berk KÖKER	INNOVATIVE OSMOTIC MEMBRANES (IOMs): CURRENT APPROACHES IN RESOURCE AND ENERGY RECOVERY	82
Shaik Mohammad Fazil J.Salai Thillai Thilagam P.C.Praveen Kumar	ELECTROMAGNETICS FOR WASTE MANAGEMENT	89
Ilir Xhebexhia	FROM DETERRENCE TO PREDICTION: HOW ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESHAPES THE CONCEPT OF SECURITY IN THE WESTERN BALKANS	92
Cenker AKTEMUR Barış KAVASOĞULLARI	THE EFFECT OF RECUPERATOR INTEGRATION ON ORGANIC RANKINE CYCLE PERFORMANCE: ENERGY AND ECONOMIC ANALYSES	104
Ertan BUYRUK Deniz GÖLBAŞI Mustafa CANER Yaren Su AĞBABA	WATER SOURCE HEAT PUMP APPLICATION IN A TOURISM REGION IN AFYONKARAHİSAR PROVINCE	117
Nilay AKÇAY Halim BÜYÜKUSLU	CONTRIBUTION OF VARIOUS MODEL COMPONENTS TO THE FISSION CROSS-SECTION OF 186, 184, 183, 182W FOR 3He-INDUCED REACTIONS	127
Bülent BÜYÜK Miraç KAMIŞLIOĞLU Ş. İpek KARAASLAN İsmail KOÇAK Canan CAN	PROTON-BORON FUSION for THE CLEAN ENERGY and TÜRKİYE	134
Canan CAN Miraç KAMIŞLIOĞLU Bülent BÜYÜK	DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF BORON BASED TARGET MATERIALS IN PROTON-BORON FUSION STUDIES	144
Vagif NEVRUZOĞLU Büşra TOPCU Melih MANIR	PRODUCTION AND INVESTIGATION OF CdS/CdTe SOLAR CELLS BASED ON CdTe PRODUCED BY THE COLD SUBSTRATE METHOD	154
Alisan AYVAZ	DETERMINING THE OPTIMAL POWER RATIO BETWEEN WIND ENERGY AND PEM ELECTROLYSIS SYSTEMS FOR ECONOMIC GREEN HYDROGEN PRODUCTION: A CASE STUDY FOR SAMSUN PROVINCE, TÜRKİYE	164
Dinore HASANI Gjelosh VATAJ Labinot TOPILLA	ANALYSIS OF THE INCREASE OF ELECTRICITY EFFICIENCY IN PUBLIC SECTOR IN THE MUNICIPALITY OF FERIZAJ, CASE STUDY – FERIZAJ	174
Hikmet ALİM	TOWARDS NEARLY ZERO-ENERGY BUILDINGS IN RURAL ARCHITECTURAL HERITAGE: THE CASE STUDY OF CALLI VILLAGE ROOM	194

ABSTRACTS

PASSIVE COOLING OF BUILDINGS IN THE MEDITERRANEAN REGION: A FOCUS ON GHARDAÏA CITY

Salah Bezari

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

Sidi Mohamed El Amine Bekkouche

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

Mohamed Kamal Cherier

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

Abstract

The Mediterranean region, and particularly the city of Ghardaïa in southern Algeria, faces pressing challenges linked to high solar radiation, arid climate, and growing energy demand for cooling. In this context, passive cooling of buildings represents a sustainable and cost-effective solution to reduce dependence on mechanical air conditioning. This paper provides a comprehensive review of passive cooling techniques in building design, including thermal mass, natural ventilation, shading devices, evaporative cooling, and earth-air heat exchangers, with a focus on their suitability under Mediterranean climatic conditions. Current research increasingly emphasizes the role of microclimatic parameters such as solar exposure, wind regime, and humidity in shaping the performance of these techniques. Special attention is given to recent studies from Ghardaïa, which offer valuable insights into the adaptation of vernacular architecture and modern passive strategies. A critical gap identified is the limited integration of microclimate feedback into building operation models, despite its significant influence on thermal comfort and energy efficiency. Previous review articles have addressed isolated aspects of passive cooling, yet few have systematically assessed the two-way interaction between microclimate and building operation. This paper contributes by synthesizing available knowledge and highlighting future development directions, including advanced simulation tools, sensor-based monitoring, and climate-responsive architectural design. The findings underscore the importance of localized studies in hot, arid Mediterranean cities to guide the transition toward energy-efficient, resilient, and sustainable built environments.

Keywords: Passive Cooling, Building Energy Efficiency, Microclimate Interaction, Mediterranean C

THE CONCEPT OF “GREEN ENERGY” IN THE LEGISLATION OF AZERBAIJAN

Emin Alimusayev

Phd candidate, Baku State University, Faculty of Law, Baku, Azerbaijan.

ORCID ID: 0009-0001-2300-0690

ABSTRACT

The impacts of climate change are becoming more evident in Azerbaijan. Reducing water sources, increasing number of forest fires, declining level of Caspian Sea and abnormal weather events are the most noticeable effects of climate change in the region. In the contrast of intensifying climate change, transitioning to green energy has become essential.

As a country rich in fossil fuel resources, Azerbaijan has taken major steps towards green energy transition in the last 5 years by enhancing green policy and legislative framework. For example, in 2021 the Law “on the Use of Renewable Energy Sources in the Production of Electric Energy”, in 2023 the Law “on Energy” and the Law “Electro-energy” were adopted. The adoption of “Azerbaijan 2030: National Priorities on the Socio- economic Development” marked pivotal point in the green energy transition, as fifth national priority declared the aim of “green energy space” for nation’s socio-economic development. In order to implement the National Priorities, “Socio-economic Development Strategy of Azerbaijan in 2022-2026” was approved. This Strategy sets clear steps to be taken by the government to promote green energy transition and energy efficiency. Furthermore, the liberation of Karabakh and Eastern Zengezur opened a new page in green transition of Azerbaijan, as the President declared liberated territories “clean energy zones”.

This study analyses the concept of “green energy” in the Republic of Azerbaijan by addressing latest legal developments and national policy documents. Furthermore, this reserach reviews the natinal energy objectives of Azerbaijan and the effectiveness of the relevant legal acts in achieving these objectives.

Keywords: climate change, green energy, environmental legislation, Azerbaijan.

INTERNATIONAL AVIATION LAW AND THE REGULATION OF SUSTAINABLE AVIATION FUELS AND HYDROGEN

Aleksandra NIKOLOVA MARKOVIĆ

Associate Professor, Megatrend University, Faculty of Law, Belgrade-Serbia (Responsible Author) ORCID
ID: <https://orcid.org/0009-0000-9724-8739>

ABSTRACT

The global aviation industry is under increasing pressure to adapt to the international framework for tackling climate change, through the requirements for reducing harmful gases, decarbonizing aviation, and ensuring the sustainability of the aviation industry in the long term. Sustainable aviation fuels (SAF) and hydrogen stand out as the most promising alternatives to the conventional fossil fuel kerosene. The transition to greener skies is a complex legal issue that must be viewed from several different angles, such as regulatory alignment, certification, and harmonization of international aviation law. Although technological processes have made these fuels a reality, the regulatory and legal frameworks differ across countries.

This paper aims to analyze the international legal framework related to environmental protection, CO₂ emissions reduction, and the introduction of alternative fuels in the aviation industry. Special focus is placed on the analysis of the Chicago Convention, ICAO's environmental standards, and the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). The analysis further examines regional and national approaches, focusing on the European Union's ReFuel Aviation Regulation and the US Tax credit approach for promoting SAFs and hydrogen in order to emphasize the different regulatory and legal treatments by countries.

Ultimately, by analyzing the current legal frameworks and approaches, the paper concludes that stronger international cooperation and the establishment of uniform international aviation regulations are the most important foundations for achieving a legally grounded transition towards sustainable decarbonization of international aviation.

Keywords: *sustainable aviation fuels, hydrogen, aviation law, international law, sustainable energy.*

SEASONAL AND PRE-COOLING EFFECTS ON HIGH-PRESSURE HYDROGEN STORAGE: A COMPARATIVE SIMULATION OF TANK TYPES

Ayoub Ait Akka Nalla

Phd student, Physics Department, LPMAT Laboratory, Faculty of Sciences Ain Chock, Hassan II University, Casablanca, Morocco

Ayoub Gounni

Prof, Physics Department, LPMAT Laboratory, Faculty of Sciences Ain Chock, Hassan II University, Casablanca, Morocco

Mustapha Elalami

Prof, Physics Department, LPMAT Laboratory, Faculty of Sciences Ain Chock, Hassan II University, Casablanca, Morocco

Abstract

Hydrogen is gradually becoming a clean energy carrier; the transport sector can leverage this technology since it can power cars and trucks without generating harmful emissions when used in a fuel cell. However, the high temperatures resulting from high pressure hydrogen filling reduce storage efficiency and safety. Pre-cooling strategies and thermal management systems powered by renewable energy present a promising solution to alleviate these problems. In this work, the performance of various precooling methods and the effects of ambient temperature and pressure ramp rates on hydrogen storage efficiency are analyzed using H2Fills simulation software. Results demonstrate that pre-cooling hydrogen to -20°C can increase the state of charge from 19% to 93% and enhance storage mass by up to 166% compared to refueling at 20°C . Type 4 tanks, which include composite liners, showed improved thermal behavior and faster filling performance compared with Type 3 tanks. For instance, at 21 MPa/min, Type 4 tanks needed 320 kJ of energy for cooling compared to 830 kJ for Type 3 tanks. Seasonal analysis confirms improved performance during winter, while summer conditions significantly reduce SOC due to accelerated heat buildup.

Keywords: Hydrogen Pre-Cooling, High-Pressure Storage, Thermal Management, H2Fills Simulation, Fuel Cell Vehicles.

POWER AND PROTECTION: BALANCING RENEWABLE ENERGY EXPANSION WITH INDIGENOUS LAND RIGHTS

Badhon Kumar Rakshit

University of Rajshahi, Faculty of Law, Department of Law and Land Administration, Rajshahi, Bangladesh
(Responsible Author) ORCID: 0009-0008-6041-5669

Abstract

The global race to expand renewable energy is often framed as a clear win for the planet. But on the ground, the story is more complicated. Large- scale wind farms, solar parks, and hydro projects are frequently built on lands that Indigenous peoples have lived on, governed, and protected for centuries. When these projects move forward without free, prior, and informed consent, they risk repeating the same injustices that fossil fuel development caused, only this time in the name of “green progress”. This work looks at how we can shift to renewable energy without repeating the same mistakes made during the fossil fuel era? To understand this, it examines international human rights law, national land-use rules, and cases where Indigenous groups have opposed those “green” development projects. It reviews cases showing both the successes and failures of legal protections for Indigenous communities. The paper argues that respecting those communities’ sovereignty is not a barrier to development but a path toward more durable, just, and socially accepted energy projects. Solutions like benefit-sharing, locally led renewable projects, and clear requirements for free and informed consent help make the transition just and equitable also. True climate justice requires including the communities that have cared for these lands for generations- not ignore them.

Keywords: Renewable Energy, Indigenous Rights, Climate Justice, Legal Frameworks, Sustainable Development.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND RENEWABLE ENERGY ON AGRICULTURAL PRODUCTIVITY IN BANGLADESH: AN EMPIRICAL ASSESSMENT USING ARDL APPROACH

Sharif Ahammad

Lecturer., Erciyes University, Sher-e-Bangla Agricultural University, Faculty of Agribusiness Management,
Dhaka- Bangladesh. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5654-4338>

Kazi Estieque Alam

Research Assistant, Sher-e-Bangla Agricultural University, Faculty of Agribusiness Management, Dhaka-
Bangladesh. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7258-7174>

Delower Hossain

Asst. Prof., Sher-e-Bangla Agricultural University, Faculty of Animal Science and Veterinary Medicine,
Dhaka- Bangladesh. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9269-5353>

Md Ismile Hossain Bhuiyan

Research Assistant, Sher-e-Bangla Agricultural University, Faculty of Animal Science and Veterinary
Medicine, Dhaka-Bangladesh. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-8325-3813>

Md Jisan Ahmed

Research Assistant, Sher-e-Bangla Agricultural University, Faculty of Animal Science and Veterinary
Medicine, Dhaka-Bangladesh (Responsible Author). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5113-520X>

ABSTRACT

Agriculture is crucial for sustaining human but remains highly vulnerable to climate change. This sector contributes to greenhouse gas emissions, especially through irrigation, posing risks to crop yields and rural livelihoods. This study used ARDL model to investigate the impact of CO₂, methane, N₂O emissions, and renewable energy on agricultural productivity in Bangladesh. Panel data from the WDI were analyzed through descriptive statistics, correlation, and unit root tests. The relationships among the variables were estimated using ARDL and dynamic ARDL models, with bounds testing and lag determination. Correlation analysis revealed that agricultural output is positively associated with fertilizer use and N₂O emissions, while renewable energy consumption, rural population, and CO₂ emissions were negatively associated. Unit root and bounds testing confirmed long-run cointegration among the variables, validating the ARDL approach. Long-run estimates showed that CO₂ emissions, per capita emissions, renewable energy use, and rural population reduce output, while fertilizer consumption and N₂O emissions enhance productivity. Short-run dynamics highlighted the lagged effects of CO₂ emissions and rural population. The dynamic ARDL simulation further confirmed persistence in output and mixed short-run impacts of emissions, with N₂O remaining a strong positive driver. Diagnostic tests validated model stability, while Granger causality results indicated the bidirectional relationship between agricultural output and agricultural CO₂ emissions, renewable energy, fertilizer, land use, rural population, and N₂O emissions alongside unidirectional links with CO₂ emissions per capita and CH₄ emission. The findings emphasize that while renewable energy mitigates emissions, its expansion may constrain output, highlighting the trade-off between sustainability and productivity.

Keywords: Climate Change, Renewable Energy, Greenhouse Gas Emissions, Agricultural Productivity, ARDL Model



THE ABILITY OF THE SALSOLA BARYOSMA PLANT TO REMOVE THE TURBIDITY OF WASTEWATER

Kaddour ZINEB

Asst. Prof., Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems, Kayseri-Türkiye
(Responsible Author) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7975-5921>

ABSTRACT

Aquatic plants that can adapt to and survive in floating settings are employed in natural biological treatment systems all around the world since numerous studies have demonstrated how well these plants can remove contaminants from wastewater. We shall demonstrate the efficacy of the Saharan plant in this study, as it has a very respectable capacity to eliminate contaminants. Since the *Salsola Baryosma* plant is situated in the estuary of sewage effluent that is subject to initial treatment in El-Oued city, in the northeastern Algerian desert, this study intends to highlight the role of the Saharan plant in the secondary treatment of wastewater. Before its conversion to an estuary, this region was recognized for its abundance of desert grazing plants. However, the majority of plants managed to adjust to their new surroundings. Because of the way its morphology was designed, the *Salsola* plant was able to live in harmony with the estuary water and its presence on the site's periphery, depending on its needs for water. In the area of residential wastewater treatment, the study was conducted on a pilot scale (ONA El-Oued, Algeria). The findings demonstrated that the *Salsola* treatment reduced the turbidity from 106.34 NTU to 3.28 NTU. According to the study's findings, the *Salsola* plant is highly effective at Turbidity removal. This plant, despite not being considered an aquatic plant, can demonstrate effective treatment in wastewater estuaries.

Keywords: Phytoremediation, Saharan plant, Turbidity, Wastewater, El-Oued.

CO-CONVERSION OF PLASTICS AND BIOMASS: COPYROLYSIS FOR ADVANCED FUELS

Samra Benkacem

Department of Process Engineering, Faculty of Technology, University of 20 August 1955, Skikda 21000, Algeria

Walid Boultif

Department of Process Engineering, Faculty of Technology, University of 20 August 1955, Skikda 21000, Algeria

Youghourta Belhocine

Department of Process Engineering, Faculty of Technology, University of 20 August 1955, Skikda 21000, Algeria

Laboratory of catalysis, bioprocess and environment, 20 August 1955 University of Skikda, P.O. Box 26, El Hadaik Road, 21000, Skikda, Algeria

Abstract

The growing challenges of environmental pollution and energy scarcity highlight the urgent need for sustainable plastic waste management strategies. Among various methods, pyrolysis offers a thermo-chemical approach that not only mitigates plastic pollution but also recovers valuable energy resources in the form of oil and gas. Unlike conventional mechanical recycling, pyrolysis can process mixed plastic waste streams, making it a promising route for large-scale application.

This research investigates the production of fuel from plastic waste through pyrolysis. Experiments were carried out on polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), and polyvinyl chloride (PVC) within a temperature range of 250–450 °C, under varying operational conditions such as heating rates and reactor configurations. The shredded plastic feedstocks were thermally decomposed into three major products: liquid oil, gaseous fuel, and solid residues. Characterization of the pyrolysis oil revealed physicochemical properties comparable to those of conventional diesel, suggesting its potential use as an alternative fuel in compression ignition engines.

Key words: plastic waste, pyrolysis, polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC)

SYNTHESIS, MORPHOLOGY, STABILITY THERMIC AND PARTICLES SIZE EFFECT ON GAP ENERGY AND DIELECTRIC PROPERTIES IN MgNiO_2 .

M.A. Bossi

Laboratory of Physical-Chemistry, Materials and Catalysis, University Hassan II of Casablanca, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Department of Chemistry, Casablanca, Morocco

B. Mehdaoui

Laboratory of Physical-Chemistry, Materials and Catalysis, University Hassan II of Casablanca, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Department of Chemistry, Casablanca, Morocco

R. Fakhreddine

GeMEV, Laboratory Materials Engineering for Environment and Valorization, University Hassan II, Faculty of Sciences Ain Chock, Casablanca, Morocco

L. Bih

Laboratory of Sciences and Crafts of Engineer, Materials and Processes Department, ENSAM, Meknes, Moulay Ismail University, Meknes, Morocco

A. El Bouari

Laboratory of Physical-Chemistry, Materials and Catalysis, University Hassan II of Casablanca, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Department of Chemistry, Casablanca, Morocco

Abstract

The objective of this study was to investigate the influence of particle size on the gap energy and dielectric properties of MgNiO_2 . The compound was synthesised via two distinct methods: the solid-state method (denoted MNO-S) and organometallic combustion (denoted MNO-SG). Both powders exhibited cubic crystallisation with Fm-3m space group and cell parameters $a = 4.189056 \text{ \AA}$ for MNO-S and $4.192983 \text{ \AA}$ for MNO-SG. Morphological analyses were conducted using MEB-EDS and TEM-EDS, which confirmed the formation of micro-particles in MNO-S and nanoparticles in MNO-SG. The optical band gaps of the samples were determined by means of diffuse reflectance spectroscopy. A comparable band gap value of 3.7 eV was attained, and the thermal stability of the compounds was substantiated by DSC analyses. The findings indicated that the compounds exhibited exceptional stability, with no discernible phase transitions. The dielectric properties were investigated at frequencies between 10 Hz and 1 MHz, with temperatures ranging from 30°C to 390°C. The results demonstrate a notable increase in the dielectric constant, accompanied by a reduction in loss tangent, as the particle size is diminished. The impedance spectroscopy revealed the presence of two broad peaks in both the low and high frequencies, which can be attributed to the response of the grains and grain boundaries. The activation energy of relaxation time and DC conductivity exhibited a decline with a reduction in grain size, accompanied by an increase in capacity. The analysis of AC conductivity through the Jonscher low model indicated the presence of diverse mechanisms governing charge conductivity. The extracted activation energy from modulus demonstrated a decrease with a reduction in particles, exhibiting a similar order of magnitude to that obtained from the impedance spectroscopy.

Keywords: MgNiO_2 , solid-state, sol-gel, XRD, nanoparticles, MEB-EDS, Gap energy, DSC, dielectric constant, impedance, ac-conductivity

INVESTIGATION OF QUINOXALINE DERIVATIVES AS ELECTRON DONORS IN ORGANIC SOLAR CELLS USING DFT/TD-DFT

El mostafa Benharaf

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary Faculty, Beni Mellal, Morocco.

Ikram Mennas

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary Faculty, Beni Mellal, Morocco.

A .Arif

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary Faculty, Beni Mellal, Morocco.

Abdellah Zeroual

Molecular Modeling and Spectroscopy Research Team, Faculty of Sciences, Chouaib Doukkali University, El Jadida, Morocco. El Jadida, Morocco.

Mohammed El idrissi

Team of Chemical Processes and Applied Materials, Sultan Moulay Slimane University, Polydisciplinary Faculty, Beni Mellal, Morocco.

Abstract

In this theoretical investigation, we explore the optoelectronic properties of four quinoxaline-based derivatives (M1–M4) as potential electron donor materials for application in organic solar cells (OSCs). The study is carried out using density functional theory (DFT) and time-dependent (TD-DFT) calculations at the B3LYP/6-31G(d,p) level, incorporating solvation effects via the PCBM model in tetrahydrofuran (THF). The photovoltaic performance of individual molecules is evaluated by examining important parameters such as frontier molecular orbital energies, band gaps, absorption spectra, and overall reactivity descriptors.[1-2]

Among the studied derivatives, compound M3 stands out by exhibiting the narrowest energy bandgap (2.94 eV), the broadest and most red-shifted absorption spectrum (extending from 400 to 800 nm), and the highest chemical softness (0.678 eV). These characteristics suggest improved light-harvesting efficiency and more favorable charge transport properties, making M3 a strong candidate for use in OSCs. Conversely, M1 and M2 display deeper HOMO energy levels (−6.88 eV and −6.81 eV, respectively), which are conducive to achieving higher open-circuit voltages (1.28 eV for M1 and 1.05 eV for M2). However, their relatively large bandgaps (4.01 eV and 4.00 eV) limit their ability to absorb across the solar spectrum. Overall, this study highlights the tunability of quinoxaline derivatives through molecular design and provides valuable insights into their potential as efficient donor materials in the development of high-performance organic photovoltaic devices.

Keywords: Quinoxaline derivatives, Organic solar, TD-DFT, Photovoltaic performance, Charge transport, Energy bandgap

References:

- [1] M.K. Atouailaa., A. Aboulouard, A. Zeroual, A. Syed, M. Boulghalat, M. Can, M. El idrissi. Surveying Novel Pyrazine Acceptor Materials for Bulk Heterojunction Solar Cells:

Computational Insights into Photovoltaic Performance. Journal of Fluorescence, **(2025)**, 1-13.
<https://doi.org/10.1007/s10895-025-04371-2>

[2] A. Aboulouard, N. Demir, Mu. Can, M. El idrissi. Electronic and optical aspects of novel ~~quinoxaline derivatives as electron donor~~ materials for bulk heterojunction solar cells. Journal of Molecular Graphics and Modelling. 121, **(2023)**, 108462.
<https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2023.108462>

DRORES: DRONE SWARM PATH PLANNING FOR WIND-INDUCED DISASTER RESPONSE

Arnab HAZRA ^{1,2}

¹Department of Computer Science and Engineering, Netaji Subhash Engineering College, Garia, West Bengal, India (Responsible Author) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3846-3093>

Debashis DE ²

² Centre of Mobile cloud computing, Department of Computer Science and Engineering, Maulana Abul Kalam Azad University of Technology, West Bengal, Nadia, WB, India ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9688-9806>

ABSTRACT

Internet of Drone Things (IoDT) is a hybrid, on-demand network of flying drones that can access the internet, share data with other drones and various IoT devices, and process on-board data. The IoDT paradigm can unravel multidimensional problems in disasters. Drone applications especially in wind-induced disaster management is a dominant research area for its decision-making capability with dynamic path planning in harsh situations. In strong wind situations, drones sometimes are not capable of flying and highly deviate from its intended route. But, in a post disaster scenario, when wind becomes moderate, swarms of drones are capable to reach to the affected area. Path planning of the drones towards the affected area in presence of wind is crucial for damage assessment, supply, and rescue. For this reason, optimized path planning of swarms of drones is a safeguard to reach the centre of disaster. In this proposed approach, we investigate drones' path using Glowworm Swarm Optimization (GSO) in windy environments. In this work, the deployed drones are modelled as a glowworm in a search space. The luciferin of the glowworms is updated with respect to the proximity to the destination and moves probabilistically towards their neighbour with higher luciferin value. Our proposed method generates optimized path of the drones toward the centre of disaster in both no-wind and wind-influenced scenarios. A comparative analysis of energy consumption for sustainability is also performed to demonstrate the wind influence in drones' path with respect to no-wind scenario. The results show that GSO effectively guides the flying drones with feasible trajectories towards the centre of disaster in a windy environment.

Keywords: Glowworm swarm optimization, Path planning, IoDT, Sustainability, Wind-induced disaster response.

MOLECULAR ENGINEERING OF π -SPACER SENSITIZERS FOR IMPROVED CHARGE INJECTION INTO TiO₂ IN DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS.

Chaymae SERGENT

PhD Student, University Mohammed First, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Oujda-Morocco
(Corresponding Author) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-0829-6305>

Mohammed OUACHEKRADI

PhD Student, University Mohammed First, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Oujda-Morocco
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Mohammed ELKABOUS

Dr, University Mohammed First, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Oujda-Morocco ORCID
ID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Amal ATMANE

PhD Student, University Mohammed First, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Oujda-Morocco
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Yasser KARZAZI

Prof., University Mohammed First, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Oujda-Morocco ORCID
ID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

ABSTRACT

The optimization of energy use, particularly from fossil sources, is a critical challenge for preserving resources and mitigating the effects of climate change. In this context, the development of sustainable energies, especially solar energy, represents a major avenue for improving energy utilization in technological, industrial, and economic sectors. Advances in solar cell technology play a central role in this transition. Within this framework, the present work investigates the development of next-generation solar cells, with a particular focus on dye-sensitized solar cells (DSSCs). This study explores the influence of π - bridge modification in dye molecules on the optoelectronic and charge-transfer properties of DSSCs, including excitation energies, absorption spectra, oscillator strengths, open-circuit voltages, and frontier molecular orbital energies (HOMO and LUMO). Density Functional Theory (DFT) and Time-Dependent Theory (TD-DFT), using the 6-31G(d,p) basis set, were employed to evaluate these properties. This research emphasizes the correlation between molecular design and photovoltaic performance, highlighting how structural modifications at the π -bridge level can enhance light absorption and electron injection. By providing a detailed theoretical framework, the study contributes to a deeper understanding of structure–property relationships and offers valuable guidelines for the rational design of innovative dyes. Our results indicate that the studied molecules are promising candidates for dye-sensitized solar cells (DSSCs) applications.

Keywords: Solar cells; Climate change; Energy; DSSC; DFT; TD-DFT.

OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF USING COLOURED CONCRETE AS A PASSIVE URBAN COOLING SOLUTION

Poh-Yee LOH

Centre for Building, Construction & Tropical Architecture (BuCTA), Faculty of Built Environment,
Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9064-1914>

Payam SHAFIGH

Department of Civil Engineering, College of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of
Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8576-3984>

ABSTRACT

The passive mitigation methods for urban heat island (UHI) phenomenon are classified into green (vegetation), blue (water bodies) and grey (man-made structures) infrastructures. Among the grey infrastructures, concrete is commonly used in pavement, walls and roofs that are exposed to solar radiation. Although concrete is one of the main contributors to UHI effect, its impact can be minimized by altering the solar reflectance of surfaces. Cool coatings with high solar reflectance can efficiently reduce the surface temperature. However, due to coatings are predominantly organic-based, susceptible to abrasion, lower durability when exposed to weathering, that leading to more frequent maintenance. Hence, using exposed concrete without organic coating, especially in high traffic locations or areas with difficulties to access for maintenance can reduce the overall life-cycle costing while extending lifespan. Colour of concrete is mainly influenced by the colour of the cement (binder). White cement concrete has higher albedo (more sunlight reflection and lower thermal absorption) compared to grey cement concrete. While addition of colourants enhances the visual appearance of concrete, it may also modify the albedo of the concrete surface. White, cool and reversible thermochromic pigments can be incorporated into the cement matrix to reduce the solar heat absorption of concrete. However, due to coloured concretes are permanently exposed to view; therefore, it shall be treated with high standard to achieve the desired aesthetic appearance. This type of concrete requires an involvement of professionals and skilled workers to deliver a quality and durable product. In addition, cement is highly alkaline and pigment may be chemically unstable in this alkaline environment and lose its chromatic properties in the long run. Research and tests are needed prior to application of a solar reflective pigment in the concrete matrix to ensure that it does not compromise the mechanical properties, optical properties and its durability.

Keywords: Albedo, concrete, pigment, colour, strength, surface, solar radiation

**ERİMİŞ METAL DESTEKLİ SÜREKLİ METAN PİROLİZİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ:
NASA CEA TABANLI BİR MODELLEME ÇALIŞMASI****HYDROGEN PRODUCTION VIA MOLTEN-METAL-ASSISTED CONTINUOUS METHANE
PYROLYSIS: A NASA CEA-BASED MODELING STUDY****Ebubekir Siddik AYDIN**Asst. Prof., Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences,
Department of Chemical Engineering, Sivas-Türkiye (Responsible Author)ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8704-4502>**ÖZET**

Hidrojen, enerji dönüşüm teknolojilerinde ve karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşmada stratejik bir rol oynamaktadır. Günümüzde hidrojen üretiminin önemli bir kısmı fosil yakıtlara dayanmakla birlikte, fosil yakıt kaynaklı CO₂ emisyonları nedeniyle temiz hidrojen üretim yöntemleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu bağlamda, metan pirolizi ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$), doğrudan karbonsuz hidrojen üretimi için umut vadeden bir yöntemdir. Özellikle erimiş metalde gerçekleştirilen piroliz prosesleri, yüksek ısı kapasitesi, hızlı ısı transferi ve kontrol edilebilir karbon ayrışması gibi avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, erimiş metal destekli sürekli metan pirolizi yoluyla hidrojen üretimi, NASA CEA (Uygulamalı Kimyasal Denge) yöntemi kullanılarak modellenmiş ve elde edilen termodinamik denge sonuçları, metan pirolizi kinetik modelleri ile karşılaştırılmıştır. CEA tabanlı model, farklı sıcaklık aralıklarında (800-1800 K) metan dönüşümünü, hidrojen verimini ve karbon oluşumunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Bununla birlikte, kinetik modellere ait reaksiyon hızları, aktivasyon enerjileri ve kararlı durum süreleri metan pirolizi hakkında bilgiler sağlamıştır. Karşılaştırma sonuçları NASA CEA modelinin sistemin maksimum verimlilik potansiyelini ve termodinamik sınırlarını belirlemek için uygun olduğunu, kinetik modellerin ise gerçek zamanlı reaktör tasarımı için daha güvenilir olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, erimiş metal profilinin (ör. Sn, Cu, Fe) seçiminin hem termodinamik denge hem de kinetik davranış üzerinde kritik etkileri olduğu bilinmesine rağmen, erimiş metal önerilen model çalışmasında yalnızca bir karbon taşıyıcısı olarak dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, NASA CEA tabanlı model ve kinetik modellerin birlikte kullanılması, erimiş metal destekli metan pirolizinin daha bütünsel bir değerlendirmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe geçiş için daha gerçekçi tahminler sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliği ve karbon yönetimi açısından hidrojen üretim süreçlerinin optimizasyonuna da katkıda bulunur.

Anahtar Kelimeler: Denge modeli, erimiş metal, hidrojen.**ABSTRACT**

Hydrogen plays a strategic role in energy conversion technologies and achieving carbon neutrality targets. While a significant portion of hydrogen production today relies on fossil fuels, studies on clean hydrogen production methods continue due to CO₂ emissions from fossil fuels. In this context, methane pyrolysis (CH_4

$\rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$) is a promising method for direct carbon-free hydrogen production. Pyrolysis processes, particularly those conducted in molten metal, offer advantages such as high heat capacity, rapid heat transfer, and controllable carbon separation. In this study, hydrogen production via molten metal-

assisted continuous methane pyrolysis was modeled using the NASA CEA (Chemical Equilibrium with Applications) method, and the obtained thermodynamic equilibrium results were compared with methane pyrolysis kinetic models. The CEA-based model was used to predict methane conversion, hydrogen yield, and carbon formation over different temperature ranges (800-1800 K). However, the reaction rates, activation energies, and steady-state times of the kinetic models provided insights into methane pyrolysis. Comparison results showed that the NASA CEA model was suitable for determining the maximum efficiency potential and thermodynamic limits of the system, while the kinetic models were more reliable for real-time reactor design. However, although the selection of the molten metal profile (e.g., Sn, Cu, Fe) is known to have critical effects on both thermodynamic equilibrium and kinetic behavior, the molten metal was considered only as a carbon carrier in the proposed model study. Consequently, the combined use of the NASA CEA-based model and kinetic models provides a more holistic assessment of molten metal-assisted methane pyrolysis. This approach not only provides more realistic predictions for the transition from laboratory to industrial scale but also contributes to the optimization of hydrogen production processes in terms of energy efficiency and carbon management.

Keywords: Equilibrium model, molten metal, hydrogen.



BİYOETANOL ÜRETİMİNDE EŞ KÜLTÜR FERMENTASYONUNUN ROLÜ: LİGNOSELÜLOZİK BİYOKÜTLEDEN YÜKSEK VERİMLİ DÖNÜŞÜM STRATEJİLERİ

Özgenur DİNÇER ŞAHAN

Yozgat Bozok Üniversitesi, Kenevir Araştırmaları Enstitüsü, Malzeme ve Enerji, Yozgat, Türkiye,
<https://orcid.org/0000-0002-2598-4865>

Ahmet KARADAĞ

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Bursa, Türkiye, <https://orcid.org/0000-0003-4676-683X>

ÖZET

Artan enerji talebi, fosil yakıtların çevresel etkileri ve iklim değişikliği ile mücadele gerekliliği, biyoyakıtları sürdürülebilir enerji çözümleri arasında ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda biyoetanol, yenilenebilir, çevre dostu ve karbon ayak izi düşük bir yakıt olarak dikkat çekmektedir. Lignoselülozik biyokütle gibi sürdürülebilir hammaddelerin endüstriyel ölçekte etanol üretiminde kullanılması, yüksek verimlilik ve ekonomik avantajlar sunar. Ancak, bu tür biyokütlelerin içerdiği hem heksoz (C6) hem de pentoz (C5) şekerlerin etkin bir şekilde fermente edilebilmesi, mevcut mikroorganizma sınırlamaları nedeniyle zorluk oluşturmaktadır. Özellikle yaygın olarak kullanılan *Saccharomyces cerevisiae* mayası yalnızca heksozları fermente edebilirken, doğada yaygın olan pentozları değerlendiremez. Bu engelin aşılması için eş kültür fermentasyonu, yani farklı mikroorganizma suşlarının birlikte kullanımı, etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. *Pichia stipitis*, *Scheffersomyces stipitis*, *Spathaspora passalidarum* gibi pentoz fermente edebilen maya türleri, *Saccharomyces cerevisiae* ile eş kültürde kullanılarak her iki şeker grubunun eş zamanlı dönüşümü sağlanabilir. Bu çalışmada, lignoselülozik biyokütle kaynaklı biyoetanol üretiminde eş kültür stratejisinin verim, etkinlik, sinerjik avantajları ve karşılaşılan zorlukları bilimsel literatür temelinde değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Biyoyakıt, biyoetanol, lignoselülozik biyokütle, eş kültür fermentasyonu, pentoz fermentasyonu

THE ROLE OF CO-CULTURE FERMENTATION IN BIOETHANOL PRODUCTION: HIGH-EFFICIENCY CONVERSION STRATEGIES FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS

ABSTRACT

The growing global demand for sustainable energy, along with the environmental concerns associated with fossil fuel consumption, has highlighted the importance of biofuels. Among them, bioethanol stands out as a renewable, environmentally friendly, and low-carbon alternative. Industrial-scale bioethanol production from lignocellulosic biomass requires not only an abundant and renewable feedstock but also efficient conversion of both hexose (C6) and pentose (C5) sugars. The widely used *Saccharomyces cerevisiae* strain is effective in fermenting hexoses but lacks the ability to utilize pentoses, which are the second most abundant sugars in nature. To overcome this limitation, co-culture fermentation—using compatible yeast strains in synergy—has emerged as a promising strategy. Pentose-fermenting yeasts such as *Pichia stipitis*, *Scheffersomyces stipitis*, *Spathaspora*

passalidarum, and others have been successfully co-cultured with *Saccharomyces cerevisiae* to simultaneously convert both sugar types into ethanol. This review examines the efficiency, advantages, and limitations of co- culture approaches in bioethanol production from lignocellulosic biomass, emphasizing recent advances and potential for industrial application.

Keywords: Biofuel, bioethanol, lignocellulosic biomass, co-culture fermentation, pentose conversion

INVESTIGATION OF BENTONITE-SUPPORTED MoS_x PHOTOCATALYSTS FOR PHOTOCATALYTIC HYDROGEN PRODUCTION

Talha KURU

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye (Corresponding Author) ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0001-9662-8211>

Yigit Osman AKYILDIZ

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7057-7268>

Ali KELEŞ

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye

Barış ARICI

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye

Emre ASLAN

Selçuk University, Faculty of Science, Department of Biochemistry, Konya-Türkiye ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0002-7672-2873>

İmren HATAY PATIR

Selçuk University, Faculty of Science, Department of Biotechnology, Konya-Türkiye ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0003-2937-6557>

ABSTRACT

Photocatalysis holds great potential for sustainable hydrogen production, as it enables the direct conversion of solar energy into chemical energy. However, in photocatalytic processes, the rapid recombination of charge carriers remains one of the major challenges that significantly reduces system efficiency [1]. Overcoming these limitations requires the development of new support materials, among which clay minerals have attracted considerable attention. Due to their large surface area, high adsorption capacity, and structural features that promote charge separation, clays offer remarkable advantages in dye-sensitized hydrogen production systems [1]. Bentonites, consisting mainly of montmorillonite, are natural clay minerals that exhibit high cation exchange capacity, large specific surface area, and strong adsorption properties[2]. These characteristics make them widely applicable in environmental remediation, wastewater treatment, and ion removal, as well as suitable support materials in catalytic systems. The high surface reactivity of bentonite facilitates the effective adsorption of dye molecules and contributes to enhanced charge separation. In this study, bentonite with its characteristic layered structure was sensitized with eosin Y dye to enable hydrogen generation under visible light irradiation. To further improve catalytic performance, MoS_x cocatalysts were deposited onto the bentonite surface by a photodeposition method. Among transition metal dichalcogenides, MoS₂ is frequently employed due to its high chemical stability and low cost. Its remarkable activity in the hydrogen evolution reaction (HER) primarily originates from the catalytically active edge sites. During the photodeposition process, amorphous MoS_x species enriched with unsaturated S–S bonds were generated, providing additional active sites, facilitating charge transfer, and thereby significantly enhancing hydrogen production efficiency [3]. The hydrogen generation rate of the bentonite/EY photocatalyst was determined to be 1.37 mmol g⁻¹s⁻¹, whereas the incorporation of the MoS_x cocatalyst increased this value to 7.55 mmol g⁻¹s⁻¹ for the bentonite/EY/MoS_x system. These results demonstrate that natural clay minerals such as bentonite

can serve as efficient support

materials for dye-sensitized MoS_x-based photocatalysts, offering a promising approach for hydrogen production under visible light irradiation.

Keywords: hydrogen, catalysis, catalyst, clay, photocatalysis

***Acknowledgment:** This work was supported by the R&D project No. AG-24-04 conducted by YEO Technology

FOTOKATALİTİK HİDROJEN ÜRETİMİNDE BENTONİT DESTEKLİ MoS_x FOTOKATALİZÖRLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Sürdürülebilir hidrojen üretiminde fotokataliz, doğrudan güneş ışığının kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlaması nedeniyle büyük potansiyele sahiptir. Ancak fotokatalitik süreçlerde, yük taşıyıcıların hızlı rekombinasyonu, sistem verimliliğini azaltan başlıca sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır[1]. Bu kısıtların aşılabilmesi için yeni destek malzemelerinin kullanımı kritik önem taşımakta, özellikle kil mineralleri bu noktada dikkat çekmektedir. Geniş yüzey alanı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve yük ayrışmasını teşvik eden yapısal özellikleri sayesinde killer, boya duyarlı hidrojen üretimi çalışmalarında umut verici avantajlar sunmaktadır[1]. Bentonit, montmorillonit esaslı yapısı nedeniyle yüksek katyon değişim kapasitesi, geniş özgül yüzey alanı ve güçlü adsorpsiyon özellikleri sergileyen doğal bir kil mineralidir[2]. Bu özellikleri sayesinde çevresel iyileştirme, atık su arıtımı ve iyon gideriminde yaygın olarak kullanılmakta; aynı zamanda katalitik sistemlerde destek malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Bentonitin yüksek yüzey reaktivitesi, boya moleküllerinin etkin biçimde adsorplanmasına ve yük taşıyıcı ayrışmasının kolaylaştırılmasına katkıda bulunur. Bu çalışmada tabakalı yapısıyla öne çıkan doğal bir kil minerali olan bentonit, görünür ışık altında hidrojen üretimini gerçekleştirmek üzere eosin Y boyası ile ışığa duyarlı hale getirilmiştir. Sistemin katalitik etkinliğini artırmak için, bentonit yüzeyine fotodepozisyon yöntemiyle MoS_x yardımcı katalizörü entegre edilmiştir. Geçiş metali dikalkojenidleri arasında öne çıkan MoS₂, kimyasal kararlılığı ve düşük maliyeti sayesinde sıkça tercih edilmektedir. Hidrojen evrimi reaksiyonunda MoS₂'nin sergilediği yüksek etkinlik, özellikle kenar kısımlarında yer alan katalitik olarak aktif bölgelerden ileri gelmektedir. Fotodepozisyon süreciyle oluşan, amorf ve doymamış S-S bağları açısından zengin MoS_x türleri ise çok sayıda yeni aktif bölge oluşturarak yük taşıyıcıların iletimini kolaylaştırmakta, bunun sonucunda da hidrojen üretim hızında önemli bir artış sağlamaktadır [3]. Boya duyarlılaştırma sonrası elde edilen Bentonit/EY katalizörünün hidrojen üretimi 1.37 mmol g⁻¹s⁻¹ olarak belirlenmiştir. MoS_x yardımcı katalizörünün yüklenmesi ile bu değer Bentonit/EY/MoS_x için 7.55 mmol g⁻¹s⁻¹ seviyesine yükselmiştir. Bu sonuçlar, bentonit gibi doğal kil minerallerinin boya duyarlılaştırılmış MoS_x bazlı fotokatalizörler için etkin bir destek malzemesi olduğunu ve görünür ışık altında hidrojen üretimi için umut vadeden bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Keywords: hidrojen, kataliz, katalizör, kil, fotokataliz.

***Teşekkür:** Bu çalışma YEO Teknoloji tarafından yürütülen AG-24-04 numaralı Ar-Ge projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] T.S. Teets, D.G. Nocera, Photocatalytic hydrogen production, Chemical communications, 47 (2011) 9268-9274.

- [2] Y.J. Zhang, L.C. Liu, D.P. Chen, Synthesis of CdS/bentonite nanocomposite powders for H₂ production by photocatalytic decomposition of water, Powder technology, 241 (2013) 7-11.
- [3] S.C. Lee, J.D. Benck, C. Tsai, J. Park, A.L. Koh, F. Abild-Pedersen, T.F. Jaramillo, R. Sinclair, Chemical and phase evolution of amorphous molybdenum sulfide catalysts for electrochemical hydrogen production, ACS nano, 10 (2016) 624-632.

INFLUENCE OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON ELECTROCHEMICAL NITROGEN REDUCTION REACTION PERFORMANCE OF NANO-SCALE WS₂ CATALYSTS

Yigit Osman AKYILDIZ

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye (Responsible Author) ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0001-7057-7268>

Talha KURU

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9662-8211>

Ali KELEŞ

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye

Barış ARICI

YEO Technology R&D Center, 34870 İstanbul-Türkiye

Emre ASLAN

Selçuk University, Faculty of Science, Department of Biochemistry, Konya-Türkiye ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0002-7672-2873>

İmren HATAY PATIR

Selçuk University, Faculty of Science, Department of Biotechnology, Konya-Türkiye ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0003-2937-6557>

ABSTRACT

Ammonia (NH₃) is a well-known and highly important compound due to its widespread applications in various fields, including chemicals, synthetic fibers, and fertilizer industries. In addition, owing to its high energy density and carbon-free nature, it is considered a promising alternative energy carrier to fossil fuels. Currently, the Haber-Bosch process is the primary industrial method for NH₃ production; however, its harsh conditions, energy demand, and greenhouse gas emissions pose major challenges. Recently, the electrochemical nitrogen reduction reaction (NRR) has been proposed as a sustainable alternative to the Haber-Bosch process. Nevertheless, achieving high NH₃ production efficiency requires overcoming the substantial dissociation energy barrier of the inert N≡N triple bond, as well as suppressing the competing hydrogen evolution reaction (HER) [1]. In this context, the development of catalysts with high catalytic activity and selectivity is of great importance for NRR. In recent years, transition metal dichalcogenide, particularly WS₂, have been reported to possess catalytically active sites suitable for various photo- and electrochemical applications. To enhance the NRR performance of WS₂-based catalysts, different strategies such as crystal plane engineering, particle size and morphology control, defect engineering, and heteroatom doping have been explored [2]. In this study, the electrochemical NRR performances of WS₂ catalysts with different particle sizes were investigated together with the effect of electrolytes (Na₂SO₄, Li₂SO₄, and K₂SO₄). The morphological characterizations of the commercially obtained catalysts were carried out by TEM analysis, while their electrochemical activities were evaluated through linear sweep voltammetry (LSV) and chronoamperometry (CA). The amount of NH₃ produced was quantified spectrophotometrically using the indophenol blue method based on a standard calibration curve. The results revealed that nanostructured WS₂ catalysts exhibited superior NH₃ production performance

compared to their microstructured counterparts, and the electrolyte performance followed the order $\text{Li}_2\text{SO}_4 > \text{K}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$.

Keywords: Ammonia, electrocatalysis, transition metal dichalcogenide, electrolyte.

***Acknowledgment:** This work was supported by the R&D project No. AG-24-03 conducted by YEO Technology

NANO ÖLÇEKLİ WS_2 KATALİZÖRLERİNİN ELEKTROKİMYASAL AZOT İNDİRGEME REAKSİYON PERFORMANSI ÜZERİNDE ELEKTROLİTİN ETKİSİ

ÖZET

Amonyak (NH_3), kimyasallar, sentetik elyaflar ve gübre endüstrileri dahil olmak üzere çeşitli alanlardaki uygulamaları nedeniyle iyi bilinen oldukça önemli bir bileşiktir. Ayrıca yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve karbon içermeyen yapısı nedeniyle fosil yakıtlara alternatif bir enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Haber-Bosch prosesi şu anda NH_3 üretimi için birincil endüstriyel yöntemdir; ancak zorlu koşulları, enerji talebi ve sera gazı emisyonları büyük zorluklar yaratmaktadır. Son zamanlarda, elektrokimyasal N_2 indirgeme reaksiyonu (NRR), mevcut Haber-Bosch işlemine alternatif olarak düşünülmektedir; ancak, yüksek NH_3 üretim verimliliği elde etmek için yüksek ayrışma enerjisi gerektiren kararlı ve inert $\text{N}\equiv\text{N}$ üçlü bağının kırılması ve rekabet eden hidrojen üretim reaksiyonu engelini aşmak gerekmektedir [1]. Bu bağlamda NRR için yüksek katalitik aktiviteye sahip ve seçiciliği yüksek katalizör ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar geçiş metali dikalkojenitlerinden WS_2 'nin çeşitli foto ve elektrokimyasal uygulamalarda kullanılabilecek aktif katalitik bölgelere sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra bugüne kadar, elektrokimyasal NRR performansını artırmak için kristal düzlem mühendisliği, parçacık boyutu ve/veya morfolojik olarak kontrol edilebilir sentez, kusur oluşturma ve heteroatom dopingi dahil olmak üzere çeşitli stratejiler oluşturulmuştur [2]. Bu çalışmada farklı boyutlara sahip WS_2 katalizörlerin elektrokimyasal NRR reaksiyonlarında performansları ve elektrolit etkisi (Na_2SO_4 , Li_2SO_4 ve K_2SO_4) araştırılmıştır. Ticari olarak temin edilen katalizörlerin morfolojik karakterizasyonu TEM analizi ile yapılmış ayrıca elektrokimyasal performansları doğrusal taramalı voltametri (LSV) ve kronoamperometri (CA) testleriyle anlaşılmıştır. Elde edilen NH_3 miktarı ise standart bir kalibrasyon grafiği üzerinden spektrofotometrik olarak indofenol mavisini yöntemi ile tayin edilmiştir. Elde edilen bulgular nanoboyutlu WS_2 katalizörlerin, mikrobeyutlulara kıyasla daha yüksek NH_3 üretim performansı sergilediğini ve elektrolit performansının da $\text{Li}_2\text{SO}_4 > \text{K}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$ şeklinde olduğunu göstermiştir.

Keywords: Amonyak, elektrokataliz, geçiş metali dikalkojenitler, elektrolit.

***Teşekkür:** Bu çalışma YEO Teknoloji tarafından yürütülen AG-24-03 numaralı Ar-Ge projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] D. Wang, L.M. Azofra, M. Harb, L. Cavallo, X. Zhang, B.H. Suryanto, D.R. MacFarlane, Energy-efficient nitrogen reduction to ammonia at low overpotential in aqueous electrolyte under ambient conditions, *ChemSusChem*, 11 (2018) 3416-3422. <https://doi.org/10.1002/cssc.201801632>
- [2] A.R. Singh, B.A. Rohr, J.A. Schwalbe, M. Cargnello, K. Chan, T.F. Jaramillo, I. Chorkendorff, J.K. Nørskov, *Electrochemical Ammonia Synthesis The Selectivity Challenge*, ACS Publications, 2017, pp. 706-709. <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b03035>

GIS-BASED MULTICRITERIA ANALYSIS FOR OPTIMAL GREEN HYDROGEN (GH₂) PRODUCTION SITE SELECTION

Amina Yahia

Institute of Urban Management Techniques, Oum el Bouaghi University, Algeria. **ORCID:**
<https://orcid.org/0000-0002-3782-1713>

Abstract

The viability of a green hydrogen economy in Algeria depends on successfully exploiting its green energy production, water availability, and its potential to convert to hydrogen. Identifying optimal production sites should encompass the entire hydrogen value chain, while considering all elements influencing the levelized cost of hydrogen (LCOH). This comprehensive approach can ensure the sustainable development of a hydrogen economy in Algeria, while providing insight into potential synergies between the actors involved. This would improve the efficiency of the value chain and potentially reduce the LCOH.

Stable production of green hydrogen requires a constant supply of sustainable energy. Fortunately, Algeria has abundant solar and wind resources suitable for large-scale green hydrogen production. The strategic approach of harnessing both solar and wind sources offers significant benefits. This synergy enhances the stability of sustainable energy supply by mitigating the production fluctuations inherent in variable renewable resources. [1]

This article has been developed to document and deepen knowledge on green hydrogen (GH₂) from existing research and policy documents. The demonstrated knowledge is expected to contribute to a better understanding of the factors relevant to the optimal location of GH₂ production facilities.

The second objective is to use the knowledge developed under the first objective to identify optimal locations and regions for GH₂ production using wind and solar energy. This includes the process and methodology used to leverage geographic information systems (GIS) to identify optimal locations for Algeria's GH₂ production facilities. The document details the factors incorporated into the evaluation process, fully explaining the logic behind the importance or weighting assigned to each factor. The analysis results are discussed, and relevant questions to improve the process in future evaluations are presented.

As part of this study, three green hydrogen production scenarios are established:

- Scenario 1: Large-scale pilot sites with an electrolyser capacity of 20 to 50 MW,
- Scenario 2: Industrial sites with an electrolyzer capacity of 200 to 400 MW,
- Scenario 3: Giga-sites with an electrolyzer capacity of 2 GW.

For each of the three GH₂ production scenarios, typical configurations including electrolyzers, wind, and solar energy were established. The analysis starts with a 1 MW electrolyzer as a reference. Using current technological data, the potential production of hydrogen is calculated based on different capacity factors (CFs).

Keywords: Green Hydrogen (GH₂), Hydrogen Economy in Algeria, Optimal Production Sites, Solar Energy in Algeria, Wind Energy in Algeria, Geographic Information Systems (GIS), Site Selection Methodology.

TOWARDS ENERGY SUSTAINABILITY IN ALGERIA: OPTIMIZING HYBRID SYSTEMS COMBINING RENEWABLE ENERGIES AND SMART TECHNOLOGIES

Amina Yahia

Institute of Urban Management Techniques, Oum el Bouaghi University, Algeria. **ORCID:**
<https://orcid.org/0000-0002-3782-1713>

Abstract:

Algeria, which has immense potential for renewable energy thanks to its solar, wind and geothermal resources, now faces major challenges in successfully transitioning to renewable energy. This work proposes an approach to optimizing hybrid energy systems, combining local renewable sources and smart technologies, in order to accelerate this transition while meeting the country's growing energy needs in a sustainable manner.

The study focuses on modelling hybrid systems adapted to Algeria's specific conditions, particularly the Saharan areas rich in solar radiation and the coastal regions suitable for wind power. Smart technologies, such as artificial intelligence and IoT systems, will be used to optimize energy flow management, anticipate the variability of renewable resources and improve the efficiency of storage infrastructure. In addition, an in-depth socio-economic analysis will be carried out, highlighting the advantages of decentralized models for rural and isolated areas, where access to energy remains limited.

The aim is to demonstrate that the integration of these hybrid systems can not only reduce greenhouse gas emissions, but also create significant local jobs and reduce the country's dependence on fossil fuels. This approach represents a unique opportunity for Algeria to capitalize on its abundant natural resources while pursuing a sustainable and inclusive development strategy.

Keywords: Hybrid energy systems, Renewable energies in Algeria, Energy optimization, Smart technologies, Energy transition, Sustainable development, Decentralized management.

GREEN PRODUCTION OF HIGH-SURFACE-AREA BIOCHAR FROM SUGARCANE BAGASSE AND ITS INCORPORATION INTO TOOTHPASTE FORMULATION

Bui Xuan Vuong*

Faculty of Natural Sciences Education, Sai Gon University, 273 An Duong Vuong Street, Cho Quan Ward,
Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam.

Vo Kim Ngan

Faculty of Natural Sciences Education, Sai Gon University, 273 An Duong Vuong Street, Cho Quan Ward,
Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam.

Pham Thi Thuy Trang

Faculty of Natural Sciences Education, Sai Gon University, 273 An Duong Vuong Street, Cho Quan Ward,
Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam.

Bui Thi Hoa

Faculty of Natural Sciences, Electric Power University, 235 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Hanoi
City 100000, Vietnam.

ABSTRACT

Biochar was prepared from waste sugarcane bagasse using an oxygen-limited pyrolysis route to obtain a safe and effective adsorbent. The raw material was first rinsed thoroughly and air-dried to remove surface impurities and residual moisture. It was then subjected to a preliminary heat treatment at 200 °C for one hour to drive off volatile compounds, followed by carbonization at 500 °C for three hours under anaerobic conditions to promote pore formation and structural stabilization. The resulting carbonaceous product was investigated by X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray analysis (EDX), and Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area measurements. Characterization indicated that the biochar is an amorphous material and exhibits a combined micro- and mesoporous network with a very high specific surface area ($SBET \approx 553 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), properties that are favorable for adsorption and surface interaction. To demonstrate its applicability, the bagasse-derived biochar was incorporated into a toothpaste formulation as a natural cleaning and adsorbing agent. Standard safety evaluations of the prepared toothpaste confirmed that the product met all required quality criteria, highlighting the potential of this biochar both as a functional additive and as a sustainable pathway for valorizing agricultural residues.

Keywords: Sugarcane bagasse; Biochar; Pyrolysis; High surface area; Toothpaste additive; Natural adsorbent; Sustainable materials.

THE POTENTIAL OF HYDROTREATED VEGETABLE OIL (HVO) IN REDUCING EMISSIONS FROM ROAD TRANSPORT

Jūratė LIEBUVIENĖ

Higher Education Institution, Faculty of Technologies; Bijūnų str. 10, Klaipėda, Lithuania

Vida JOKUBYNIENĖ*

Higher Education Institution, Faculty of Technologies; Bijūnų str. 10, Klaipėda, Lithuania

Summary

Diesel fuel has traditionally been regarded as one of the most efficient fuels for transportation; however, it is associated with significant environmental pollution, which poses considerable risks to human health and the environment. As a result, ongoing efforts are being made to identify alternatives that can replace diesel fuel and reduce its characteristic emission levels. One such alternative is synthetic diesel, which is currently gaining attention. It is produced from gas or other renewable sources, and its production process generates fewer pollutants. Due to its compatibility with existing diesel infrastructure, synthetic diesel is considered a viable substitute, requiring only minor modifications. This article presents an experimental study comparing conventional diesel with synthetic fuel, specifically, Hydrotreated Vegetable Oil (HVO). The study involves measurements of fuel consumption, exhaust gas emissions, and engine power output. The results indicate that the change in fuel consumption when using synthetic diesel is minimal, while engine power decreases by up to 2%.

Keywords: diesel; renewable diesel (HVO), emission characteristics

PERFORMANCE ANALYSIS OF III–V COMPOUND SEMICONDUCTOR-BASED DGTFT WITH GATE DIELECTRIC ENGINEERING

Pallabi Pahari

School of Electronics Engineering, Kalinga Institute of Industrial Technology (KIIT) Deemed to be University, Bhubaneswar, 751024, Odisha, India.

Sushanta Kumar Mohapatra

School of Electronics Engineering, Kalinga Institute of Industrial Technology (KIIT) Deemed to be University, Bhubaneswar, 751024, Odisha, India.

Jitendra Kumar Das

School of Electronics Engineering, Kalinga Institute of Industrial Technology (KIIT) Deemed to be University, Bhubaneswar, 751024, Odisha, India.

Abstract

This paper describes a performance-optimized double-gate tunnel field-effect transistor (DGTFT) for biosensing purposes through heterostructure engineering and gate dielectric design. A material-engineered DGTFT device is proposed with a low-bandgap GaSb source, $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ channel and GaAs drain, and an N^+ -doped pocket region close to the source- channel junction to enhance tunneling efficiency. The research assesses major performance analysis such as subthreshold swing (SS), ON current (I_{ON}), OFF current (I_{OFF}), and $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$ ratio, in different III–V compound semiconductors and different dielectric stacks such as SiO_2 , Al_2O_3 and HfO_2 . Simulation outcomes with SILVACO ATLAS show that the fabricated structure has an ultra-low SS of 9.6 mV/dec, I_{ON} of 3.5×10^{-7} A, I_{OFF} of 8.8×10^{-18} A, and a remarkable $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$ ratio of 4×10^{13} , which proves it fit for ultra-low power and high- sensitivity applications.

UNVEILING STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIPS IN NON- FULLERENE ACCEPTORS FOR ORGANIC SOLAR CELLS USING DFT/TD- DFT

Ikram Mennas

LCPAM, Polydisciplinary Faculty, Sultan Moulay Slimane University, Béni Mellal, Morocco

ORCID ID: 0009-0004-5819-9734

Prof. Dr. Mohammed El Idrissi

LCPAM, Polydisciplinary Faculty, Sultan Moulay Slimane University, Béni Mellal, Morocco

Prof. Dr. Abdelkhalek Aboulouard

LCPAM, Polydisciplinary Faculty, Sultan Moulay Slimane University, Béni Mellal, Morocco

El Mostafa Benharaf

LCPAM, Polydisciplinary Faculty, Sultan Moulay Slimane University, Béni Mellal, Morocco

Ahmed Arif

LCPAM, Polydisciplinary Faculty, Sultan Moulay Slimane University, Béni Mellal, Morocco

Abstract

In this study, we designed and analyzed novel non-fullerene electron acceptors based on quinoxaline derivatives (R, M1-M5) for organic photovoltaic cells. Using density functional theory (DFT) and time-dependent density functional theory (TD-DFT), we investigated the main electronic and optical properties, including frontier molecular orbitals (FMOs), density of states (DOS), molecular electrostatic potential (MEP), global reactivity descriptors, dipole moment, charge mobility, and optical characteristics. Our results reveal that the engineered compounds exhibit a small band gap, favorable optical properties, and efficient charge mobility. Furthermore, when paired with PTB7-Th as an electron donor, these molecules demonstrate strong charge conduction and effective electron transfer. These promising findings suggest that experimental validation of these molecules could lead to improved performance in non- fullerene organic photovoltaic cells.

Keywords: Non-fullerene acceptors, quinoxaline derivatives, organic photovoltaics cells, density functional theory (DFT).

OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF SVC DEVICES FOR ENHANCED STABILITY IN RENEWABLE ENERGY INTEGRATED POWER SYSTEMS

Hana MERAH

Department of Electrical Engineering, LGEERE Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9236-8827>

Mohammed JAMEEL

Department of Mathematics, Sana'a University, Sana'a 13509, Yemen ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5459-341X>

Abderahmane ABID

Department of Electrical Engineering, LEVRES Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-7827>

Abdelmalek GACEM

Department of Electrical Engineering, LGEERE Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9919-4025>

Djilani BENATTOUS

Department of Electrical Engineering, VTRS Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1854-1257>

ABSTRACT

The increasing integration of renewable energy sources, such as solar and wind, presents significant challenges for power system operation, particularly regarding voltage stability and reliability. To address these issues, Flexible AC Transmission System (FACTS) devices, especially Static VAR Compensators (SVCs), are crucial for enhancing reactive power support and maintaining voltage levels. However, their effectiveness greatly depends on optimal placement and sizing within the network.

This study employs the Spider Wasp Optimization (SWO) algorithm on the IEEE 30-bus test system with renewable energy sources to determine the ideal location and capacity of SVC devices. The optimization targets two main objectives: minimizing total generation costs and reducing active power losses, essential for maximizing economic and technical efficiency. The performance of the SWO algorithm is benchmarked against established metaheuristics like Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Lion Optimizer (ALO). Results show that SWO outperforms these methods in solution quality, convergence speed, and robustness, consistently achieving optimal control variables without violating system constraints.

These outcomes underscore the SWO algorithm's potential as a powerful tool for optimizing energy systems amidst the challenges of renewable energy integration and FACTS device placement.

Keywords: Spider Wasp Optimization (SWO), Static VAR Compensators (SVCs), renewable energy sources, IEEE 30-bus test system.

OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS INCLUDING STOCHASTIC RENEWABLE ENERGY SOURCES USING SPIDER WASP OPTIMIZATION ALGORITHM

Hana MERAH

Department of Electrical Engineering, LGEERE Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9236-8827>

Abderahmane ABID

Department of Electrical Engineering, LEVRES Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-7827>

Mohammed JAMEEL

Department of Mathematics, Sana'a University, Sana'a 13509, Yemen ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5459-341X>

Abdelmalek GACEM

Department of Electrical Engineering, LGEERE Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9919-4025>

Djilani BENATTOUS

Department of Electrical Engineering, VTRS Laboratory, University of El-Oued, 39000 El-Oued, Algeria
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1854-1257>

ABSTRACT

In this study, we introduced a Spider Wasp Optimization (SWO) algorithm designed to solve the Optimal Power Flow (OPF) problem on the IEEE 30-bus test system while incorporating renewable energy sources.

The algorithm was applied to a variety of single-objective functions, including minimizing fuel costs while accounting for valve-point effects (VPE) without incorporating renewable energy, reducing total active power losses, minimizing overall generation costs while accounting for all power generation sources, and lowering total generation costs while including a carbon price. The proposed SWO method demonstrated its ability to provide high-quality solutions to OPF problems involving stochastic energy sources.

To validate its effectiveness, we conducted a comprehensive comparison between the results obtained using the SWO algorithm and those produced by alternative optimization approaches found in the literature.

Keywords: Spider Wasp Optimization (SWO), Optimal Power Flow, renewable energy sources, IEEE 30- bus test system.

FULL TEXTS

GEOTECHNICAL MONITORING STRATEGIES DURING THE COMPLETION PHASE OF AKKUYU NUCLEAR POWER PLANT CONSTRUCTION

Serdar DİZMAN

Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Art and Sciences, Department of Physics, Rize-Türkiye
(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-6511-9526

Vasyl Volodymyrovych BILYK

Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Laboratory of Research of Nuclear and
Thermal Power Plants, Dnipro – Ukraine, ORCID: 0000-0002-4435-2388

Vasily Yuryevich ULYANOV

Independent researcher, Dnipro – Ukraine, ORCID: 0000-0002-9028-3408

ABSTRACT

Effective geotechnical monitoring is critical during the final stages of nuclear power plant (NPP) construction to ensure long-term structural integrity and environmental safety. At the Akkuyu NPP site in Türkiye, significant challenges arise due to the destruction or inaccessibility of initial monitoring wells during earlier construction phases. This study proposes a comprehensive, integrated geotechnical monitoring framework tailored to the unique geological and operational conditions at the site. In addition, drawing on the Bushehr-1 NPP experience in Iran, this study summarizes strategies for well protection, use of large diameter wells, multiple aquifer monitoring and mitigation against surface and groundwater seepage. The results advocate for early implementation of comprehensive monitoring systems to create reliable hydrogeological and geodynamic models, forming a transferable framework for future sites like the planned Sinop NPP.

Keywords: Geotechnical monitoring, Well, Nuclear power plant, Mersin

Introduction

Nuclear energy is released from an atomic nucleus, which consists of neutrons and protons. There are two methods for producing nuclear energy: nuclear fission or nuclear fusion. The nuclear energy used today to generate electricity is produced through nuclear fission. A heavy atom's nucleus splits into two or more smaller nuclei during nuclear fission, releasing heat in the process. This heat energy turns water into steam and then electricity in a nuclear reactor, just as heat from fossil fuels like gas, oil and coal is converted to generate electricity. Therefore, energy in a nuclear reactor is generated by initiating and controlling a sustained nuclear chain reaction. The electrical energy generated in this way is a very low-carbon generation method (Mathew, 2022).

The “Agreement on Cooperation between the Government of the Republic of Türkiye and the Government of the Russian Federation on the Establishment and Operation of a Nuclear Power Plant (NPP) at the Akkuyu Field in the Republic of Türkiye” was signed on May 12, 2010 for the Mersin Akkuyu Nuclear Power Plant. The agreement calls for the installation of four VVER 1200 type reactors at Mersin Akkuyu Field, totaling 4800 MW of installed capacity. Once operational, the Akkuyu nuclear power plant will produce approximately 35 billion kWh of electricity annually (URL-1, 2025). The first unit of the Akkuyu power plant is expected to produce electricity at the beginning of 2026. An image of the Akkuyu Nuclear Power Plant construction is shown in Figure 1 (URL-1, 2025).



Figure 1. An image of the Akkuyu Nuclear Power Plant construction

Geotechnical monitoring is a detailed examination of subsurface conditions at a construction site to ensure safe and efficient structural design and includes comprehensive evaluation of soil, rock and groundwater properties. It is seen in the literature that many studies have been carried out on geotechnical monitoring at nuclear power plant sites around the world (Al Rashdi et al, 2021; Aptikaeva and Aptikaev, 2019; Dizman et al., 2023; Iban and Sahin, 2022; Petisco-Ferrero et al., 2023; Sedin and Ulyanov, 2019; Sedin et al, 2025; Ulyanov et al., 2025; Zaykin and Ryasny, 2025). In addition, modeling and some predictions are being made regarding geotechnical monitoring of nuclear power plants (Bilgiç and Gündüz, 2020; Lyubarskiy et al., 2023).

Drawing on previous nuclear power plant installation experiences, this study discusses how to implement more appropriate and sustainable geotechnical monitoring, particularly for the Akkuyu Nuclear Power Plant. In this context, well protection, the use of large-diameter wells, multi-aquifer monitoring, and mitigation strategies against surface and groundwater leakage for nuclear power plants are discussed. The results will serve as a guide for future sites such as the Sinop Nuclear Power Plant, which will be Türkiye's second nuclear power plant.

Materials and Methods

In the last few years, the nuclear energy sector has evolved significantly to meet the growing demand for affordable and sustainable energy worldwide. Studies are ongoing to make nuclear power plants safer and longer-lasting, and standards are being established for this purpose. In this context, one of the first steps to ensure the safety of nuclear power plants is the establishment of a monitoring system equipped with reliable and durable sensors. Today, geotechnical monitoring, particularly at nuclear power plant construction sites, is performed using sensitive equipment. Some of these devices are listed in Table 1.

Table 1. Some geotechnical monitoring devices

Type of device	Principle	Location	Measured Parameter	Aim
Global positioning system (GPS)	Aiming by satellite	Site	Topography of the site	Site evaluation
Piezometers	Hydraulic pressure	Bore holes	Pore pressure, water table	Monitoring of water table
Settlement monuments	Topographic aiming	Ground surface	Displacements, settlements	Settlement of structures
Gamma graphy, photogrammetry	Superposition of picture	Ground surface	Deformation of topography	Deformation of structures
In situ settlement plates	Topography	Ground surface	Displacements	Settlement of structures
Inclinometers, tiltmeters	Mechanic	Bore-holes	Verticality	Stability of slopes
Seismometers	Accelerometers, triggers	Free field, buildings	Accelerations, time histories	Operability of plants; seismic behavior of structures; floor response spectra
Hydraulic devices	Hydraulic U-tube, Glötzl cells	On basement and beneath	Deformations and stresses of the basement	Behavior of the soil-structure system

Findings and Discussion

The implementation of geotechnical monitoring at different periods of NPP construction differs significantly. As experience with nuclear power plant construction shows, most exploration wells suitable for monitoring are typically destroyed during the construction phase. Those that remain on the periphery of the site are often unsuitable for use. New monitoring wells are usually drilled only after construction has been completed. This valuable information, which is essential for understanding processes and phenomena, ends up in a "temporary shadow" during the construction phase and is often permanently lost. Based on this, during construction, all surviving engineering-geological wells should be included in the monitoring network until their decommissioning, especially those that fall within the boundaries of structures, roads, excavations, etc. All other wells, including those in the vicinity of the site, should be preserved and retrofitted to protect them from damage. Photographs showing the work on opening geotechnical monitoring wells at the Akkuyu Nuclear Power Plant construction site are shown in Figures 1 and 2 (URL-2, 2025).

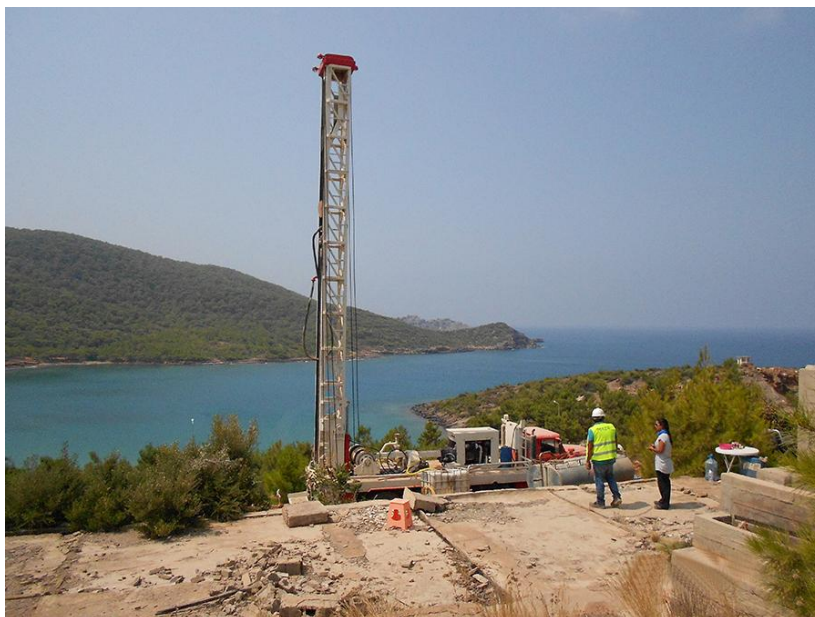


Figure 2. Drilling a hydrogeological well at the Akkuyu NPP site



Figure 3. Drilling well at the Akkuyu NPP site

Geotechnical monitoring at the Akkuyu NPP site during the completion of construction of the main facilities must also be comprehensive (TAEK, 2017; IAEA, 2022). Given the characteristics of the site, it should consist of the following blocks:

- Geodetic (external and internal, including the water area and the slopes of the mountainous frame);
- Seismo-tectonic (traditional seismological stations, including additional radon stations);
- Radiation (including the determination of tritium and radon in groundwater);
- Hydrogeochemical (for monitoring the condition of the carbonate layer);
- Thermometric (including monitoring thermal effects from operating equipment).

In this case, comprehensiveness means creating a unified data exchange bus between the blocks and the coordination center. The existing chemical laboratory at the Akkuyu NPP should be capable of processing water samples from wells and other water intake points, including determining the content of tritium and radon (Lyubarskiy et al., 2023).

The placement of monitoring wells should take into account both the hydrogeological conditions and the specifics of the site, as well as the operational characteristics of individual buildings and structures, especially those that are underground Figure 4 (URL-3, 2025). It is advisable to divide monitoring wells into different aquifers. Wells for the technogenic aquifer, which are typically shallow, may be constructed later, when the formation of this aquifer becomes irreversible, and the aquifer itself is proven and stable. With sufficient justification, some wells can also be located in the water area.



Figure 4. Hydrogeological monitoring well at the Bushehr-1 NPP site

Based on the experience of completing Unit 1 at the Bushehr Nuclear Power Plant in Iran, some wells should initially be of large diameter (up to 325 mm or more) and designed for the placement of pumping equipment with the necessary fittings. The configuration of the wells should align with the idea of creating so-called anti-filter curtains from the most vulnerable directions, and before drilling large-diameter wells, this should be confirmed through trial filtration tests conducted in standard monitoring wells or remaining geotechnical (exploratory) wells. The curtain from these wells should be used in case of flooding of the NPP site under extremely unfavorable weather and climatic conditions. Large-diameter monitoring wells should primarily be equipped for the technogenic aquifer. Pumping equipment should be stored on the NPP site in the required quantity (corresponding to the number of large-diameter wells) and maintained in constant working condition (24/7), with necessary transport and trained personnel available (Ulyanov, 2017a, 2017b; Ulyanov, 2021; Ulyanov and Elokhnin, 2016).

After the completion of construction and the accumulation of sufficient data, the creation of hydrogeological and, more importantly, geodynamic models of the site and the adjacent area is entirely possible. However, it is important not to justify the lack of monitoring points by replacing them with modeling. In the absence of a significant portion of the initial data, the results of such modeling can be far from reality, especially in extreme situations. Underground elements of the nuclear power plant buildings and structures, primarily the rarely visited long cable and technological

ducts, should be additionally equipped, including for the convenience of conducting all types of monitoring (access for inspection, instrumental observations).

Practice shows that during the pre-commissioning and commissioning periods, the main goal of geotechnical monitoring at the nuclear power plant site is to identify leaks from technological systems. This includes preventing the flooding of cable and technological ducts by eliminating all technogenic leaks and leaks from pipelines of various purposes, located both within the ducts themselves and in the soil layer above or near them. Additionally, it involves identifying pathways for groundwater and surface water to enter the underground areas of the NPP.

Based on the experience of completing Bushehr-1 Nuclear Power Plant, to prevent distortion of hydrogeochemical monitoring results, the infiltration of surface atmospheric and technological waters (such as condensate from steam chambers, equipment spills, etc.) into the groundwater aquifer within the site should be minimized. All surface waters should be diverted into storm water drains. The territory of the Akkuyu Nuclear Power Plant should be maximally concreted and asphalted. From the slopes of the mountains, surface runoff should be intercepted and diverted away from the site using horizontal upper-level ditches and storm water drains. If necessary, measures should be implemented to intercept the water and debris from mudflow streams.

Conclusion and Recommendations

The construction phases of a nuclear facility typically consist of excavation, backfill, and building construction. Soil behavior must be monitored during each of these phases. During excavation and backfill, deformation of the subsurface material (e.g., heave and subsidence, lateral displacements) must be monitored and load assessments must be conducted. Monitoring must continue throughout the life of the nuclear facility.

Geotechnical monitoring devices should be carefully selected to ensure that the monitoring system provides the expected information throughout the facility's lifespan. Device selection should be based on experience from monitoring other nuclear facilities. Anticipated failure rates, especially the requirement for replacement, should be considered while deciding on the number of devices and manual measuring sites.

The successful completion and operation of the Akkuyu NPP hinge on a robust, interdisciplinary geotechnical monitoring system. By preserving existing wells, integrating advanced technologies, and learning from global NPP practices, the Akkuyu project can establish a benchmark for nuclear site monitoring. The strategies proposed not only ensure site safety but also create a transferable blueprint for upcoming projects such as the Sinop NPP (in case the project is realized). Investing in early-stage, comprehensive monitoring is not only a technical imperative but a long-term commitment to environmental stewardship and nuclear safety. In addition to ensuring site security, the proposed strategies can also form a workable plan for future projects, such as the Sinop Nuclear Power Plant. Finally, investing in comprehensive geotechnical monitoring at an early stage is not only a technical necessity, but also a long-term commitment to environmental management and nuclear safety.

References

Al Rashdi, M.R., El Mowafi, W., Alaabed, S., El Tokhi, M. & Arabi, A.A. (2021). Radiological Baseline around the Barakah Nuclear Power Plant, UAE. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(5), 103125. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103125>

- Aptikaeva, O.I. & Aptikaev, S.F. (2019). Seismic Acceleration in the Near Area of the Akkuyu NPP Site (Turkey) Caused by Strong Regional Earthquakes. *Seismic Instruments*, 55, 244–254. <https://doi.org/10.3103/S0747923919030022>
- Bilgiç, E. & Gündüz, O. (2020). Dose and risk estimation of Cs-137 and I-131 released from a hypothetical accident in Akkuyu Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, 211, 106082. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106082>
- Dizman, S., Aşık, F.Z., Özçelik, A.E., Keser, R & Korkmaz Görür, F. (2023). Tritium contents in drinking and surface seawaters before the nuclear power plant planned in Sinop (Türkiye) and their radiological risks on human population. *Journal of Water and Health*, 21(12), 1847-1857. <https://doi.org/10.2166/wh.2023.205>
- IAEA (2022). Sample Safety Analysis Report on: Site Characteristics Important to Emergency Planning and Radiological Environmental Impact Assessment. *International Atomic Energy Agency*, Rev. 2, 277p.
- Iban, M.C. & Sahin, E. (2022). Monitoring land use and land cover change near a nuclear power plant construction site: Akkuyu case, Turkey. *Environmental Monitoring Assessment*, 194, 724 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10437-6>
- Lyubarskiy, A.V., Tokmachev, G.V. & Kuzmina, I.B. (2023). Practical elimination principle in the Akkuyu Nuclear Power Plant design. *Nuclear Energy and Technology*, 9(4), 267–272. <https://doi.org/10.3897/nucet.9.116659>
- Mathew, M.D. (2022). Nuclear energy: A pathway towards mitigation of global warming. *Progress in Nuclear Energy*, 143, 104080. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104080>
- Petisco-Ferrero, S., Idoeta, R., Rozas, S., Olondo, C. & M. Herranz, M. (2023). Radiological environmental monitoring of groundwater around NPP: A proposal for its assessment. *Heliyon*, 9(9), 19470. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19470>
- Sedin, V.L. & Ulyanov, V.Y. (2019). On the possibility of evaluating the tectonic fault activity at the Akkuyu Nuclear Power Plant by sample radon measurements during environmental impact assessment. *Vestnik MGSU (Journal on Construction and Architecture)*, 14(10), 1272-1279. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.10.1272-1279>
- Sedin, V.L., Ulyanov, V.Y., Kovba, V.V., Zahilskyi, V.A., Bikus, K.M. & Bilyk, V.V. (2025). On the question of determining the activity of fault zones of the precambrian crystalline foundation at the Zaporizhzhia NPP site based on radon measurement. *Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, 1, 128-141. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270225.128.1137>
- TAEK (2017). Safety evaluation report on site parameters report for Akkuyu nuclear power plant. *Turkish Atomic Energy Authority*, ANS.GDR02E.SPR, Version 1, 60 p.
- Ulyanov, V.Y. (2017). Radon Monitoring as an Indicator of Seismotectonic Events at the Bushehr-1 NPP site and Bushehr Province Adjoining Territory of the Islamic Republic of Iran. *Global Nuclear Safety*, 14(4), 7-17. <https://doi.org/10.26583/gns-2017-04-01>
- Ulyanov, V.Y. (2017). Technique of Leak Detection from the Water Bearing Communications as the Component of Geotechnical Monitoring of the Bushehr-1 NPP Platform in the Islamic Republic of Iran. *Global Nuclear Safety*, 13(1), 7-12. <https://doi.org/10.26583/gns-2017-01-01>
- Ulyanov, V.Y. (2021). Methodology Specific Features of Underground Water Thermomonitoring at the Bucher-1 NPP Site in the Islamic Republic of Iran. *Global Nuclear Safety*, 38(1), 26-37. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-01-03>

Ulyanov, V.Y. & Elokhin, A.P. (2016). Tritium Monitoring as Possible Indicator of Leaks from Special Pipelines and Other Water Bearing Communications at the "Bushehr-1" NPP. *Global Nuclear Safety*, 21(4), 7-15. <https://doi.org/10.26583/gns-2016-04-01>

Ulyanov, V.Y., Bilyk, V.V., & Dizman, S. (2025). Review and analysis of the main methods for determining the activity rate of tectonic faults based on the results of radonometry. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 491-504. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1631731>

URL-1, (2025). <https://akkuyu.com/tr>

URL-2, (2025). <https://www.toker.com.tr/cevre-geotekniki-ve-hidrojeolojik-arastirmalar>

URL-3, (2025). <https://inbusiness.kz/ru/last/aes-busher-v-irane-budet-avarijno-otklyuchena-ot-energosisistemy-strany>

Zaykin, I.L. & Ryasny, S.I. (2025). Arranging activities of NPP personnel in case of seismic impacts: Akkuyu NPP experience after earthquakes on February 6, 2023. *Nuclear Safety*, 15(2), 5-11. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-01>



Lİ-İYON BATARYA TERMAL YÖNETİMİ ÜZERİNDE BATARYA MODÜL GEOMETRİSİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Selma AKÇAY

Doç. Dr, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı-Türkiye, (Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0003-2654-0702

Sezgin YAŞA

Arş. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı- Türkiye, ORCID: 0000-0001-8468-3133

Özet

Bu çalışmada, silindirik Li-iyon pillerde, pil modül geometrisinin batarya termal yönetimi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma ANSYS Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve analizler k-ε türbülans modeli ile çözülmüştür. Çalışmada düz modül ve dikdörtgen oluklu modül olmak üzere iki farklı pil modül geometrisi kullanılmıştır. Her modül üç kademeli sıra halinde düzenlenmiş toplam 15 silindirik Li-iyon pil hücresi içermektedir. Her pil hücresi yüzeyinin $q''=400\text{W/m}^2$ sabit ısı akısında tutulduğu varsayılmıştır. Soğutucu akışkan hava olup, hava modüle sabit bir sıcaklıkta ($T_{in}=300\text{ K}$) girmiştir. Modül geometrisinin pillerin yüzey sıcaklığı ve modül çıkış sıcaklığı üzerindeki etkileri farklı Reynolds sayılarında ($2000 \leq Re \leq 8000$) analiz edilmiştir. Ayrıca, modül geometrisinin batarya termal yönetimi üzerindeki etkisini gözlemlemek için çeşitli Reynolds sayılarında hız ve sıcaklık kontur görüntüleri sunulmuştur. Pil modül geometrisinin pil yüzey sıcaklıklarını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, dikdörtgen-oluklu modülde pil yüzey sıcaklıklarının düz modüle kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Reynolds sayısının artması her iki modülde de pil yüzey sıcaklıklarını düşürerek daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Ayrıca, Reynolds sayısının artması modül çıkış sıcaklığında bir düşüşe neden olmuş ve dikdörtgen-oluklu modülde çıkış sıcaklığının düz modüle göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu çalışma sonuçları, pil modül geometrisinin değiştirilmesinin, özellikle elektrikli ve hibrit araçlarda batarya termal yönetiminde önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Li-iyon batarya, Batarya modül geometrisi, Hava soğutma, Batarya termal yönetimi, Sayısal çalışma

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BATTERY HOUSING GEOMETRY ON LI-ION BATTERY THERMAL MANAGEMENT

Abstract

This study numerically investigates the effect of battery housing geometry on battery thermal management in for cylindrical Li-ion batteries. The numerical study was conducted using the ANSYS Fluent program, and the analyses were solved using the k-ε turbulence model. Two different battery housing geometries were used in the study: a flat module and a rectangular corrugated module. Each module contained a total of 15 cylindrical Li-ion battery cells arranged in three staggered rows. Each battery cell surface was assumed to be maintained at a constant heat flux of $q''=400\text{W/m}^2$. The coolant fluid was air, and the air entered the module at a constant temperature ($T_{in}=300\text{ K}$). The effects of module geometry on the surface temperature of the batteries and the module exit temperature were analyzed at different Reynolds numbers ($2000 \leq Re \leq 8000$). Furthermore, velocity and temperature

contour images were presented at various Reynolds numbers to observe the effect of module geometry on battery thermal management. It was concluded that the battery housing geometry significantly affected the battery surface temperatures. It was also observed that the battery surface temperatures were lower in the rectangular-corrugated module compared to the flat module. Increasing the Reynolds number decreased battery surface temperatures in both modules, resulting in a more uniform temperature distribution. Furthermore, increasing the Reynolds number resulted in a decrease in the module outlet temperature, and the outlet temperature was found to be lower in the rectangular-corrugated module than in the flat module. These study results demonstrate that changing the battery housing geometry can provide significant advantages, particularly in battery thermal management for electric and hybrid vehicles.

Keywords: Li-ion battery, Battery housing geometry, Air-cooling, Battery thermal management, Numerical study

1. Giriş

Silindirik pil gruplarını diğer pil hücresi türleriyle karşılaştırdığımızda, termal kontrolün daha zor olduğu görülür (Gungor vd., 2023). Özellikle yüksek akım gerektiren uygulamalar, Li-iyon bataryalarda (LIB) büyük miktarda ısı üretilebilir (Behi vd., 2021). Bir batarya paketi içerisindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı, modüllerin yerleşiminden, dış etkenlerden ve kullanılan ısıtma ve soğutma sisteminin türünden kaynaklanabilir. Homojen olmayan sıcaklık dağılımına sahip bir pil paketi, hem pillerin hem de aracın performansını düşürecek elektriksel olarak dengesiz modüllere sahip olabilir. Örneğin, Li-iyon piller, 25 ila 40 °C arasındaki sıcaklıklarda en iyi performansı gösterir. Bu sıcaklıklarda, performans ve ömür arasında bir denge kurarlar. Hücreler arasında 5 °C'den düşük bir sıcaklık dağılımı tercih edilir (Pesaran, 2002). Şarj ve deşarj sırasında, LIB'ler ısı üretir, bu da pilin sıcaklığını artırır ve pil takımının içinde sıcaklık düzensizlikleri oluşturarak pil ömrünü kısaltır (Chaudhari vd., 2024). Sonuç olarak, pil performansını artırmak için pil takımının sıcaklığını uygun bir çalışma aralığında kontrol etmek amacıyla bir batarya termal yönetim sistemleri kullanılmalıdır (Zhang vd., 2023). Literatürde hava soğutma (Li vd., 2025) ve sıvı soğutma (Tong vd., 2025) gibi çeşitli termal yönetim stratejileri kullanılmıştır. Hava soğutma sistemleri, düşük güç yoğunluklu pil paketlerinde yaygın olarak tercih edilir. Daha büyük özgül ısı kapasiteleri ve termal iletkenlikleri sayesinde sıvı soğutma sistemleri, yüksek güç yoğunluklu uygulamalarda daha iyi performans gösterir. Sıvı soğutma sistemleri, soğutucu sirkülasyonu yoluyla piller tarafından üretilen ısıyı hızla dağıtarak sıcaklık homojenliğini önemli ölçüde artırabilir. Bununla birlikte, sıvı soğutmanın yüksek sistem karmaşıklığı, olası korozyon ve sızıntı tehlikeleri ve nispeten yüksek bakım masrafları gibi birkaç dezavantajı vardır (Liu vd., 2025).

Xie vd. (2024) farklı büyüklükteki batarya modüllerinin silindirik hücreli bir batarya sisteminin termal yönetim performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, modül boyutunun artmasının batarya termal yönetimi için ısı dağılım performansına, özellikle homojen sıcaklık dağılımı açısından olumsuz etki gösterdiğini belirlemiştir. Aldawi (2025), yaptığı çalışmada, farklı geometrilere (düz, dalgalı ve zikzak) sahip mini kanal soğuk plakaları üzerinde süperhidrofobik yüzeyler kullanan pil soğutma sistemlerinin termal performansını incelemiştir. Çalışma sonucunda, kanal tasarımının tepe hücre sıcaklığını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Wang vd. (2025), daldırma sıvı soğutma sistemi ile yapılan soğutma işleminde performans artışı sağlamak için, pil termal yönetiminde kare, düzgün altıgen ve dairesel yapıları duvarlar kullanmışlardır. Sayısal olarak yaptığı çalışmada T_{max} (1,28 °C) ve ΔT (0,88 °C) en büyük düşüşler kare yapıları duvar sisteminde elde etmiştir. Modül geometrisindeki değişimlerin batarya termal yönetimini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

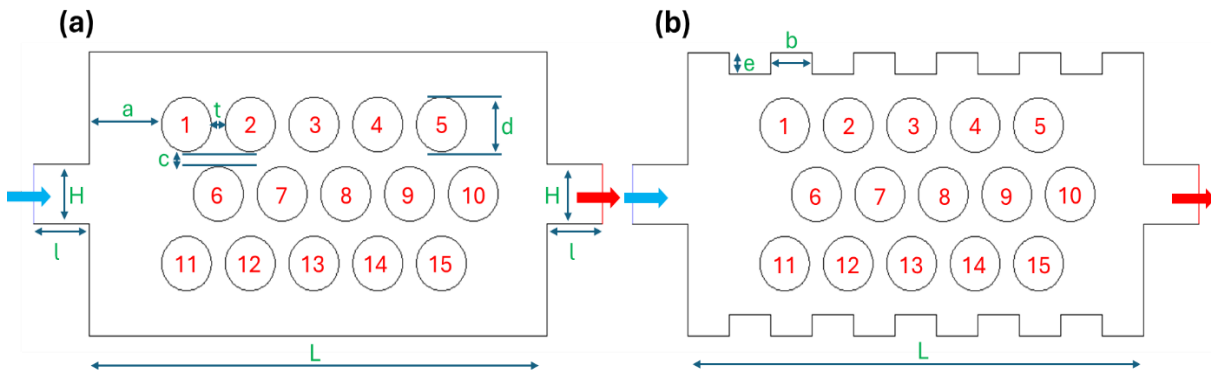
Literatür çalışmaları incelendiğinde, bataryaların termal yönetiminde batarya modül geometrisinin etkisini araştıran çalışmaların oldukça az olduğu anlaşılmaktadır ve bu konuda yeni çalışmalara

ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu çalışma, iki farklı modül geometrisinin (düz modül ve dikdörtgen oluklu modül) batarya termal yönetimine etkisi $2000 \leq Re \leq 8000$ aralığındaki Reynolds sayıları (Re) için sayısal olarak araştırılmıştır.

2. Malzeme ve Metotlar

2.1 Sayısal Geometri

Sayısal çalışmada, çapı $d=18$ mm ve uzunluğu 65 mm olan silindirik LIB hücreleri dikkate alınmıştır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, düz ve dikdörtgen oluklu geometriden oluşan iki farklı modül içerisine 15 adet batarya hücresi kademeli olarak yerleştirilmiştir. Modüle akışkan $H=20$ mm ve $L=20$ mm ölçülerindeki bir kanaldan giriş ve çıkış sağlamaktadır. Diğer geometrik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Sayısal model, a) düz modül, b) dikdörtgen oluklu modül

Bataryaların soğutulmasında akışkan olarak hava kullanılmıştır. Akışkan hızı farklı Reynolds sayıları ($2000 \leq Re \leq 8000$) için hesaplanmıştır. Soğutucu akışkan $T_{in}=300$ K sıcaklığında modüle girmektedir. Havanın termofiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Geometrik parametreler

Sembol	a	b	c	d	e	H	l	t	L
Değer (mm)	25	15	5	18	7	20	20	5	165

Tablo 2. Soğutucunun termofiziksel özellikleri (300K)

Akışkan	Özgül ısı, C (J/kgK)	Termal iletkenlik, k (W/mK)	Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	Viskozite, μ (kg/ms)
Hava	1006.43	0.0242	1.225	1.7894e-5

2.2 Korunum Denklemleri

Çalışmada soğutma akışkanının sıkıştırılmaz, tek fazlı ve Newton tipi olduğu varsayılmıştır. Çözümlerde ısıl radyasyon ve yerçekimi etkileri ihmal edilmiştir. Viskoz model olarak standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Çözümler sürekli koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bu varsayımlara göre, korunum denklemleri aşağıdaki Eşitlikler (1)-(3) ile verilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\Gamma + \Gamma_t) \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

Türbülans modeline ait denklemler Eşitlik 4 ve 5 ile verilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Reynolds sayısı, Eşitlik 6 ile hesaplanmıştır:

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (6)$$

Burada ρ soğutucu akışkanın yoğunluğunu, U ortalama akışkan hızını, μ akışkanın viskozitesini ve D_h hidrolik çapını temsil eder.

2.3 Sayısal Yöntem ve Sınır Şartlar

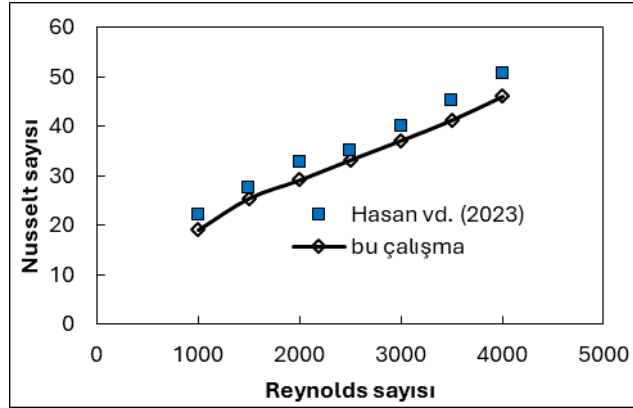
Sayısal modelin iki boyutlu geometrisi ve hücrelere ayrılması Gambit yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çözüm alanında yapılandırılmamış üçgen elemanlar kullanılmıştır. Çözümlerin eleman sayısından bağımsızlığını belirlemek için mesh bağımsızlık testi uygulanmış ve düz ve dikdörtgen oluklu modül için sırasıyla 109802 ve 99832 eleman sayılarının çözümler için yeterli olduğu görülmüştür. İterasyonlar ANSYS Fluent programı kullanılarak çözülmüştür. Taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılmıştır. Basınç ve hız bağıntısı için SIMPLE yaklaşımı seçilmiştir. Çözümler sürekli koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Yakınsama kriteri olarak enerji denklemlerinde 10^{-8} , diğer denklemlerde ise 10^{-4} kullanılmıştır. Çalışmada, akışkan kanala sabit hız ve sıcaklıkta ($T_{in}=300K$) girmektedir. Kanal çıkışında basınç çıkış sınır

koşulu kullanılmıştır. Her bir batarya hücresinin dış yüzeyinin sabit bir ısı akısında ($q''=400\text{W/m}^2$) korunduğu varsayılmıştır. Batarya modülüne ait duvarlar adyabatik özelliktedir. Tüm yüzeyler için kaymaz sınır şartı tanımlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

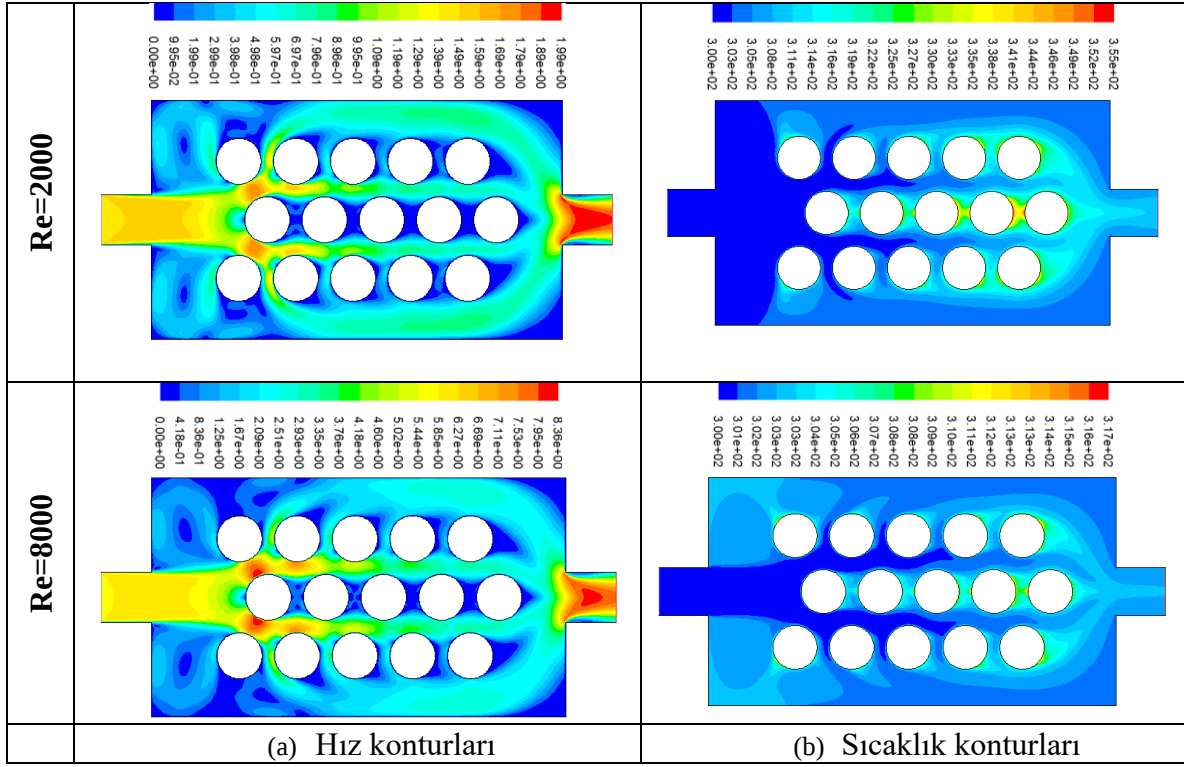
Sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar, Hasan vd. (2023), tarafından gerçekleştirilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve her iki sonuç arasındaki uyum Şekil 2'de sunulmuştur. Böylece bu çalışmadaki çözümlerin doğruluğu sağlanmıştır.

Bu bölümde, çoklu bataryalar içeren modülün geometrisinin batarya termal yönetimine etkisini gözlemlemek için farklı Reynolds sayılarında hız ve sıcaklık görüntüleri paylaşılmıştır.

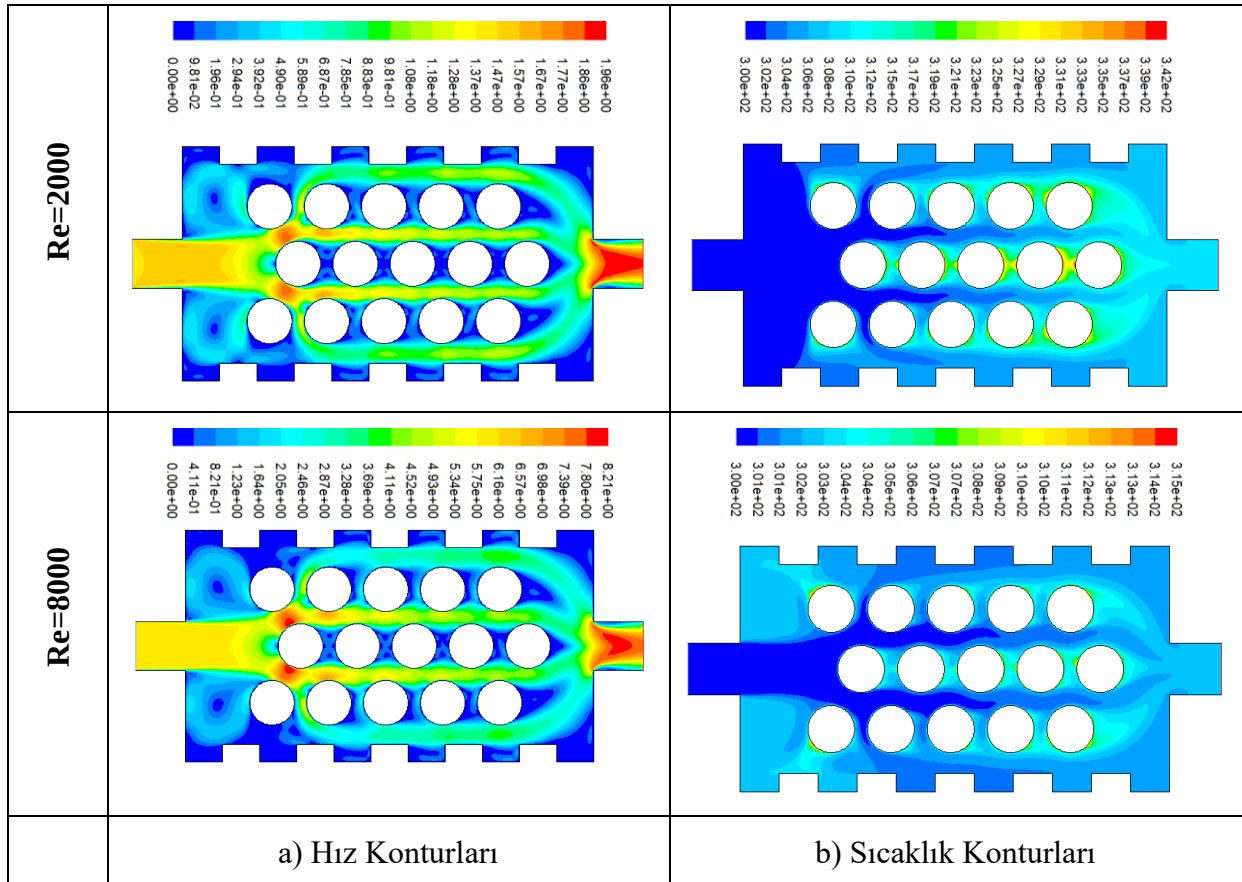


Şekil 2. Sayısal çalışmanın doğrulanması

Şekil 3'te düz modül için $Re=2000$ ve $Re=8000$ için (a) hız konturları ve (b) sıcaklık konturları sunulmuştur. Reynolds sayısının hız ve sıcaklık görüntülerini etkilediği açıkça görülmektedir. $Re=2000$ 'de akışkan dört farklı kola ayrılarak her bir sıradaki batarya hücrelerinin üzerinden akmaktadır. Daha sonra akışın modül çıkışına yakın birleştiği ve modülü terkettiği görülmektedir. $Re=8000$ de akışkanın hızının artması ile modül içinde atalet ve türbülans etkileri artmaktadır. Bu durum akışta salınımlar oluşturarak akışkanın bataryalar arasına daha iyi nüfuz etmesine neden olmaktadır (Şekil 3a). Şekil 3b'de ise Reynolds sayısının artması ile bataryaların yüzey sıcaklıklarının düştüğü gözlenmektedir. $Re=2000$ 'de modül içinde en yüksek sıcaklık değeri 355 K iken $Re=8000$ 'de 317 K değerine düştüğü tespit edilmiştir. Her iki Reynolds sayısında da, çıkışa yakın hücrelerin yüzey sıcaklıklarının girişe yakın hücrelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak $Re=8000$ de sıcaklık gradyanı $Re=2000$ 'e göre oldukça düşüktür ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı dikkat çekmektedir.



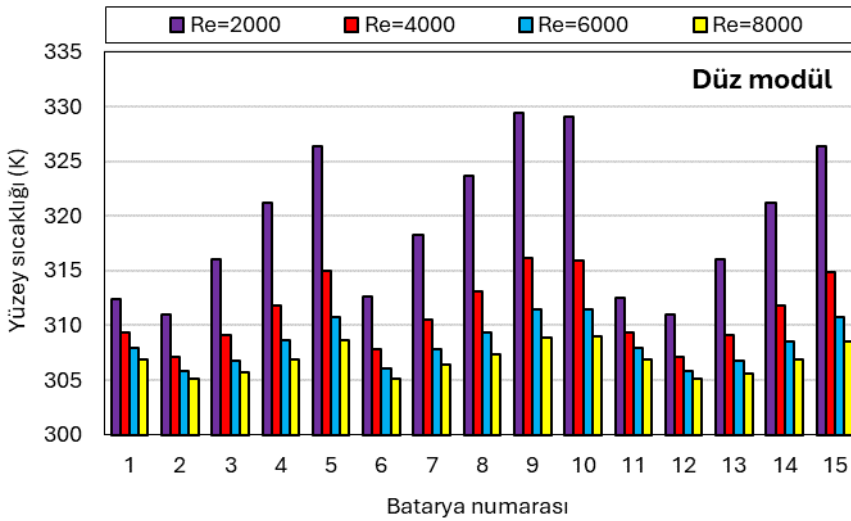
Şekil 3. Düz modül için farklı Reynolds sayılarında (a) Hız konturları, (b) Sıcaklık konturları



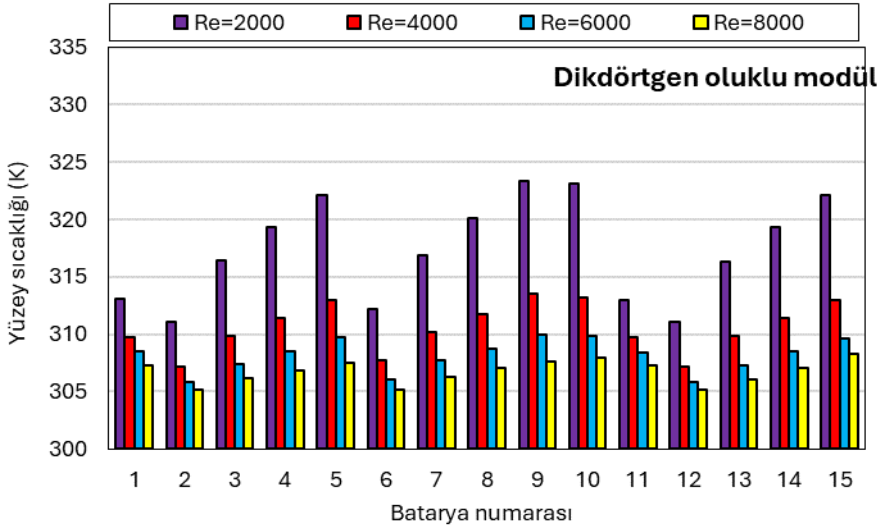
Şekil 4. Dikdörtgen oluklu modül için farklı Reynolds sayılarında (a) Hız konturları, (b) Sıcaklık konturları

Şekil 4'te dikdörtgen oluklu modül için $Re=2000$ ve $Re=8000$ için (a) hız konturları ve (b) sıcaklık konturları sunulmuştur. Dikdörtgen oluklu modülde Reynolds sayısı, hız ve sıcaklık görüntülerini etkilemektedir. Oluklu modül duvarları akışkan batarya hücrelerinin aralarına yönlendirmekte ve akışta bir salınım etkisi oluşturmaktadır. Bu durum akışkanın bataryaların etrafını daha iyi sarmasına neden olmaktadır. $Re=8000$ 'de bataryalar daha fazla soğuk akışkan ile temas ederek bataryalar arasındaki durgun akışkan bölgelerini azaltmaktadır (Şekil 4a). Şekil 4b'de artan Reynolds sayısı ile bataryaların yüzey sıcaklıklarının azaldığı gözlenmektedir. $Re=2000$ 'de modül içinde en yüksek sıcaklık değeri 342 K iken $Re=8000$ 'de 315 K değerine düştüğü tespit edilmiştir. Düz ve dikdörtgen oluklu modül geometrisi karşılaştırıldığında, dikdörtgen oluklu modülde bataryaların yüzey sıcaklıklarının oldukça düşük olduğu ve modülde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiği görülmektedir.

Şekil 5'te düz modül için farklı Reynolds sayılarında batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları görülmektedir. Reynolds sayısındaki artışla hücrelerin yüzey sıcaklıklarında önemli oranda düşüşler meydana gelmiştir. Özellikle $Re=2000$ 'den $Re=4000$ 'e yükseldiğinde sıcaklıkta büyük bir düşüş gözlemlenmektedir. Soğutucu havanın giriş kısmına yakın olan 1,6,11 ve 12 numaralı hücrelerin yüzey sıcaklıklarının girişe uzak olan diğer hücrelere oranla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte aradaki bu yüzey sıcaklık farklarının azaldığı tespit edilmiştir. Reynolds sayısının artması, modülün giriş kısmından uzakta olan hücreleri soğutmada etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. En düşük hücre yüzey sıcaklığı 305,11 K olarak 6 numaralı hücrede $Re=8000$ 'de elde edilmiştir ve aynı hücredeki en yüksek sıcaklık değeri $Re=2000$ 'de 312,65 K olarak belirlenmiştir. $Re=8000$ için hücreler arasındaki en yüksek ve en düşük yüzey sıcaklık farkı $\Delta t=3,87$ K olarak bulunmuştur.

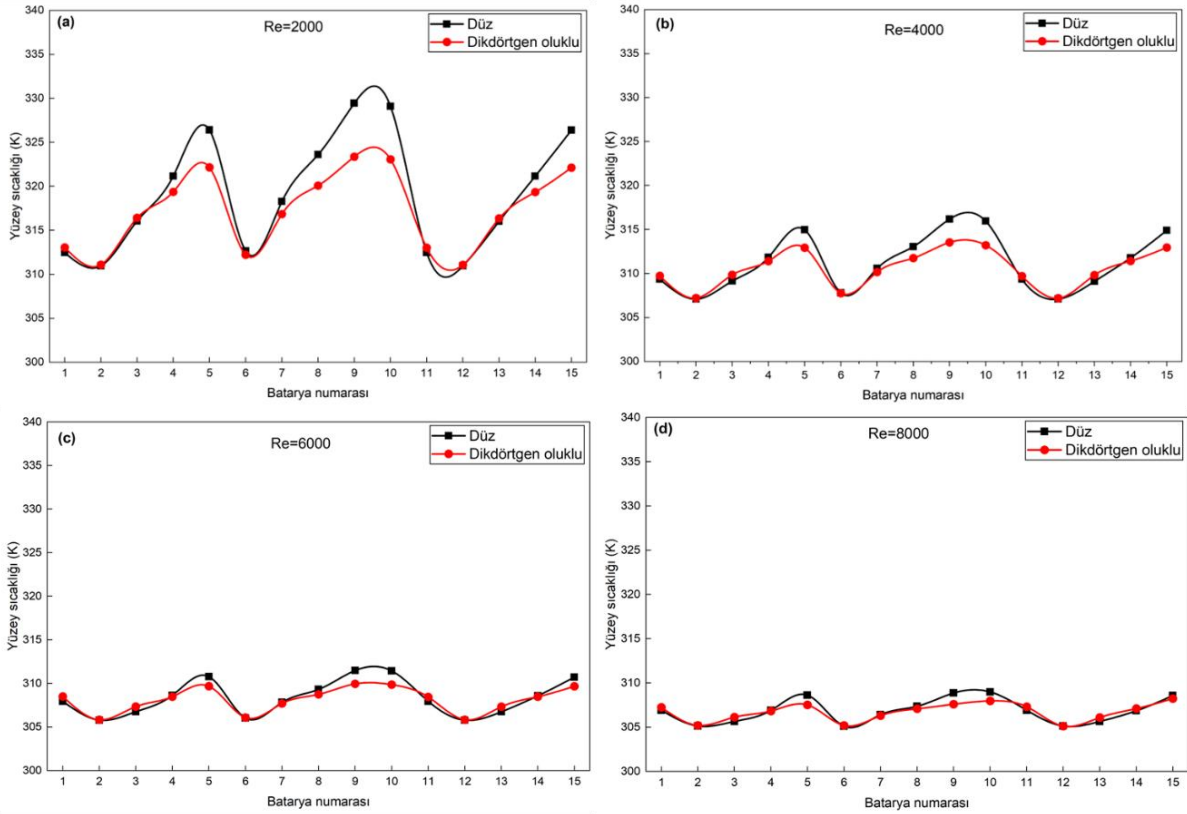


Şekil 5. Düz modül için farklı Reynolds sayılarında batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları



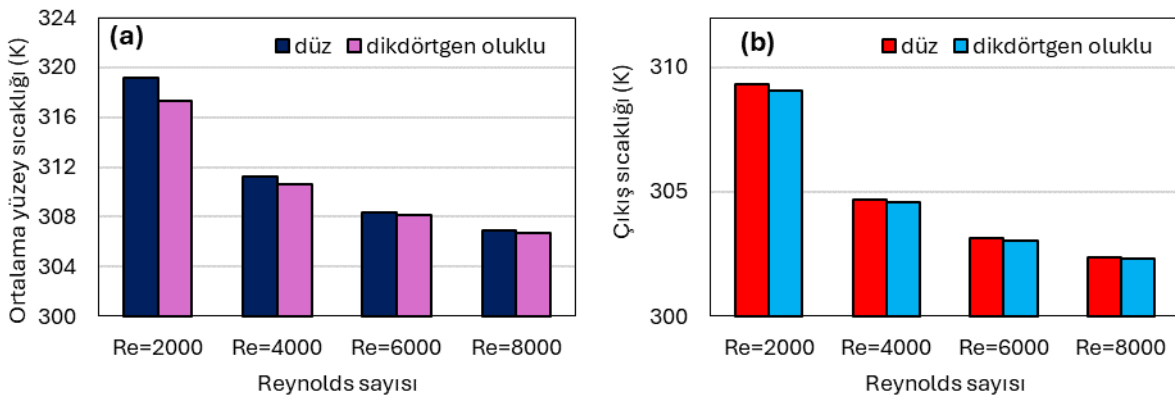
Şekil 6. Dikdörtgen oluklu modül için farklı Reynolds sayılarında batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları

Şekil 6’da dikdörtgen oluklu modülde farklı Reynolds sayıları için tüm hücrelerin yüzey sıcaklıkları görülmektedir. Reynolds sayısındaki artış ile bu modülde de hücrelerin yüzey sıcaklıklarında önemli düşüşler meydana gelmiştir. Düz modül ile kıyaslandığında, $Re=2000$ ’de dikdörtgen oluklu modüldeki (özellikle modül girişine uzak bölgedeki) hücrelerin yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, düşük Reynolds sayısında bile oluklu modülün daha etkili bir soğutma performansı sağladığını göstermektedir. Dikdörtgen oluklu modülde yapılan soğutma işleminde, girişe uzak bölgelerdeki hücrelerin yüzey sıcaklıklarının daha düşük olması önemlidir çünkü soğutma açısından en önemli noktalardan biri girişe uzak bölgedeki pillerin etkili bir şekilde soğutulmasıdır. Sonuç olarak, oluklu modül için en düşük hücre yüzey sıcaklığı değeri 12 numaralı hücrede ve $Re=8000$ değerinde $305,13\text{ K}$ olarak elde edilmiştir. $Re=8000$ için hücreler arasındaki en yüksek ve en düşük yüzey sıcaklık farkı $\Delta T=3,10\text{ K}$ olarak bulunmuştur. Dikdörtgen oluklu modüldeki hücreler arasındaki maksimum yüzey sıcaklık farkının düşük olması, bu modülde daha homojen bir soğutma performansının olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Her iki modül için farklı Reynolds sayılarında batarya yüzey sıcaklıklarının karşılaştırması (a) $Re=2000$, (b) $Re=4000$, (c) $Re=6000$, (d) $Re=8000$

Şekil 7a-d’de farklı Reynolds sayıları için düz ve dikdörtgen oluklu modüllerdeki her bir hücrenin ortalama yüzey sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Reynolds sayısının artması her modül için hücre yüzey sıcaklıklarını azaltmış ve genel olarak dikdörtgen oluklu modülde daha düşük hücre yüzey sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Reynolds sayısının artmasıyla modüllerin arasındaki farkın azaldığı göze çarpmaktadır. Özellikle $Re=2000$ ’de iki modül arasındaki batarya termal yönetim performansı farkı gözlemlenebilmektedir. Sonuç olarak, dikdörtgen oluklu modülde batarya soğutma performansının daha iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 8. Her iki modül için Reynolds sayısı ile (a) bataryaların ortalama yüzey sıcaklıkları, (b) modül çıkış sıcaklığı

Şekil 8a-b’de her iki modül için sırasıyla bataryaların ortalama yüzey sıcaklıkları ve modül çıkış sıcaklıkları gösterilmiştir. Şekil 8a’da her iki modül içinde Reynolds sayısındaki artışın bataryaların ortalama yüzey sıcaklıklarını azalttığı ve sıcaklık değerlerin bütün Reynolds sayıları için dikdörtgen oluklu modülde daha düşük olduğu görülmektedir. Ortalama en düşük yüzey sıcaklık değeri 306,72 K olarak dikdörtgen oluklu modülde ve Reynolds sayısı 8000’de bulunmuştur. Şekil 8b incelendiğinde, benzer şekilde, Reynolds sayısındaki artış ile soğutucu havanın modül çıkış sıcaklıkları azalmış ve bu değerler dikdörtgen oluklu modülde daha düşük olmuştur. En düşük çıkış sıcaklık değeri 302,30 K olarak belirlenmiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, silindirik Li-iyon bataryaları içeren modülün geometrisinin batarya termal yönetimi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada düz modül ve dikdörtgen oluklu modül olmak üzere iki farklı batarya modül geometrisi kullanılmıştır. Modül geometrisinin pillerin yüzey sıcaklığı ve modül çıkış sıcaklığı üzerindeki etkileri farklı Reynolds sayılarında ($2000 \leq Re \leq 8000$) analiz edilmiştir. Dikdörtgen-oluklu modülde batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıklarının düz modüle göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısının artması ile her iki modülde de bataryaların yüzey sıcaklıkları azalmış ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Ayrıca, Reynolds sayısının artması modül çıkış sıcaklığında bir düşüşe neden olmuş ve dikdörtgen-oluklu modülde çıkış sıcaklığının düz modüle göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu çalışma sonuçları, oluklu batarya modül geometrisinin batarya termal yönetiminde önemli avantajlar sağlayabileceğini ve uygun akış şartlarında homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebileceğini göstermektedir.

Referanslar

- Aldawi, F. (2025). Improving battery thermal management using superhydrophobic surfaces on mini-channel cold plates with zigzag and wavy walls. *Applied Thermal Engineering*, 126953.
- Behi, H., Karimi, D., Jaguemont, J., Gandoman, F. H., Kalogiannis, T., Berecibar, M., & Van Mierlo, J. (2021). Novel thermal management methods to improve the performance of the Li-ion batteries in high discharge current applications. *Energy*, 224, 120165.
- Chaudhari, J., Singh, G. K., Rathod, M. K., & Ali, H. M. (2024). Experimental and computational analysis on lithium-ion battery thermal management system utilizing air cooling with radial fins. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(1), 203-218.
- Gungor, S., Gocmen, S., & Cetkin, E. (2023). A review on battery thermal management strategies in lithium-ion and post-lithium batteries for electric vehicles. *Journal of Thermal Engineering*, 9(4), 1078-1099.
- Hasan, H. A., Togun, H., Abed, A. M., Mohammed, H. I., & Biswas, N. (2023). A novel air-cooled Li-ion battery (LIB) array thermal management system—a numerical analysis. *International Journal of Thermal Sciences*, 190, 108327.
- Li, Y., Kong, B., Qiu, C., Li, Y., & Jiang, Y. (2025). Numerical study on air-cooled battery thermal management system considering the sheer altitude effect. *Applied Thermal Engineering*, 258, 124707.
- Liu, Z., Xiong, C., & Du, X. (2025). Research on the optimization control strategy of a battery thermal management system based on serpentine liquid cooling combined with phase change material. *Journal of Power Sources*, 630, 236127.
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of power sources*, 110(2), 377-382.

Tong, B., Shi, J., Cao, M., Xuan, W., Chen, J., Jin, K., ... & Wang, Q. (2025). Comprehensive comparison study on battery thermal management modules with indirect and direct liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 268, 125945.

Wang, H., Liu, S., & Sheng, L. (2025). Numerical investigation on the impact of wavy side walls on the immersion cooling of cylindrical 21700 lithium-ion batteries. *Thermal Science and Engineering Progress*, 104042.

Xie, Y., Li, L., Xu, Q., Li, X., Huang, H., Huang, Y., & Zheng, K. (2024). Effects of module size on the heat dissipation performance of the thermal management system for the battery module with cylindrical cells. *Applied Thermal Engineering*, 238, 121958.

Zhang, S. B., He, X., Long, N. C., Shen, Y. J., & Gao, Q. (2023). Improving the air-cooling performance for lithium-ion battery packs by changing the air flow pattern. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119825.



OLUKLU BİR MODÜLDE BATARYA TERMAL YÖNETİMİNE NANOAKIŞKANLARIN ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ

Selma AKÇAY

Doç. Dr, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı-Türkiye, (Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0003-2654-0702

Sezgin YAŞA

Arş. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı-Türkiye, ORCID: 0000-0001-8468-3133

Özet

Bu çalışmada, dikdörtgen oluklu bir modül içerisinde yer alan birden fazla bataryanın termal yönetimi üzerinde nanoakışkanların etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal çalışma, ANSYS Fluent programı kullanılarak laminer kararlı akış koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, düz modül ve dikdörtgen oluklu modül olmak üzere iki farklı modül geometrisi kullanılmıştır. Her bir modüle, kademeli bir düzende toplam 15 adet silindirik Li-iyon batarya hücresi yerleştirilmiştir. Batarya hücrelerinin yüzeyleri, $q'' = 400 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında tutulmuştur. Çalışma akışkanı olarak su içerisinde Al_2O_3 nanopartiküllerin süspansiyonu kullanılmıştır. Nanopartikül hacim oranı, $\phi = \%3$ sabit tutulmuştur. Modüle akışkan giriş sıcaklığı $T_{in} = 300 \text{ K}$ 'dir. Çalışmada, batarya hücrelerinin yüzey sıcaklığı ve modülden akışkan çıkış sıcaklığı, $10 \leq Re \leq 150$ aralığında düşük Reynolds sayılarında analiz edilmiştir. Ayrıca, çözümler, temel akışkan için düz modül ve oluklu modüldeki bataryaların termal yönetimiyle karşılaştırılmıştır. Modül geometrisi ve nanoakışkanın batarya termal yönetimi üzerindeki etkilerini gözlemlemek için farklı Reynolds sayılarında hız ve sıcaklık görüntüleri paylaşılmıştır. Çalışma sonuçları, batarya modül geometrisinin ve Reynolds sayısının, batarya yüzey sıcaklıklarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Dikdörtgen oluklu modülde batarya yüzey sıcaklıklarının düz modüle kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Oluklu modülde nanoakışkan kullanımı, batarya yüzey sıcaklıklarını düşürmüş ve yüksek Reynolds sayılarında ($Re = 150$) modül içinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Reynolds sayısının artması, modül çıkış sıcaklığında bir düşüşe neden olmuş ve çıkış sıcaklığının dikdörtgen oluklu modülde düz modüle göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. $Re = 150$ 'de, oluklu modülün çıkış sıcaklığı nanoakışkan ve temel akışkan için benzer bulunmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, oluklu modül geometrisinin ve nanoakışkan kullanımının, özellikle elektrikli araçların batarya termal yönetiminde önemli avantajlar sağlayacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya termal yönetimi, Oluklu modül, Li-iyon batarya, Nanoakışkanlar, Sayısal çalışma

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF NANOFLUIDS ON THE BATTERY THERMAL MANAGEMENT IN A CORRUGATED MODULE

Abstract

This study numerically analyzes the effect of nanofluids on the thermal management of multiple batteries housed in a rectangular corrugated module. The numerical study was carried out under laminar steady flow conditions using the ANSYS Fluent program. Two different module geometries

were used in the study: a flat module and a rectangular corrugated module. A total of 15 cylindrical Li-ion battery cells were placed in each module in a staggered arrangement. The surfaces of the battery cells were maintained at a constant heat flux of $q'' = 400 \text{ W/m}^2$. A suspension of Al_2O_3 nanoparticles in water was used as the working fluid. The nanoparticle volume fraction was kept constant at $\phi = 3\%$. The fluid inlet temperature to the module was $T_{\text{in}} = 300 \text{ K}$. In the study, the surface temperature of the battery cells and the fluid outlet temperature from the module were analyzed at low Reynolds numbers in the range of $10 \leq \text{Re} \leq 150$. In addition, the solutions were compared with the thermal management of batteries in flat modul and corrugated modul for the base fluid. To observe the effects of module geometry and nanofluid on battery thermal management, velocity and temperature contour were shared at different Reynolds numbers. Results of the study showed that battery module geometry and Reynolds number significantly affect battery surface temperatures. It was determined that battery surface temperatures were lower in rectangular corrugated modul compared to flat modul. The use of nanofluid in the corrugated module reduced battery surface temperatures and provided a homogeneous temperature distribution within the module at high Reynolds numbers ($\text{Re} = 150$). Increasing the Reynolds number caused a decrease in the module outlet temperature, and the outlet temperature was determined to be lower in the rectangular corrugated module than in the flat module. At $\text{Re} = 150$, the outlet temperature of the corrugated module was similar for the nanofluid and base fluid. The results of this study demonstrate that corrugated module geometry and the use of nanofluid will provide significant advantages, especially in the battery thermal management of electric vehicles.

Keywords: Battery thermal management, Corrugated module, Li-ion battery, Nanofluids, Numerical study

1. Giriş

Batarya sisteminin sıcaklığını uygun aralıkta olmasını sağlamak, yalnızca batarya sisteminin performansını önemli ölçüde etkilemekle kalmaz, aynı zamanda güvenlik ve stabilite için oldukça önemlidir (Lin vd. 2021). Batarya paketindeki modüllerin yerleşimi, soğutucu ve ısıtıcı sistem türleri ve dışarıdan gelebilecek etkiler, paket içerisinde bulunan batarya hücrelerinin sıcaklık dağılımlarını etkileyebilir. Batarya hücrelerinde meydana gelen homojen olmayan sıcaklık dağılımları elektriksel dengesizliğe ve sonuç olarak batarya performansının düşmesine yol açabilir. Li-iyon piller, 25-40 °C arasında en yüksek performansı sergilerler. Bu nedenle, Li-iyon pillerin bu sıcaklık aralığında tutulmasını sağlayacak termal yönetim sistemleri, batarya performansı açısından önemlidir. Ayrıca batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkının 5 °C'den az olması istenilen bir durumdur (Pesaran, 2002). Şarj-deşarj süreçlerinde Li-iyon bataryaların sıcaklığı artar ve batarya paketi içerisinde homojen olmayan sıcaklık dağılımına neden olabilir. Bu durum bataryanın kullanım ömrünü azaltır (Chaudhari vd., 2024). Sonuç olarak, batarya performansını artırmak için batarya paketindeki hücrelerin sıcaklığını uygun bir sıcaklık aralığında tutmak amacıyla bir batarya termal yönetim sistemi kullanılmalıdır (Zhang vd., 2023). Elektrikli araçların performansı, verimliliği ve güvenliği açısından, batarya termal yönetim sistemleri uygulaması önemli bir konudur. Elektrikli araçların kullandığı artış devam ettikçe, verimli bir batarya sıcaklık kontrolünün önemi artmaktadır ve çeşitli termal yönetim teknikleri geliştirilmiştir (Tivari vd., 2025).

Sıvı soğutma (Tong vd., 2025) ve nanoakışkan (Liu vd., 2025) ile yapılan batarya soğutma işlemleri, Li-iyon batarya termal yönetiminde kullanılan önemli yöntemlerdendir. Sıvı kullanılarak yapılan batarya termal optimizasyon yöntemleri, sistemdeki farklı bileşenlere göre kategorilere ayrılabilir. Bu kategoriler, optimizasyon yöntemlerini, yapısal, akış kontrolü ve çalışma akışkanı optimizasyonu olarak ayrılabilir. Elektrikli araç bataryalarının termal yönetimindeki sorunlar ve yüksek şarj vedeşarj akımları, araştırmacıların daha etkili ve yenilikçi çözümler aramasını gerektirmektedir. Nanoakışkanlar, geleneksel akışkanlara kıyasla daha yüksek termal iletkenlik sağlayabilmeleri ile

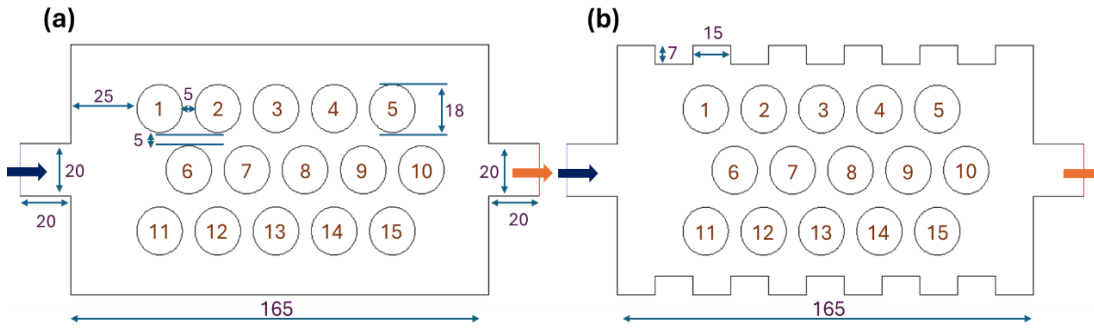
yüksek ısı transfer hızına sahiptir ve önemli bir batarya termal yönetim sistemi olarak önerilmektedir. (Gasmelseed vd., 2024). Batarya termal yönetimini etkileyebilecek bir başka değişken de batarya modül geometrisidir. Wang vd. (2025), daldırma ile yapılan sıvı soğutma sisteminde, performans artışı sağlamak için, batarya termal yönetiminde kare, düzgün altıgen ve dairesel yapıları duvarlar kullanmışlardır. Çalışma sayısal olarak yapılmış ve çalışmada T_{max} (1,28 °C) ve ΔT (0,88 °C) en büyük düşüşler kare yapıları duvar sisteminde elde edilmiştir. Batarya termal yönetiminde, Modül geometrisindeki değişimlerin önemli ölçüde etkili olduğu ortaya koyulmuştur.

Literatür çalışmasına göre bataryaların termal yönetiminde batarya modül geometrisinin etkisini araştıran çalışmaların oldukça az olduğu ve bu çalışmalarda nanoakışkan etkisinin araştırılmadığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, dikdörtgen oluk geometrisine sahip bir modülde bulunan bataryaların termal yönetiminde, Al_2O_3 -su nanoakışkanın etkisi düşük Reynolds sayılarında ($10 \leq Re \leq 150$) sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca çalışma düz ve oluklu modülde temel akışkan akışı ile karşılaştırılmıştır.

2. Malzemesel ve Metotlar

2.1 Sayısal Model

Sayısal çalışmada, çapı $D=18$ mm ve uzunluğu 65 mm olan silindirik Li-iyon batarya hücreleri, düz ve dikdörtgen oluklu bir modül içerisine kademeli olarak yerleştirilmiştir. Şekil 1, düz ve dikdörtgen oluklu modülün geometrisini göstermektedir. Modülde bataryalar üç sıra halinde yerleştirilmiştir. Her sırada 5 adet batarya olmak üzere toplam 15 adet batarya hücresi kademeli olarak konumlanmıştır. Akışkanın modüle girdiği kanalın yüksekliği ve uzunluğu sırasıyla $H=20$ mm ve $L=20$ mm'dir. Diğer geometrik özellikler sayısal model üzerinde verilmiştir. Bataryaların soğutulmasında iş yapan akışkan olarak Al_2O_3 -su nanoakışkan kullanılmıştır. Nanoakışkanın partikül hacim oranı $\phi=3\%$ olarak sabit tutulmuştur. Temel akışkana ve $\phi=3\%$ partikül hacim oranına sahip Al_2O_3 -su nanoakışkana ait termofiziksel özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Sayısal model (a) Düz modül, (b) Dikdörtgen oluklu modül (ölçüler mm'dir)

Tablo 1. Su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanın ($\phi=3\%$) termofiziksel özellikleri (Danışmaz ve Akdağ, 2025)

Materyal	Özgül ısı, C_p (kJ/kg°C)	Termal iletkenlik, (W/mK)	k	Yoğunluk, (kg/m ³)	ρ	Viskozite, μ (kg/ms)	Prandtl sayısı
Su	3412	0,6070		998,2		0,001003	5,85
Al_2O_3 -su ($\phi=3\%$)	3421	0,7189		1181,05		0,001390	5,76

2.2 Korunum Denklemleri

Çalışmada, Al₂O₃ nanopartiküllerin temel akışkan içinde homojen dağıldığı, sıkıştırılamaz, tek fazlı ve Newton tipi olduğu varsayılmıştır. Çözümlerde yerçekimi etkileri ve radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir. Viskoz model olarak laminer akış modeli kullanılmıştır. Simülasyonlar sürekli koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bu varsayımlara göre, korunum denklemleri Eşitlik 1-4'te verilmiştir:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum korunum denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + \vartheta_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial y} + \vartheta_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\vartheta_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \quad (5)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C)_{nf}} \quad (6)$$

Reynolds sayısı, Denklem 7 ile hesaplanmıştır:

$$Re = \frac{\rho_{nf} U D_h}{\mu_{nf}} \quad (7)$$

Burada ρ nanoakışkanın yoğunluğunu, U ortalama akışkan hızını, μ akışkanın viskozitesini ve D_h hidrolik çapını temsil eder.

Nanoakışkanın termofiziksel özelliklerinden yoğunluk (ρ) (Pak ve Cho, 1998), özgül ısı (C_p) (Maiga vd., 2005), ısı iletkenlik (k) (Hamilton ve Crosser, 1962) ve viskozite (μ) (Brinkman, 1952) Eşitlik (8)-(11) ile hesaplanmıştır.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi \rho_{pt} \quad (8)$$

$$C_{nf} = \frac{(1-\varphi)\rho_{bf}C_{bf} + \varphi\rho_{pt}C_{pt}}{\rho_{nf}} \quad (9)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{[k_{pt} + 2k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - k_{pt})]}{[k_{pt} + 2k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_{pt})]} \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} [123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1] \quad (11)$$

Burada nf, p ve bf alt indisleri sırasıyla nanoakışkanı, nanopartikülü ve temel akışkanı ifade etmektedir.

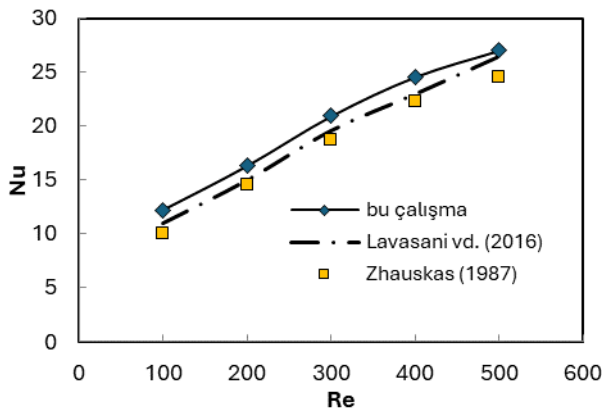
2.3 Sayısal Yöntem ve Sınır Şartlar

Sayısal model ve hücelere ayırma Gambit yazılımı ile oluşturulmuştur. Çözüm alanında yapılandırılmamış üçgen elemanlar kullanılmıştır. Çözümlerde en uygun eleman sayısını belirlemek için ağ bağımsızlık testi uygulanmış ve bu testin sonucunda düz ve dikdörtgen oluklu modül için sırasıyla 109802 ve 99832 eleman sayıları çözüm alanına uyarlanmıştır. Simülasyonlar, ANSYS Fluent paket programı yardımıyla çözülmüştür. Taşınım terimlerinin ayrıştırılmasında ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılmıştır. Basınç ve hız bağıntısı SIMPLE algoritması ile ele alınmıştır. Çözümler sürekli koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Yakınsama kriteri olarak enerji denklemlerinde 10^{-8} , diğer denklemlerde ise 10^{-4} kullanılmıştır. Bu değerlerde çözümlerin yakınsadığı görülmüştür.

Çalışmada, akışkan modülün giriş kanalına sabit hız ve sıcaklıkta ($T_{in}=300$ K) girmektedir. Kanal çıkışındaki basıncın atmosfer basıncına eşit olduğu varsayılmıştır. Her bir batarya hücresinin dış yüzeyinin sabit bir ısı akısında ($q''=400\text{W/m}^2$) korunduğu kabul edilmiştir. Batarya modülüne ait duvarlar adyabatik özelliktedir. Tüm yüzeyler için kaymaz sınır şartı tanımlanmıştır. Akışkanın hızı Reynolds sayısı ile belirlenmiş ve $10 \leq Re \leq 150$ arasındaki düşük Reynolds sayıları için çözümler gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar, Lavasani vd. (2016) ve Zhauskas (1987) tarafından gerçekleştirilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve tüm çalışma sonuçları arasındaki uyum, Şekil 2'de sunulmuştur.

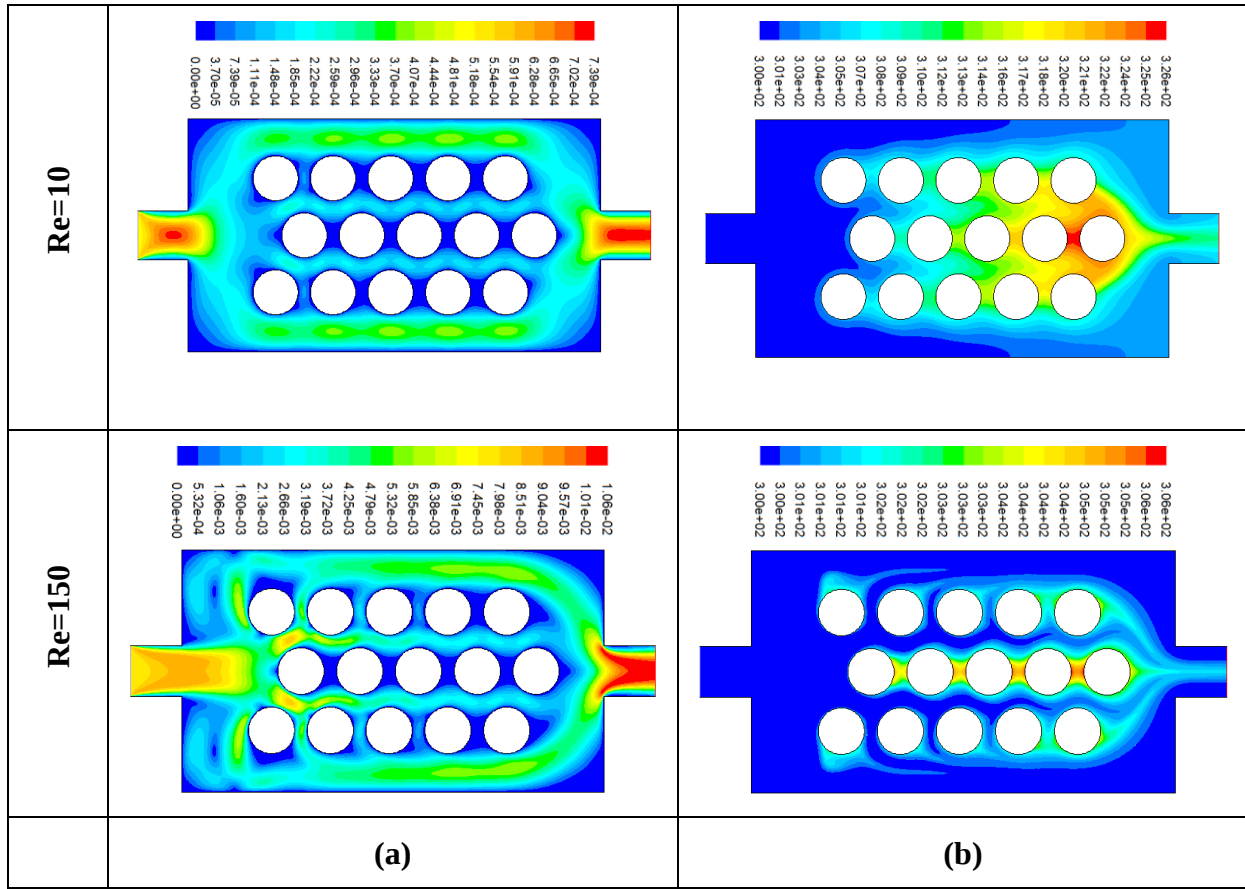


Şekil 2. Sayısal çalışmanın önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Bu bölümde, düz ve oluklu modül içerisine kademeli yerleştirilmiş bataryaların termal yönetimine, temel akışkanın ve nanoakışkanın etkisini gözlemlemek için farklı Reynolds sayılarında hız ve sıcaklık görüntüleri sunulmuştur.

Şekil 3'te düz modülde temel akışkanın $Re=10$ ve $Re=150$ değerleri için (a) hız konturları ve (b) sıcaklık konturları verilmiştir. Hız ve sıcaklık görüntülerinin Reynolds sayısından etkilendiği açıkça

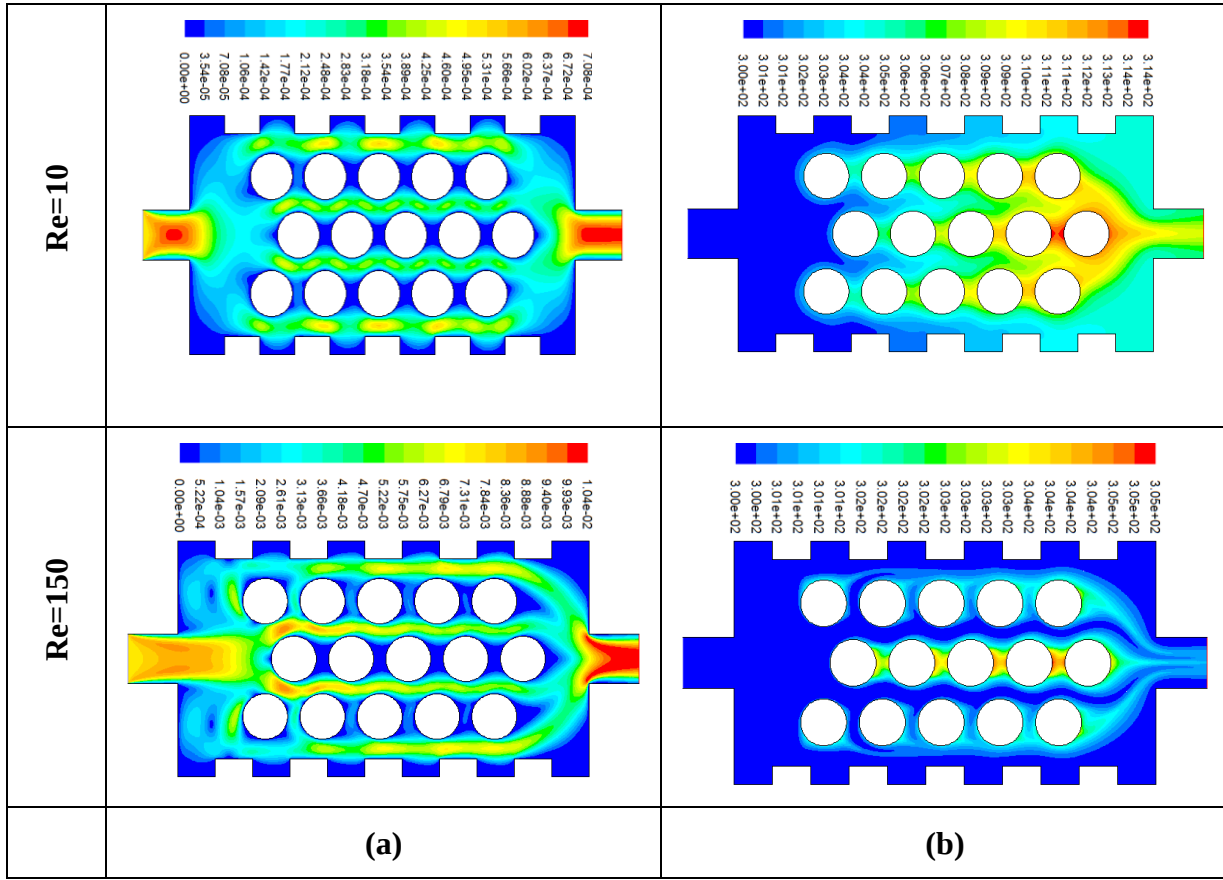
görülmektedir. $Re=10$ 'da, ana akışkanın ilk ve son sıradaki bataryalar üzerinden aktığı, orta sıradaki bataryalar arasına daha az nüfuz ettiği görülmektedir. Bataryaların kademeli yerleşiminin akışta bir salınım oluşturduğu gözlenmektedir. Bu salınımlar, akış karışımı ve ısı transferi için önemli olgulardır. Reynolds sayısının artması ile modüle giren akışkanın tüm sıradaki bataryalar arasına daha iyi dağıldığı ve akış salınımlarının arttığı görülmektedir (Şekil 3a). $Re=10$ 'da girişe yakın bataryaların yüzey sıcaklığı daha düşük iken çıkışa yakın bataryaların sıcaklığı daha yüksektir. $Re=150$ 'de modüldeki sıcaklık gradyanı oldukça azalmış ve $Re=10$ 'a göre daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Ancak orta sıradaki bataryalar arasında yüksek sıcaklık gradyanı dikkat çekmektedir. $Re=10$ 'de modül içinde en yüksek sıcaklık değeri 326 K iken $Re=150$ 'de 306 K değerine düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 3. Düz modülde temel akışkan için farklı Reynolds sayılarında (a) Hız konturları, (b) Sıcaklık konturları

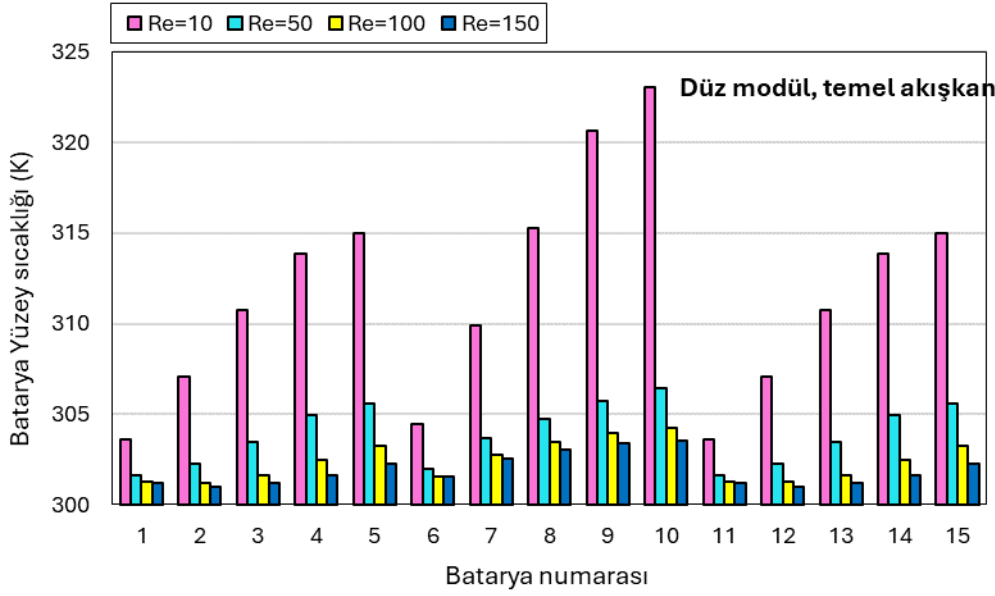
Şekil 4'te oluklu modülde Al_2O_3 -su nanoakışkanın $Re=10$ ve $Re=150$ değerleri için (a) hız konturları ve (b) sıcaklık konturları sunulmuştur. Oluklu modül ve nanoakışkanın hız ve sıcaklık görüntülerinin Reynolds sayısından etkilendiği gözlenmektedir. Düz modüle göre oluklu modül, akışkanın bataryalar arasına daha iyi nüfuz etmesini sağlamıştır. Şekil 3a'da olduğu gibi Reynolds sayısının artması, modüle giren akışkanın atalet etkilerini artırmakta ve her üç sıradaki bataryalar arasına daha iyi dağıldığı ve akış salınımlarının arttığı görülmektedir (Şekil 4a). Şekil 4b'de $Re=10$ için modülde çıkışa yakın bataryaların sıcaklık gradyanının girişe göre daha yüksek olduğu görülmektedir. $Re=150$ 'de modüldeki sıcaklık gradyanı düşmüştür ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı (orta sıradaki bataryaların arası hariç) meydana gelmiştir. $Re=10$ 'de modül içinde en yüksek sıcaklık değeri 314 K iken $Re=150$ 'de 305 K değerine düştüğü tespit edilmiştir. Şekil 3b ve Şekil 4b

karşılaştırıldığında, dikdörtgen oluk geometrisine sahip bir modülde nanoakışkan kullanımının bataryaların yüzey sıcaklıklarını önemli derecede düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 4. Dikdörtgen oluklu modülde Al_2O_3 -su nanoakışkan için farklı Reynolds sayılarında (a) Hız konturları, (b) Sıcaklık konturları

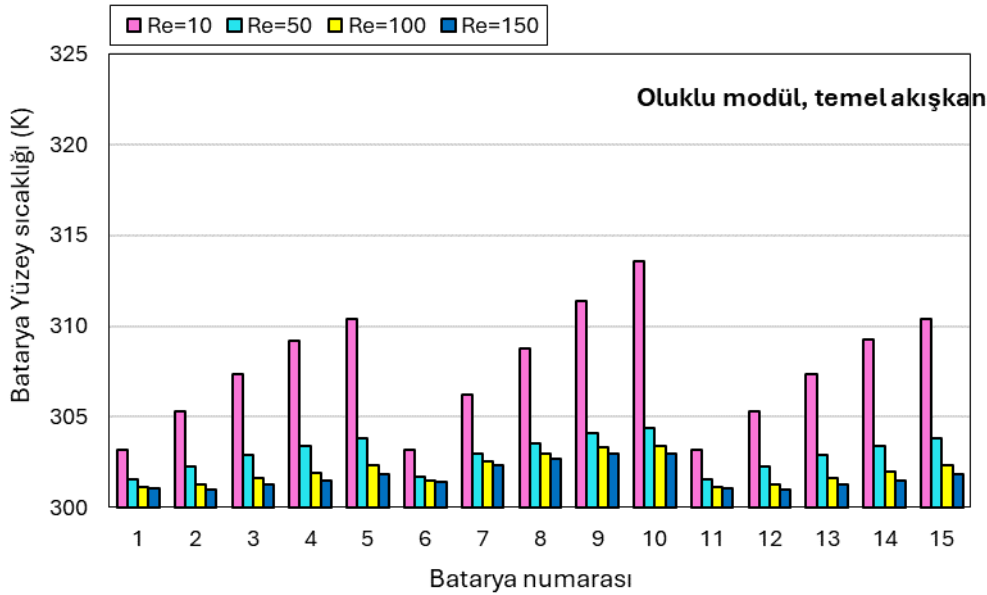
Farklı Re’de ve düz modüldeki temel akışkan için batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları Şekil 5’te verilmiştir. Re’nin artmasıyla bataryaların yüzey sıcaklıklarında düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle Re=10’dan Re=50’ye yükseldiğinde sıcaklıkta büyük bir düşüş gözlemlenmektedir. Tüm bataryalar içinde en düşük sıcaklık Re=150’de 301,02 K ile 2 numaralı batarya hücresinde gerçekleşmiştir. Re’de artış, yüzey sıcaklık farklarını azaltmıştır.



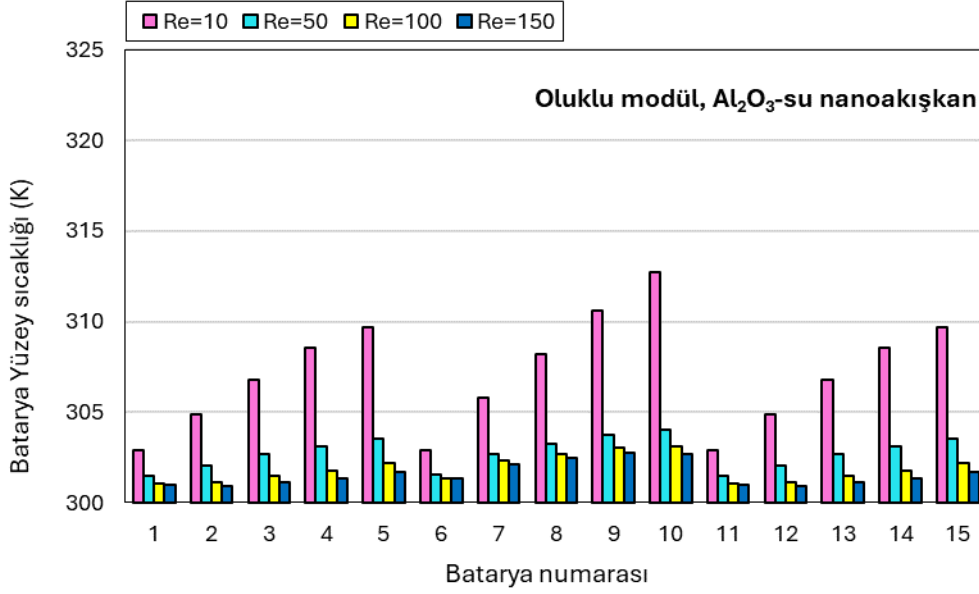
Şekil 5. Düz modül, temel akışkan için farklı Reynolds sayılarında batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları

Re'nin artması, modüle giriş bölgesinden uzakta olan bataryaların soğumasında etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Re=150 için hücreler arasındaki en yüksek ve en düşük yüzey sıcaklık farkı $\Delta T=2,3$ K olarak bulunmuştur.

Şekil 6'da oluklu modülde temel akışkan için farklı Re'de batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları görülmektedir. Reynolds sayısının artmasıyla bataryaların yüzey sıcaklıkları düşmeye başlamıştır. Düz modüle benzer şekilde, özellikle, Re=10'dan Re=50'ye yükseldiğinde sıcaklıkta büyük bir düşüş gözlemlenmektedir. En düşük sıcaklık Re=150'de 301,2 ile 2 ve 12 numaralı batarya hücrelerinde gerçekleşmiştir. Re=150 için hücreler arasındaki en yüksek ve en düşük yüzey sıcaklık farkı $\Delta T=2$ K olduğu tespit edilmiştir.



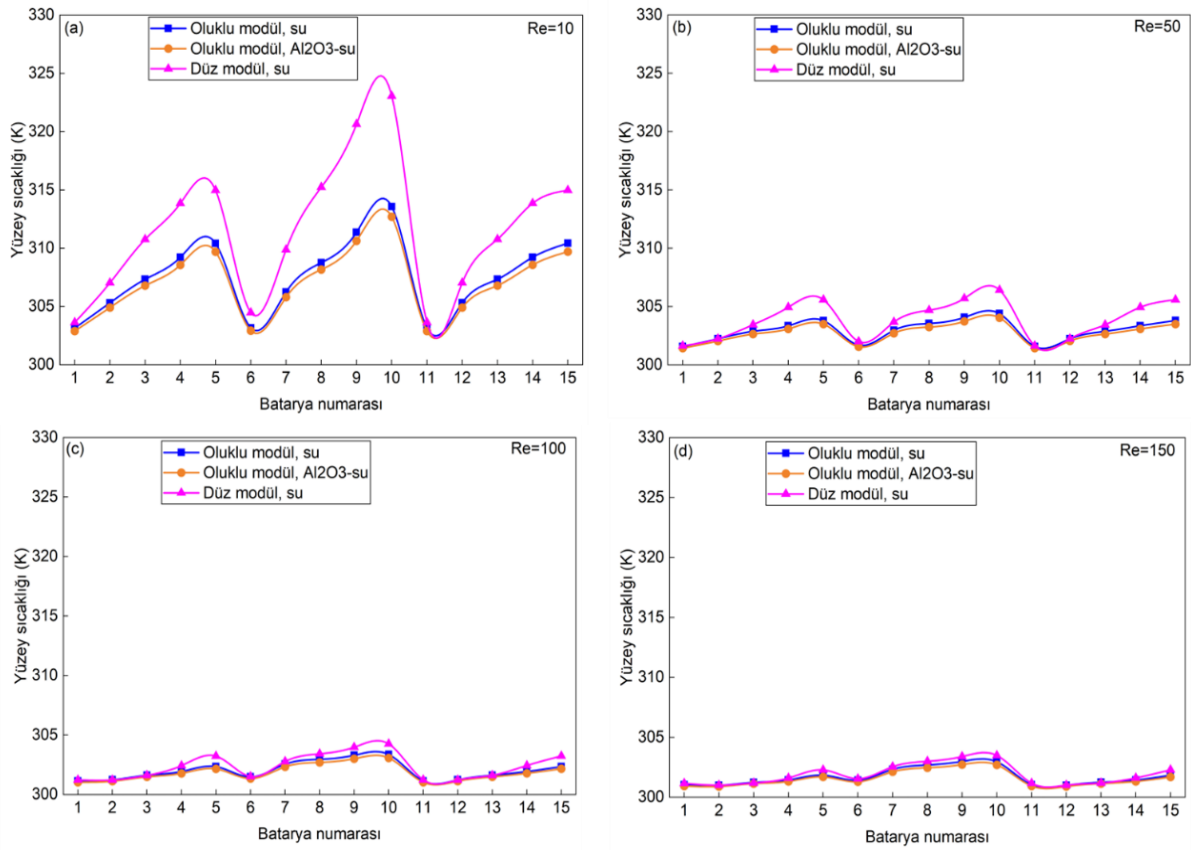
Şekil 6. Oluklu modül, temel akışkan için farklı Reynolds sayılarında batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları



Şekil 7. Oluklu modül, Al₂O₃-su nanoakışkan için farklı Reynolds sayılarında batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları

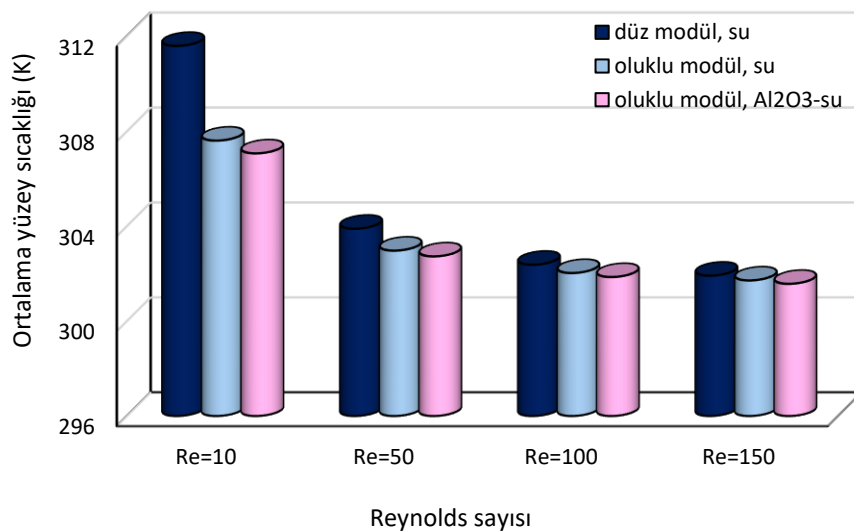
Şekil 7’de oluklu modülde Al₂O₃-su nanoakışkan için farklı Reynolds sayılarındaki batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları görülmektedir. Diğer modüllere benzer şekilde, özellikle, Re=10’dan Re=50’ye yükseldiğinde batarya hücre sıcaklıklarında büyük bir düşüş gözlenmiştir. En düşük sıcaklık Re=150’de 300,91 ile 2 ve 12 numaralı batarya hücrelerinde gerçekleşmiştir. Re=150 için hücreler arasındaki en yüksek ve en düşük yüzey sıcaklık farkı $\Delta T=1,82$ K olarak belirlenmiştir. Bataryalar arasındaki sıcaklık farkının en düşük olduğu durum, oluklu modülde nanoakışkan akışında gerçekleşmiştir.

Şekil 8a-d’de, farklı modüllerdeki her bir hücrenin ortalama yüzey sıcaklıklarının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi, karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Reynolds sayısındaki artış her modüldeki batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıklarını azaltmış ve genel olarak en düşük batarya yüzey sıcaklık değerleri oluklu modülde ve nanoakışkan kullanılan sistemde elde edilmiştir. Reynolds sayısının artması modüllerin arasındaki sıcaklık farklarını azaltmıştır. Özellikle Re=10’da, 3 farklı durum için batarya termal yönetim performansında sıcaklıklar arasındaki büyük farklar gözlenebilmektedir. Reynolds sayısının artması ile modülde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiği açıkça görülmektedir. Oluklu modülde nanoakışkan akışında elde edilen sıcaklık değerlerinin diğer durumlara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



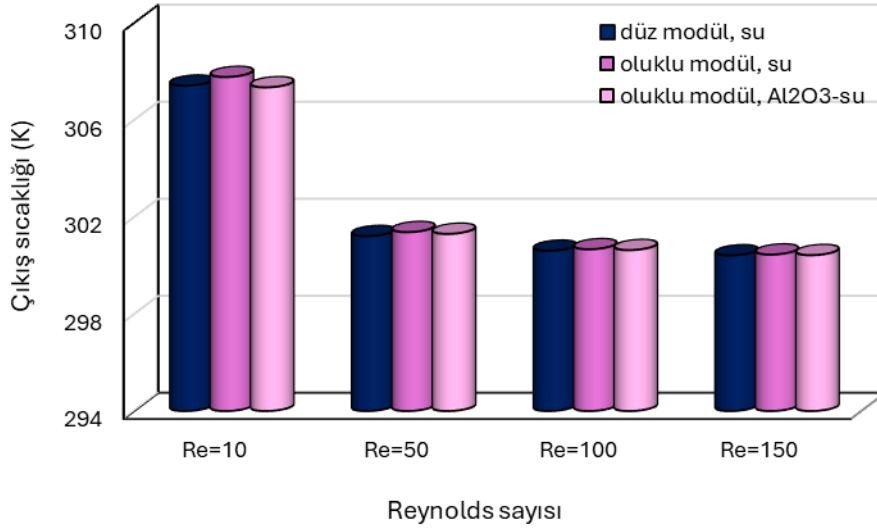
Şekil 8. Farklı modüller için batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları karşılaştırması, Re= (a) 10, (b) 50, (c) 100, (d) 150

Şekil 9’da her üç durum için bataryaların ortalama yüzey sıcaklıklarının Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Reynolds sayısının artışı bataryaların ortalama yüzey sıcaklıklarını önemli oranda düşürmüştür. En düşük batarya ortalama yüzey sıcaklık değeri Re=150’de 301,56 K ile oluklu modülde ve nanoakışkan içeren soğutma sisteminde elde edilmiştir.



Şekil 9. Reynolds sayısı ile bataryaların ortalama yüzey sıcaklıkları

Soğutucu akışkanın batarya modülünden çıkış sıcaklıklarının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir. Akışkanın modülden çıkış sıcaklıkları Reynolds sayısındaki artışla, azalma eğiliminde olmuştur. $Re=100$ 'den sonra akışkanın modülden çıkış sıcaklıklarında önemli bir değişiklik olmamış ve her 3 durum için de birbirine yakın sıcaklık değerleri gözlenmiştir. En düşük sıcaklık değeri $Re=150$ için düz modülde 300,41 K olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 10. Reynolds sayısı ile akışkanın modülden çıkış sıcaklığı

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, silindirik Li-iyon bataryaların termal yönetim performanslarına, farklı batarya modülleri ve farklı akışkanların etkisini araştırmıştır. Modül geometrisi ve akışkan tipinin batarya termal yönetimi üzerindeki etkisini sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmada düz modül ve oluklu modül olmak üzere iki farklı batarya modül geometrisi kullanılmıştır. Modül geometrisinin bataryaların yüzey sıcaklığı ve modül çıkış sıcaklığı üzerindeki etkileri farklı Reynolds sayılarında ($10 \leq Re \leq 150$) analiz edilmiştir. Oluklu modülde batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıklarının düz modüle göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısındaki artış bataryaların yüzey sıcaklıkları azaltmış ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Oluklu modülde nanoakışkanların kullanılması, batarya yüzey sıcaklıklarında düşüşe neden olmuştur. Reynolds sayısının artması her üç durumda akışkanın modülden çıkış sıcaklığını düşürmüştür. Çalışma sonucunda, oluklu batarya modülünün ve Al_2O_3 -su nanoakışkanın batarya termal yönetiminde avantajlar sağlayabileceğini ve homojen bir sıcaklık dağılımına ulaşılabileceğini göstermiştir.

Referanslar

- Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *Journal of chemical physics*, 20(4), 571-571.
- Chaudhari, J., Singh, G. K., Rathod, M. K., & Ali, H. M. (2024). Experimental and computational analysis on lithium-ion battery thermal management system utilizing air cooling with radial fins. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(1), 203-218.
- Danışmaz, M., & Akdağ, Ü. (2025). Enhancing heat transfer performance in elliptical tubes with nano fluids: A numerical case study. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1-15.

- Gasmelseed, A., Ismael, M. A., Said, M. A., Ahmad, F., & Osman, S. (2024). Thermal management strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles: a comprehensive review of nanofluid-based battery thermal management systems. *Results in Engineering*, 24, 103339.
- Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, 1(3), 187-191.
- Lavasani, A. M., & Bayat, H. (2016). Numerical study of pressure drop and heat transfer from circular and cam-shaped tube bank in cross-flow of nanofluid. *Energy conversion and management*, 129, 319-328.
- Lin, J., Liu, X., Li, S., Zhang, C., & Yang, S. (2021). A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 167, 120834.
- Liu, Q., Liu, F., Liu, S., Wang, Y., Panchal, S., Fowler, M., ... & Zhao, J. (2025). Improved performance of Li-ion battery thermal management system by ternary hybrid nanofluid. *Journal of Energy Storage*, 109, 115234.
- Maiga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G., & Galanis, N. (2005). Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International journal of heat and fluid flow*, 26(4), 530-546.
- Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), 151-170.
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of power sources*, 110(2), 377-382.
- Tiwari, S., Sahdev, R. K., Chhabra, D., Kumari, M., Ali, A., Sehrawat, R., & Tiwari, P. (2025). Advancements and challenges in battery thermal management for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 209, 115089.
- Tong, B., Shi, J., Cao, M., Xuan, W., Chen, J., Jin, K., ... & Wang, Q. (2025). Comprehensive comparison study on battery thermal management modules with indirect and direct liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 268, 125945.,
- Wang, H., Liu, S., & Sheng, L. (2025). Numerical investigation on the impact of wavy side walls on the immersion cooling of cylindrical 21700 lithium-ion batteries. *Thermal Science and Engineering Progress*, 104042.
- Zhang, S. B., He, X., Long, N. C., Shen, Y. J., & Gao, Q. (2023). Improving the air-cooling performance for lithium-ion battery packs by changing the air flow pattern. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119825.
- Žkauskas, A. (1987). Heat transfer from tubes in crossflow. In *Advances in Heat Transfer* 18, 87-159.

RESOLUTION OF INVESTMENT DISPUTES ARISING BETWEEN THE INVESTOR AND THE PARTY STATE WITHIN THE SCOPE OF THE ENERGY CHARTER AGREEMENT THROUGH ARBITRATION

Aynaz UĞUR

Ass. Prof. Dr., Inonu University, Faculty of Law, International Private Law Department, Malatya-
Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-1934-1051

Abstract

The Energy Charter Treaty (ECT) provides three institutional options for the resolution of investment disputes through arbitration: the International Centre for Settlement of Investment Disputes (ICSID), the United Nations Commission on International Trade Law (UNCITRAL), and the Arbitration Institute of the Stockholm Chamber of Commerce (SCC). In this study, the arbitral procedures carried out by these institutions will be examined in the context of the ECT.

If both the investor's home state and the host state of the investment are parties to the ICSID Convention, this method may be used. Articles 25, 26, and 27 of the ICSID Convention regulate jurisdiction. The scope of this jurisdiction is concretized through the following conditions: the parties' written consent to arbitration, the dispute's connection with an investment, the legal nature of the dispute, and the parties' status as contracting states to the Convention. In this framework, the arbitral tribunal must first decide on its own jurisdiction. Unlike ICSID, UNCITRAL tribunals do not undergo an additional jurisdictional review. However, for the enforcement of arbitral awards, recognition and enforcement must be sought under the New York Convention. The SCC, by contrast, does not directly adjudicate disputes but provides administrative services for their resolution. Confidentiality is a key principle under SCC rules. The parties are bound by the arbitral award and obliged to enforce it immediately.

Given its relevance to the resolution of foreign investment disputes in the Turkish energy sector, this issue is of particular importance. In this study, examples of arbitral cases will also be presented, with the aim of shedding light on controversial aspects of the practice.

Keywords: Energy, investment, arbitration

Introduction

With the impact of globalization, investments in the energy sector have increased, and the legal protection of these investments has brought international arbitration mechanisms to the forefront. The Energy Charter Treaty (ECT) offers the contracting states three arbitration avenues for resolving investor disputes: ICSID, UNCITRAL, and SCC. This article examines these avenues comparatively and discusses the problems encountered in practice.

Materials&Methods

The study has been prepared using a normative-legal methodology. A comparative evaluation has been conducted based on Article 26 of the ECT, Articles 25–27 of the ICSID Convention, the UNCITRAL Arbitration Rules, and the SCC Rules of Procedure. In addition, selected precedent arbitral decisions have been analyzed.

Findings

I. International Centre for Settlement of Investment Disputes (ICSID)

A. General Overview

ICSID, established within the framework of the World Bank, is an international dispute resolution center created to assist in the resolution of investment disputes between investors and host states. In the energy sector, the parties frequently resort to ICSID arbitration, which was established by the Convention on the Settlement of Investment Disputes between States and Nationals of Other States (Ekşi, ICSID, 2009). The primary aim of this convention is to encourage the development of the international economy by creating a favorable investment climate (Dost, 2006; Erdoğan, 2004). Another objective of the Convention is to remove disputes between foreign investors and host states from being perceived as political threats or tools, thereby fostering the flow of investments from developed to developing countries (Dost, 2006). Since the mid-1980s, bilateral investment treaties have become widespread, which further increased the attractiveness of ICSID arbitration (Ekşi, Arbitration Experience, 2002). If an investor opts for international arbitration to resolve a dispute, ICSID arbitration is listed among the options under the ECT. However, both the investor's home state and the host state must be parties to the ICSID Convention for the dispute to be resolved within ICSID arbitration. If only one of the parties is a contracting state to the ICSID Convention, the dispute can be resolved under ICSID's Additional Facility Rules.

B. ICSID Arbitration Rules and Issues Arising under the ECT

1. Jurisdiction of ICSID

Articles 25, 26, and 27 of the ICSID Convention regulate its jurisdiction. The fundamental factors that determine ICSID's jurisdiction are: the existence of written consent to arbitration, the dispute's connection to an investment made in the host state, the dispute's legal nature, and the fact that the dispute arises between a contracting state and a national of another contracting state (Torun, 2011). Under the ECT, merely referring disputes to ICSID is not sufficient. The arbitral tribunal as well as the Secretariat must re-examine whether jurisdictional requirements are satisfied (Kartal, 2020). Consequently, there is a possibility of a lack of jurisdiction.

For ICSID arbitration to commence, both parties must give explicit consent in writing regarding the foreign investment dispute. This consent may be granted either before or after the dispute arises. ICSID arbitration can be chosen by incorporating an arbitration clause into an investment agreement, by a provision in the domestic law of the state, or through a bilateral or multilateral agreement (McLachlan, Shore & Weiniger, 2017). Pursuant to Article 26/4(a) of the ECT, contracting states are deemed to have given such consent. The ICSID Convention also allows states to exclude certain types of disputes from its jurisdiction. For instance, Turkey excluded disputes concerning real property rights from ICSID arbitration, reasoning that they fall under the exclusive jurisdiction of Turkish courts (Karaçoban, 2024).

When an investment dispute under the ECT is submitted to ICSID arbitration, the arbitral tribunal will first assess whether the subject of the dispute falls within the scope of "investment" under the ICSID Convention (Avşar, 2017). If not, this constitutes a jurisdictional bar. However, the ICSID Convention does not explicitly define the term "investment." In the *Salini v. Morocco* case, the criteria for investment were established, leading to the conclusion that all legal issues directly arising from the investment relationship between the host state and the investor may be brought before ICSID (Stern, 2009).

A major jurisdictional challenge relates to the definition of the "investor." Unlike the broad definition in the ECT, ICSID limits disputes to nationals of contracting states only (Blanch, Moody & Lawn,

2008). The ECT, however, allows for nationals, citizens, and permanent residents of contracting states to qualify as investors (Kartal, 2020). Thus, a permanent resident in a contracting state would not qualify as an investor under ICSID, resulting in a jurisdictional obstacle. Moreover, the Convention does not clearly define how nationality is to be determined (Jagush & Sinclair, 2006). For legal persons, the issue is even more complex. While the ECT only requires incorporation under the laws of the state concerned, ICSID also requires nationality, which is determined by the place of incorporation. Yet, the Convention provides that legal persons under foreign control may be deemed foreign investors. For example, a Turkish company treated as foreign due to foreign control could bring a claim against Turkey (Şanlı, Contract, 2013), whereas a British company incorporated in Turkey would be considered Turkish and could not bring a claim unless foreign control is established (Ekşi, ICSID, 2009).

Another controversial issue is dual nationality. It remains unclear how cases where an investor has dual nationality — including the host state — should be handled. Doctrine suggests that if one nationality is that of the host state and there is no foreign control, ICSID arbitration cannot proceed; however, dual nationality involving two contracting states other than the host state does not prevent arbitration (Ekşi, ICSID, 2009).

The requirement that the dispute must be “legal” means it must stem from the violation of a legally protected right or obligation, not merely a commercial or political disagreement (Schreuer, 2008; Yılmaz, 2004). Since the ECT is a binding treaty that creates enforceable rights and obligations, disputes under it are regarded as legal disputes for ICSID jurisdictional purposes.

In addition, both the host state and the investor must be parties to the ICSID Convention to access ICSID arbitration.

2.Determination of the Applicable Law

According to Article 42 of the ICSID Convention, the applicable law is first and foremost the rules agreed upon by the parties under the principle of party autonomy. In the absence of such agreement, the law of the host state and applicable rules of international law will govern. This framework does not preclude equitable considerations if the parties agree. In disputes under the ECT, the arbitral tribunal will look for any agreed choice of law between the parties. Article 26/6 of the ECT provides that disputes shall be decided in accordance with the Treaty and applicable rules and principles of international law. This grants arbitral tribunals both flexibility and authority (Tietje, 2008). For instance, in *Nykomb v. Latvia*, instead of applying Article 22 of the ECT, the tribunal applied general rules and principles of international law.

The decisions rendered by ICSID tribunals are binding on the parties and contracting states. They are treated as final judgments of domestic courts in contracting states and are directly enforceable. This distinguishes ICSID arbitration from other international arbitration mechanisms (Ekşi, ICSID, 2009). ICSID awards are enforceable like domestic court judgments (Şanlı, Contract, 2013). Article 26/8 of the ECT explicitly provides that arbitral awards are binding and must be enforced without delay by contracting states, echoing Article 54 of the ICSID Convention (Karaçoban, 2024).

C. Case Examples

In the arbitration between Europe Cement Investment Trade S.A. and Turkey, the tribunal first examined its jurisdiction and whether the claimant company qualified as an investor. Since the contracts were drafted only in Polish, no original share transfer certificates were submitted, and records regarding the shares were missing, the tribunal concluded that no actual share transfer had occurred. Therefore, it found that there was neither an investment nor an investor and ruled that it

lacked jurisdiction. The tribunal further emphasized that in the absence of an investment, there could be no abuse of rights.

In another case, Nabucco Gas Pipeline International GmbH in Liqu. filed for arbitration against Turkey on May 19, 2015. Both parties appointed their arbitrators, but they could not agree on the presiding arbitrator. Although a tribunal was eventually constituted, before proceedings commenced, Nabucco notified the Secretariat of its decision not to pursue arbitration. Turkey did not object, and the arbitration concluded before it began.

II. United Nations Commission on International Trade Law (UNCITRAL)

A. General Overview

The United Nations Commission on International Trade Law (UNCITRAL), established as a subsidiary body of the United Nations General Assembly, was created by Resolution 2205 (XXI) of December 17, 1966. In 1976, the UNCITRAL General Assembly adopted the UNCITRAL Arbitration Rules and recommended their use in international commercial disputes. Through these rules, the benefits of international arbitration were systematized into a set of ad hoc rules that could be applied across countries with different socio-economic conditions and legal systems (Kalpsüz, 1990). This has contributed to the harmonious development of international economic relations. These rules prioritize the security and efficiency of international trade and the speedy resolution of disputes.

The UNCITRAL Arbitration Rules are the most widely preferred set of ad hoc arbitration rules. Under the ECT, another alternative method for resolving disputes between an investor and a contracting state is arbitration pursuant to the UNCITRAL Arbitration Rules. In this respect, a single arbitrator or an ad hoc arbitral tribunal is constituted under these rules. The UNCITRAL Arbitration Rules serve as procedural rules applicable to legal disputes if the parties so agree. Article 1(5) of the Rules also incorporates the UNCITRAL Expedited Arbitration Rules, but these require the express consent of the parties. In other words, the parties may decide that the Expedited Arbitration Rules shall apply, regardless of whether the dispute arises out of a contract.

Importantly, the UNCITRAL Arbitration Rules do not provide an institutional mechanism for managing proceedings; they merely supply procedural guidance. The parties retain significant flexibility, including the ability to modify the rules or apply them partially.

The scope of application is not limited to commercial disputes; the Rules may also apply to other types of legal disputes (Zenginkuzucu, 2013). Within the context of the ECT, there is no substantive difference in the constitution of the arbitral tribunal or the conduct of proceedings. However, the jurisdictional rules under UNCITRAL are particularly significant. Unlike ICSID, where mere consent to arbitration in a treaty is not sufficient, under UNCITRAL this is indeed sufficient. Thus, an ad hoc arbitral tribunal constituted under UNCITRAL provides procedural advantages for ECT disputes by reducing the risk of jurisdictional objections.

If an investor brings an ECT dispute to arbitration, one of the three available options is arbitration under the UNCITRAL Rules, either before a sole arbitrator or an ad hoc tribunal. While ICSID awards are directly enforceable, UNCITRAL awards are subject to recognition and enforcement under the New York Convention, as explicitly noted in the ECT (Blanch, Moody & Lawn, 2008). This reliance on domestic courts at the enforcement stage is often perceived as a disadvantage of ad hoc arbitration under the ECT.

To address this, Article 26(5)(a)(ii) of the ECT provides that arbitral awards shall be recognized and enforced under the New York Convention. Accordingly, awards rendered by an ad hoc tribunal constituted under UNCITRAL Rules in ECT disputes must be recognized and enforced by contracting

states in accordance with the Convention and their domestic procedural rules (Şanlı, New York, 1994). Refusal of recognition and enforcement may only be justified on limited grounds, including:

- Lack of capacity of the parties to conclude the arbitration agreement, or invalidity of the agreement;
- Failure to provide proper notice of the arbitration to the respondent, or inability to present a defense;
- The award exceeding the scope of the arbitration agreement;
- Improper constitution of the arbitral tribunal or arbitral procedure inconsistent with the parties' agreement or the law of the seat;
- The award being set aside or suspended by a competent authority at the seat of arbitration, or the award not being binding;
- The subject matter of the dispute not being arbitrable; and
- Recognition or enforcement of the award being contrary to public policy.

Taken together, these grounds leave local courts with some discretion to review awards and, to a limited extent, apply domestic law.

B. The Yukos Case

The claimants requested that their dispute be resolved by an ad hoc arbitral tribunal constituted under the UNCITRAL Arbitration Rules. Each side appointed its arbitrator, but the presiding arbitrator was not appointed within the designated time. In the proceedings administered by the Permanent Court of Arbitration (PCA), the claimants requested that the PCA appoint the presiding arbitrator under the UNCITRAL Rules. Russia did not object. The PCA created a shortlist of three arbitrators, but since the parties did not select from the list within 15 days, the PCA, as the appointing authority, appointed an arbitrator directly pursuant to Article 6(3) of the UNCITRAL Arbitration Rules.

Russia proposed the PCA building as the seat of arbitration, and this was accepted by the claimants. During the proceedings, the arbitrator appointed by the claimants resigned, requiring a replacement. Russia challenged the newly appointed arbitrator's impartiality, prompting further replacements. After the tribunal was fully constituted, Russia objected to its jurisdiction. Under the UNCITRAL Rules, the fact that arbitrators are appointed by the parties does not preclude jurisdictional objections. The tribunal addressed this objection as a preliminary issue, examining jurisdiction under the ECT itself.

In its interim decision, the tribunal assessed the provisional application of the ECT, the definitions of "investment" and "investor," and dispute resolution provisions. Relying on Articles 1(6), 1(7), 17, 26(3)(b)(i), and 45 of the ECT, the tribunal concluded that it had jurisdiction.

III. Arbitration Institute of the Stockholm Chamber of Commerce (SCC)

A. General Overview

Another institutional arbitration forum designated under the ECT is the Arbitration Institute of the Stockholm Chamber of Commerce (SCC), established in 1917 as an entity independent of the Stockholm Chamber of Commerce. The SCC does not itself adjudicate disputes directly; rather, it serves as an institutional center that provides administrative services for the resolution of disputes. At the SCC, the arbitration process is facilitated and supported with clarifying and auxiliary services so that cases may be decided under the SCC Arbitration Rules or under other arbitration rules chosen by

the parties. A further reason for preferring the SCC is its advanced technical infrastructure, including ample hearing rooms and equipment.

Under the SCC Arbitration Rules, the principle of confidentiality applies. The duty of confidentiality binds both the SCC and the arbitral tribunal (Karaçoban, 2024). Pursuant to Article 2 of the SCC Rules, unless the parties agree otherwise, the confidentiality of the arbitration and of the award must be maintained; hearings are therefore to be held in private. The tribunal will determine the procedure in accordance with any procedure agreed between the parties, or, failing such agreement, under the SCC Rules. According to Article 25 of the SCC Rules, unless the parties have agreed otherwise, the seat of arbitration shall be determined by the Board (Tan, 2003). In consultation with the parties, the tribunal may conduct hearings in any venue it deems appropriate. If the parties do not choose the applicable law, the tribunal will determine the law most closely connected to the dispute as the applicable substantive law (Aygül, 2014). As the applicable law, the parties may select the law of a particular country or they may directly select a set of legal rules. Where a dispute arises under the ECT and is resolved under the auspices of the SCC, Article 26(6) of the ECT provides that the provisions of the ECT together with the applicable principles and rules of international law shall govern the merits (Karaçoban, 2024).

Under the SCC Rules, awards are final and binding on the parties as of the date they are rendered. There is no internal appellate body within the SCC against an arbitral award. Pursuant to the SCC Rules, the parties must comply with the award without delay.

B. Cem Cengiz Uzan v. Turkey Case

Cem Cengiz Uzan argued that he was a foreign investor both under the ECT and under Turkey's Foreign Direct Investment Law No. 4875, that he resided in France and the United Kingdom, and that the SCC had jurisdiction over the dispute. Turkey, however, contended that Law No. 4875 entered into force after the expropriation at issue and therefore should not be taken into account in the present dispute.

During the arbitration, on 23 June 2015, a legal opinion was obtained from the jurist Adnan Amkhan Bayno. In his opinion, Bayno relied on Articles 1/7 and 26 of the ECT. Article 26(1) provides that "with respect to disputes relating to an Investment of an Investor of a Contracting Party in the Area of another Contracting Party, concerning an alleged breach of an obligation of the latter under Part III...", disputes may be submitted to arbitration under the ECT.

Assessing the concepts of (i) Contracting Party, (ii) Investor, (iii) Investment, and (iv) Area, Bayno examined whether Cem Cengiz Uzan could qualify as "an Investor of another Contracting Party" under Article 26(1) and focused on the definition of "Investor" in Article 1(7)(a)(i) of the ECT. That provision includes within the definition "a natural person who is a national or citizen of a Contracting Party or who permanently resides in that country in accordance with its applicable law." According to Bayno, although Cem Cengiz Uzan had ties to France and the United Kingdom, those ties were recent and weak; therefore, he could not be regarded as a permanent resident there. His dominant and effective connections were clearly with Turkey. Consequently, Uzan, as a national of the respondent state, lacked standing to bring an arbitration claim against his own state. An additional expert opinion was requested on 27 November 2015; the file was again referred to Bayno, who maintained his earlier view.

In its decision, the tribunal conducted a detailed evaluation of Uzan's connections to France and the United Kingdom as well as his contemporaneous ties to Turkey. It ultimately held that Uzan did not possess investor status under the ECT and dismissed the arbitration for lack of jurisdiction.

Discussion

ICSID stands out for its institutional strength and the direct enforceability of its awards; however,

because its jurisdictional reach is narrower than that of the ECT, investor access may be more limited. UNCITRAL, with its flexible structure, affords broader accessibility, yet awards are subject to scrutiny by national courts at the enforcement stage. The SCC offers practical and technical advantages, but questions may arise regarding binding effect and the definition of “investor.”

Conclusion

International arbitration constitutes a key safeguard for investors in the energy sector. By providing three distinct arbitration mechanisms, the ECT grants parties freedom of choice. ICSID offers final and binding awards with a robust enforcement regime; UNCITRAL stands out for its flexibility; and the SCC is often preferred for its practicality. Each of these paths has been used in the Turkish energy sector, and landmark cases (Europe Cement, Nabucco, Yukos, Cem Uzan) have generated diverse legal debates.

References

- Avşar, M. (2017). “ICSID Konvansiyonu’na Göre Yatırım Kavramı”, *Milletlerarası Hukuk ve Milletlerarası Özel Hukuk Bülteni*, C. L.37, S.2, p. 103-109.
- Aygül, M. (2014). *Milletlerarası Ticari Tahkimde Tahkim Usulüne Uygulanacak Hukuk ve Deliller*, p. 20-34.
- Blanch, J. & Moody, A. & Lawn, N. (2008). “Access To Dispute Resolution Mechanisms Under Article 26 Of The Energy Charter Treaty”, *Jurisnet / 2*, p. 5-15.
- Dost, S. (2006). *Yabancı Yatırım Uyuşmazlıkları Ve ICSID Tahkimi*, p. 30-35.
- Ekşi, N. (2009). *ICSID Hakem Kararlarının Tanınması Tenfizi Ve İcrası*, (ICSID), p. 25-50.
- Ekşi, N. (2002). “İki Taraflı Yatırım Anlaşmaları Uyarınca ICSID Kurallarında Tahkim Deneyimi, (Tahkim Deneyimi), *İstanbul Kültür Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, Cilt 1, Sayı 1-2, p. 83-91.
- Erdoğan, F. (2004). *Uluslararası Hukuk Ve Tahkim*, p. 60-80.
- Grabowski, A. (2014). “The Definition of Investment Under The ICSID Convention: A Defense Of Salini”, *Chicago Journal Of International Law*, Vol 15, No 1, p. 275-297.
- Jagush, S. & Sinclair, A. (2006). *The Limits Of Protection For Investments And Investors Under The Energy Charter Treaty*, p. 80-92.
- Kalpsüz, T. (1990). *Birleşmiş Milletler Milletlerarası Ticaret Hukuku Komisyonunun Tahkim Hükümlerine Göre Cereyan Eden Tahkim*, p. 1-2.
- Karaçoban, E. (2024). *Enerji Şartı Anlaşması Ve Bu Kapsamda Yatırımcı İle Taraf Devlet Arasındaki Yatırım Uyuşmazlıklarının Çözümü*, 9. 102-128.
- Kartal, B. (2020). *Enerji Şartı Anlaşması Çerçevesinde Uyuşmazlıkların Çözümü Ve Stockholm Ticaret Odası Tahkimi*, p. 116-128.
- Mclahlan, C. & Shore, L. & Weiniger, M. (2017). *International Investment Arbitration-Substantive Principles*, p. 156-168.
- Schreuer, C. (2008). “What Is A Legal Dispute?”, *International Law Between Universalism And Fragmentation, Festschrift In Honour Of Gerhard Hafner*, p. 959-980.
- Stern, B. (2009). “The Contours Of The Notion Of Protected Investment”, *ICSID Review Foreign Investment Law Journal*, Vol 24, No 2, p. 534-551.

- Şanlı, C. (2013). Uluslararası Ticari Akitlerin Hazırlanması Ve Uyuşmazlıkların Çözüm Yolları, (Akit), p. 440-457.
- Şanlı, C. (1994). “New York Konvansiyonu’na Göre Hakem Kararlarının Kesinleşmesi Sorunu” Milletlerarası Hukuk ve Milletlerarası Özel Hukuk Bülteni, 14(1-2), 92, (New York), p. 610-620.
- Tan, M. (2003). “Stockholm Ticaret Odası Tahkim Enstitüsü”nde Tahkim” İstanbul Üniversitesi Hukuk Fakültesi Milletlerarası Hukuk ve Milletlerarası Özel Hukuk Bülteni, Cilt 23, Sayı (1-2), p. 730-764.
- Tietje, C. (2008). “The Applicability Of The Energy Charter Treaty in ICSID Arbitration of EU Nationals Vs. EU Member States”. Martin Luther Universität Halle Wittenberg, Heft 78, p. 3-12.
- Torun, Y. (2011). Uluslararası Yatırım Uyuşmazlıklarının Çözüm Merkezi (ICSID) Hakem Kararlarına Karşı Hukuki Başvuru Yolları, p. 99-100.
- Yılmaz, İ. (2004). Uluslararası Yatırım Uyuşmazlıklarının Tahkim Yoluyla Çözümü ve ICSID, p. 27-28.
- Zenginkuzucu, D. M. (2013), Uluslararası Ticaret ve Yatırım Uyuşmazlıklarında Dostane Çözüm, p. 35-45.
- Costruttori S.P.A. And Italstrade S.P.A. V. Kingdom Of Morocco, Icsid Case No. Arb/00/4 Decision on Jurisdiction (English Translation: 42 Ilm 609 (2003) <https://www.italaw.com/sites/default/files/casedocuments/ita0738.Pdf>, E.T. 07.08.2025)
- Nykomb Synergetics Technology Holding Ab V. The Republic Of Latvia, Scc, 16 December 2003, Arbitral Award, s. 5 (<https://www.italaw.com/sites/default/files/case-documents/ita0570.pdf>, E.T. 07.08.2025).
- Europe Cement Investment & Trade S.A. v. Republic of Turkey, ICSID Case No. ARB(AF)/07/2 (<https://www.italaw.com/cases/421> E.T.21.08.2025).
- Nabucco Gas Pipeline International GmbH in Liqu. v. Republic of Turkey, ICSID Case No. ARB/15/26 (<https://www.italaw.com/cases/3780> E.T.22.08.2025).
- Yukos Universal Limited v. Russian Federation, Permanent Court of Arbitration, Final Award, Case No. AA 227, <http://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Disputes/ISDSC-006a.pdf> E. T. 25.08.2025.
- Cem Cengiz Uzan v. Republic of Turkey, SCC Case No. V 2014/023 (<https://www.italaw.com/cases/5586>)E.T.22.09.2025.

**WASTEWATER FROM EMERGING ENERGY TECHNOLOGIES: COMPOSITION AND
MEMBRANE TREATMENT APPROACHES****YENİ ENERJİ TEKNOLOJİLERİNDEN KAYNAKLANAN ATIKSULAR: BİLEŞİM VE
MEMBRAN TEKNOLOJİLERİ İLE ARITIM YAKLAŞIMLARI****Berk KÖKER**

Dr., Sivas Cumhuriyet University, Department of Environmental Engineering, Sivas-Türkiye

(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-0332-7434

Meltem SARIOĞLU CEBECİ

Prof. Dr., Sivas Cumhuriyet University, Department of Environmental Engineering, Sivas-Türkiye

ORCID: 0000-0002-3636-0388

Özet

İklim değişikliği, karbon emisyonlarının artışı ve çevresel sorunlar nedeniyle fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına yönelik çalışmalar yeni enerji teknolojilerinin benimsenmesi açısından destekleyici olmaktadır. Temiz enerjiye yönelik artan talep ve aynı zamanda bu enerji kaynaklarının maliyetindeki düşüş nedeniyle yeni enerji teknolojilerine yapılan yatırım seviyesi, sürdürülebilirliğe ve iklim değişikliğiyle mücadeleyle yönelik küresel bir dönüşümü yansıtabilecek şekilde kayda değer ölçüde artırılmıştır. Bu teknolojiler arasında batarya, fotovoltaik paneller, rüzgâr, ısı pompaları bulunmaktadır ve özellikle batarya ile fotovoltaik panellere son yıllarda artan bir talep yaşamaktadırlar. Büyüme açısından bakıldığında, katkı çok daha belirgindir – 2023 yılında, yalnızca temiz teknoloji imalatı, küresel GSYİH büyümesinin yaklaşık %4'ünü ve küresel yatırım büyümesinin ise yaklaşık %10'unu oluşturmuştur. Yeni enerji endüstrilerinin hızla geniş bir kullanım alanına kavuşması sonucunda bu teknolojilerin üretimi ve operasyon süreçlerini sırasında ortaya çıkan atıksu miktarı ve bu atıksuyun deşarjı da önemli bir sorun haline getirmiştir. Bu atıksuların bileşimi oldukça değişkendir ve ağır metaller, toksik organik bileşikler, asitler vd. bir dizi kirletici içermektedir. Bu çalışmada yeni enerji teknolojilerinden olan batarya ve fotovoltaik panel üretimi aşamasında ortaya çıkan atıksularının içeriği, arıtılmasına ve su ile kaynakların geri kazanımına yönelik membran teknolojilerine özel gelişmeler ve güncel çalışma örnekleri incelenecektir.

Keywords: Membran, yeni enerji teknolojileri, atıksu, batarya, fotovoltaik panel**Giriş**

İklim değişikliğinin hafifletilmesine ve çevrenin korunmasına yönelik çalışmalar, yeni ve temiz enerji teknolojilerinin giderek daha yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Teknolojik imkanların gelişmeye ve iyileşmeye devam etmesi ile birlikte yeni enerji ve depolama sistemlerinin üretimiyle ilişkili olan maliyetlerde ciddi düşüşler yaşanmaktadır. Böylece hem işletmeler hem de bireysel tüketiciler için bu enerji kaynaklarının uygulanabilirliği ve cazibesi artarak potansiyel bir seçenek olarak uygunluğu artmıştır. Ülkeler fosil yakıtlara olan bağımlılıklarını azaltmak ve sürdürülebilir bir gelecek için yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz enerji teknolojilerinin kullanımını kolaylaştıran politikalar uygulamaktadır. Bunlar arasında vergi teşvikleri, sübvansiyonlar ve enerjinin belirli bir yüzdesinin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi zorunlulukları yer almaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda yenilenebilir enerjinin 2030 yılı için üç katına çıkarılması hedefi belirlenmiştir.

Enerji dönüşümü sadece yenilenebilir kaynaklarla değil, aynı zamanda batarya üretimi gibi gelişmiş depolama çözümleriyle de desteklenmektedir. Fotovoltaik güneş paneli (PV) ve batarya üretimi, yenilenebilir enerji sektörünü destekleyen başlıca kollarıdır. PV imalatına yapılan yatırım 2023'te 80 milyar ABD Doları civarında olup iki kattan fazla artarken, batarya imalatına yapılan yatırım ise yaklaşık %60 artışla 110 milyar ABD Doları'na yükselmiştir. 2024 yılında fotovoltaik sistemlerin üretimi iki katından fazla olacak şekilde artış gösterirken, batarya üretiminde %60 artış olmuştur. Toplam yeni yatırımların %95'i bu iki endüstriye odaklanmaktadır. ("Advancing Clean Technology Manufacturing Abstract: An Energy Technology Perspectives Special Report," n.d.)

Tabi bununla birlikte yeni enerji teknolojilerinin üretim endüstrilerindeki kapasite büyümesi sonucunda atıksu oluşumu ve deşarj miktarlarından ciddi artışlar olmaktadır. Bu atıksuların deşarjı, karmaşık yapıları, potansiyel sağlık ve çevresel etkileri nedeniyle küresel bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bileşimlerinin karmaşık ve değişken olması, ağır metaller, toksik organik kimyasallar, asitler ve radyoaktif kimyasallar olmak üzere birçok kirletici içermesi nedeniyle spesifik önlemlerin alınmasını gerektirmektedirler. Bu atıksu insan sağlığı ve çevre için ciddi bir tehdit konumundadır.

Bataryalar

Bataryalar küresel ölçekte vazgeçilmez bir bileşendir ve son zamanlarda ulaşım sektöründeki kullanımının artmasıyla birlikte daha da önemli bir hale gelmiştir. Lityum-iyon bataryalar (LİB) birçok uygulama alanında yüksek enerji yoğunluğu, güvenilirlik, yüksek çıkış voltajı, hızlı şarj olabılme, enerjiyi koruması, uzun kullanım ömrü ve hafifliği gibi birçok avantajı nedeniyle tercih edilmektedir. LİB sistemleri tipik olarak anot, katot, atım toplayıcılar, ayırıcılar, elektrolit, termal yönetim sistemi vb. birimlerden oluşur. Anot genellikle polivinil florür (PVDF) gibi bir polimerle bağlanmış grafitten oluşmaktadır. Katot ise aktif malzeme olarak lityum ile ara katman oluşturmuş geçiş metalleri oksitlerinden, alüminyum folyo gibi toplayıcı, karbon iletken maddeler ve PVDF gibi polimer bağlayıcılardan meydana gelir. Metal oksitlere örnek olarak lityum-Kobalt Oksit (LCO), Lityum-Demir Fosfat (LFP), Lityum-Nikel-Mangan-Kobalt oksit (NMC), Lityum-Mangan oksit (LMO), Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum Oksit (NCA) verilebilir. LCO yüksek özgül kapasite sunmasına rağmen, maliyetlidir ve yüksek sıcaklıklarda işlenmesi daha az güvenlidir. LMO ve LFP bataryalar, toksik metaller içermemeleri nedeniyle çevresel açıdan en az kritik olanlar olarak kabul edilir. Ayrıca, LFP, uzun döngü ömrü ve gelişmiş güvenlik özellikleri sayesinde büyük formatlı bataryalar için oldukça uygundur. Günümüzde NMC, enerji yoğunluğu ve dayanıklılık arasında en uygun dengeyi sunması nedeniyle elektrikli araçlarda kullanılan en yaygın lityum-iyon bataryalardır. Artan nikel yüzdesi daha yüksek bir kapasite sağlar, ancak bu durum istenmeyen bir kararsızlıkla birlikte gelir. Tersine, yüksek mangan yüzdesi, lityum iyonunun ara katmana giriş ve çıkışı sırasında yapısal kararlılığın artmasına katkıda bulunurken maliyetleri de düşürür. 2010 yılında Lityum-iyon bataryaların maliyeti 1220 USD/kWh seviyesindeyken günümüzde 100 USD/kWh seviyesine düşmüştür. (Bai et al., 2020; Kim et al., 2016; Kumar et al., 2023; Raugei and Winfield, 2019; Sharmili et al., 2023; Yu et al., 2023, 2023)

Bir diğer sıklıkla kullanılan batarya türü kurşun-asit bataryalardır (LABs) ve anot olarak Pb, katot olarak PbO₂ ve de elektrolit olarak H₂SO₄'ten oluşmaktadırlar. Hafif elektrikli araçlarda, bilişim ve iletişim teknolojilerde, güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere birçok enerji endüstrisi türünde düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir. Fakat düşük şarj durumu (SoC), yetersiz şarj, düzensiz şarj ve aşırı akım gibi konularda dayanıklılığı azdır ve bataryanın ömrü ve performansı lityum-iyon bataryalara göre azdır. (Vangapally et al., 2023)

Batarya üretim atıksuları

Batarya üretim prosesinde ağır metaller, asitler ve organik çözücüler başta olmak üzere tehlikeli kirlilik içeren büyük miktarda atıksu ortaya çıkmaktadır. Lityum iyon batarya üretiminde ve prosesle ilişkili safsızlaştırma, teçhizat temizleme vd. işlemlerden kaynaklanan karbon tozları, ağır metaller, amonyum, N-metil pirolidon ve lipidler oluşmaktadır. Bu kompleks atıksu düşük biyo-bozunurdur ve yüksek toksisiteye sahiptir. Canlı sağlığı için tehlikelidir. Kurşun-asit batarya üretiminde ise yüksek hacimde su, taşıma ve temizleme amacıyla kullanılmakta ve Dünya Sağlık Örgütünün izin verilen limitinin bin katı kadar yüksek konsantrasyonlarda kurşun iyonu (15 mg/L) içerebilmektedir. Ayrıca özellikle lityum-iyon bataryaların son yıllardaki kullanımının yüksek seviyede artması nedeniyle, kullanım ömürlerinin sona erecekleri bir sonraki on yıl içerisinde giderek artan miktarda atık bataryanın ortaya çıkacağını da unutmamak gerekmektedir. 2030 yılı için küresel olarak 11 milyon ton atığın ortaya çıkacağı tahmin edilmektedir. Bunun %40 kadarı lityum, kobalt, magnezyum, nikel gibi aktif katot malzemeler olacaktır ve ticari olarak geri dönüşümü değerli olacaktır. Fakat günümüzde atık lityum iyon bataryaların sadece %5'i geri dönüştürülmektedir. (Z. Chen et al., 2022; Gebreslassie et al., 2025; Yi et al., 2022)

Batarya üretiminden kaynaklanan atıksuların arıtımında buharlaştırma, elektrokoagülasyon, adsorpsiyon, biyoremediasyon, kimyasal çöktürme, iyon değişimi ve membran teknolojileri kullanılmaktadır. Membran teknolojisi, atıksudaki kirliticileri gidermenin yanında değerli metalleri ve diğer yan ürünlerin geri kazanılmasına da olanak sağlamaktadır. Esnek bir teknolojidir ve farklı birçok duruma uygun şekilde işletilebilir. Ters osmoz (RO), nanofiltrasyon (NF), ultrafiltrasyon (UF), ileri osmoz (FO), membran distilasyonu (MD), elektrodializ (ED) veya bunların hibritleri gibi farklı membran türleri arıtım ve geri kazanımda kullanılabilir. (He et al., 2021; Hu et al., 2024; Naidu et al., 2020; Torres et al., 2021)

UF membranları sahip oldukları gözenek boyutları nedeniyle kurşun-asit batarya üretiminden kaynaklanan Pb^{2+} gibi metal katyonlarını tutmada yetersiz olsa da nanomalzemelerle veya organik polimerlerle oluşturulan yapılarla veya membran modifikasyonları ile başta tutma verimi olmak üzere su akısı miktarı, tıkanma direnci, por yapısı ve tıkanmaya karşı membran özelliklerinin geliştirilmesi ile performansı artırılabilir. (Xu et al., 2020) PVDF membrana kovalent organik framework entegre ederek %92,4 Pb^{2+} giderim verimi elde etmiş ve aynı zamanda membranın tıkanmaya karşı direncinde ciddi artış gözlemlemiştir. (Ravishankar et al., 2018), %1'lik grafen oksit (GO) karışımı ile polisülfon (PSf) membranı 1-methyl-2-pyrrolidone (NMP)'i çözücü olarak kullanarak ile modifiye etmiş ve %98'lik bir Pb^{2+} tutma verimliliği ve 1 bar gibi düşük bir basınçta $43,62 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 'lik bir süzüntü akısı elde etmiştir.

NF membranları 300-500 Da molekül ağırlığına sahip çözünmüş maddelerin ayrılmasını sağlayacak seviyede membranlardır. Birçok tek ve çok değerlikli iyonları tutabilmektedir. (Wang et al., 2021) çalışmada lityum-iyon batarya atıksularından lityum ve magnezyum geri kazanımı için bakır koordineli NF membran üretilmiş ve bu membranla yüksek su geçirgenliği (1 barda $16,2 \text{ Litre/m}^2/\text{h}$) ve yüksek Li^+/Mg^{2+} selektivitesi (8 ± 1) elde etmiştir. Ayrıca çalışmada pH 3'te %90 Mg^{2+} ve %30 civarında Li^+ tutulum potansiyelini ortaya koymuştur. Uyguladığı yöntemde NF'nin yüksek miktarda lityum geri kazanımı için süzüntüye ek işlem uygulanması gerekli olduğu görülmektedir. (Jeong et al., 2025) lityum-iyon batarya atıksuyundan Li^+ geri kazanımı için NF membranı ile birlikte karbon nanotüpleri içeren spacer ile membran distilasyon kristalizasyonunu (MDC) beraber kullanmıştır. Bu şekilde 3-5 bar arasında %80 üzerinde sodyum ve sülfat iyonu giderimi ve membran üzerinde kirlilik oluşmadan lityum kristalizasyonu sağlamıştır. Karbon nanotüp spacer katman ile %71,22 Li^+ saflığına ulaşmışlardır. İşlem NF ile birleştirildiğinde, sadece MDC uygulamasına göre lityum saflığında %244 artış gerçekleştirmiştir ve NF-MDC işleminin yüksek saflıkta lityum kristalleri geri kazanımı konusunda efektif bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir.

(Ravishankar et al., 2018) grafen oksit (GO) ile eksfoliye hidrotalsit (EHT) karışımını poliethersülyon (PES) membranı modifiye etmiş ve gerçek bir batarya endüstrisi atıksuyundan ön arıtma olmaksızın 0,8 MPa basınç ve 100 L/h akış hızında %94,63 Pb²⁺ giderimi elde etmiştir. Membranın özellikle Pb²⁺ iyonlarını selektif şekilde reddettiğini bildirmiştir.

İleri ozmoz (FO) bir diğer membran tekniğidir fakat daha önce gösterilenlerden farklı olarak itici güç olarak basınç uygulamak yerine; besleme ve çekme çözeltileri arasındaki osmotik basınç farkından yararlanır. Bu tekniğin membran kirlenmesi, selektivite, enerji gereksiniminin minimal olması ve basit membran temizliği gibi avantajları bulunmaktadır. İleri ozmozun potansiyeli, çekme çözeltileri ile ciddi şekilde ilgilidir. Genellikle NH₄HCO₃, NaCl, ve MgCl₂ gibi ticari opsiyonlar kullanıldığı gibi iyonik sıvılardan oluşan sentetik bileşikler, hidrojel ve vd. üzerine bir çok çalışma bulunmaktadır (Ibrar et al., 2020; Reddy et al., 2023; Zhang et al., 2024). Örneğin (R. Chen et al., 2023), lityum-iyon batarya (LiCoO₂) atıksuyundan Co²⁺ giderimi için kobalt bazlı bir çekme solüsyonu (Co-Bet-Tf₂N) geliştirmiş ve yapıda bulunan -NMe³⁺ gruplarının oluşturduğu yüksek osmotik basıncın geleneksel NaCl ve MgCl₂ çekme solüsyonlarına göre %232 ve %174 daha verimli su transferi sağladığını bildirmiştir. Yine (R. Chen et al., 2022) bir başka çalışmada lityum-iyon batarya atıklarından elde edilen atık iyonik sıvı ([Hbet][Tf₂N]) ve Li₂CO₃'ü çekme solüsyonu (Li-Bet-Tf₂N) olarak kullanarak, bu endüstriden gelen Li⁺'ı FO filtrasyonla ayırmıştır. 2000 mg/L Li⁺ içeren atıksuyu 12 saat gibi bir sürede ayırmıştır. Daha sonra Li-Bet-Tf₂N'in solvent ekstraksiyonu ile sudan kolaylıkla ayrılarak geri kazanıldığını bildirmiştir. (Zhang and Ge, 2024) ömrünü tamamlamış lityum-iyon batarya atıklarından ortaya çıkan organofosfor içeren atıksuyu, ürettikleri pH-duyarlı çinko kompleksi (ZnATMP-iNa) ile FO membranında arıtmıştır. 0,6 M ZnATMP-3Na ile 12,7 LMH'lik bir su akışı elde etmiştir ve bu değer NaCl'ya göre %136 daha yüksektir. Ayrıca 0,015 g/L'lik bir çözünen kaybı yaşanmıştır ki bu da NH₄HCO₃'ün için olan kayıptan (0,83 g/L) daha düşüktür.

Elektrodiyaliz (ED), bir dizi katyon değişim membranları ile anyon değişim membranlarının elektrotlar arasında dizildiği bir membran uygulamasıdır. Özellikle deniz suyunun tuzdan ayrılması olmak üzere endüstriyel atıksu arıtımında ve organik asit üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Jiang et al., 2024; Kabir et al., 2024). Wu et al., 2023, çalışmada lityum batarya geri dönüşüm faaliyetlerinden kaynaklanan atıksulardan Ni²⁺ ve H₂SO₄'ü ayırmak ve geri kazanmak için sırasıyla difüzyon diyaliz (DD) ve elektrodiyaliz (ED) uygulamıştır. DD'de Ni²⁺ ve H₂SO₄ için sırasıyla %75,96 ve %97,31 reddetme oranı elde etmiştir. ED prosesinde ise DD'den çıkan H₂SO₄'ü iki aşamada 43,1 g/L'den 150,2 g/L'ye konsantre ederek her iki kirleticinin de endüstride tekrar kullanılabilir olduğunu belirtmiştir.

Fotovoltaik paneller ve üretim atıksuları

Güneş enerjisi, özellikle temiz ve güvenli olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında en hızlı büyüyen enerji kaynağı konumundadır. Kümülatif fotovoltaik (PV) kurulu kapasite 2000 yılı için 1,28 GW iken, 2020 yılında 709,67 GW ve 2024 yılında 2.2 TW'a ulaşmıştır (Casey, 2025; Min et al., 2023; Sah et al., 2022). Kristal silikon, thin film, organik ve perovskit güneş pili çeşitli teknoloji türleri bulunmaktadır. Özellikle son 5 yılda kurulan kapasitenin %95'i kristal silikon teknolojisine sahip fotovoltaik paneller olmuştur. Bir kristal silikon güneş paneli genellikle alüminyum çerçeve, temperli cam, solar hücreleri bir arada tutan eliten vinil asetat (EVA) polimerik tabaka, bağlantılar ve polimer bir destek levhasından oluşmaktadır. Ayrıca bağlantı elemanı olarak gümüş ve alüminyum; wafer formunda silikon, kabloların bağlantılarında bakır, kurşun, kalay gibi elementler kullanılmaktadır. Silikon bazlı panellerin üretiminde; temizleme, dağlama ve kaplama gibi üretim aşamalarında, ortaya çıkan atıksu içerisinde ağır metaller (özellikle kadmiyum, kurşun ve krom), silikon dioksit, yüksek konsantrasyonda florür iyonu, asitler, nitrat ve organik çözücüler bulunmaktadır. İmalat prosesinde soğutma, durulama, temizleme başta olmak üzere birçok aşamada yüksek miktarda su kullanımı söz konusudur. Ayrıca çok miktarda askıda katı içermektedir. Giderek

artan talep, ortaya çıkan atıksu hacminin de artmasına neden olmaktadır. Ayrıca panellerin ömrü limitlidir. 25-30 yıl sonra paneller ömrünü tamamlamaktadır. Bu da 21. yy'ın başında kurulan sistemlerin ömrünü yakında tamamlayacağı ve ciddi bir atık panel oluşturması beklenmektedir. Öngörülen atık panel miktarının 2050 yılı için 60-78 milyon ton olacağı bildirilmektedir (Gebreslassie et al., 2025; Sah et al., 2022).

Fotovoltaik panel üretim atıksuları

Daha önce bahsedildiği gibi PV sektörünün çok büyük bir bölümü birinci hammadde olarak silikon kullanmaktadır. Proses önemli miktarda su tüketmektedir ve hidrojen florit, askıda katılar, asitler, SiO₂, nitratlar ve çeşitli oksitleri içeren karışık bir atıksu oluşmaktadır. Hem wafer dağlama işleminde hem de kuvars temizlemede hidroflorik asit kullanılmaktadır. Bunun sonucunda 500-2000 mg/L seviyelerinde florür konsantrasyonuna sahip bir atıksu ortaya çıkmaktadır. Bu yüksek toksisiteye sahip suyun arıtımında kimyasal çöktürme, nötralizasyon, sedimentasyon ve filtrasyon birincil arıtma yöntemi olarak kullanılmaktadır. Özellikle kireç bazlı çöktürme florür gideriminde ekonomik bir yöntemdir. Fakat atıksuyun sertliği artmakta ve düşük kalite çamur ortaya çıkmaktadır. Bu çamuru susuzlaştırmak kireç kullanımı ile ortaya çıkan CaF₂'nin ince yapısı nedeniyle zordur. Ortaya çıkan atıksuyu, su kalite standartlarına uygun hale getirmek için ek giderim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Membran filtrasyonu güneş paneli de dahil olmak üzere birçok yarıiletken atıksularını arıtma konusunda potansiyeli yüksek bir teknolojidir. Ek kimyasal katkısına gerek olmadan yüksek kalitede süzüntü suyu üretir ve hem yeniden kullanım hem de geri kazanım için kullanılabilir (L. Chen et al., 2023; Drouiche et al., 2013; Sim et al., 2023).

Won et al., 2012, çalışmasında yarıiletken üretiminde wafer ve kuvars tüplerin dağlanması ve temizlenmesinde kullanılan hidroflorik asidin arıtılmasında ön arıtma sonrasında ters ozmoz membran kullanmış ve bunu çeşitli koagülanların kullanıldığı çökeltme ile karşılaştırmıştır. 15 mg/L florit girişine sahip atıksuyu koagülanlar ile 1 mg/L'nin altına indirmiş olsa da kullanılan kimyasal miktarının fazlalığı ve ortaya çıkan çamur miktarı nedeniyle ekonomik olmadığı bildirilmiştir. Spiral sarımlı selüloz RO membranları ise floriti 0,2 mg/L'ye indirerek göreceli olarak daha iyi sonuç ortaya koymuştur. Lee et al., 2024, yarı iletken wafer üretiminde yüzeylerinin parlatılması aşamasında oluşan atıksuyu, ki içerisinde çözünmüş silika, organik bileşenler ve nitrat bulunmaktadır, iki aşamalı bir teknikle arıtmıştır. Öncelikle elektro koagülasyon ile kirlilikleri floklara adsorbe edilmiş ardından seramik MF ve NF membranlarına vermiştir. MF'nin çözünmüş silikayı giderebildiğini, NF'nin ise organik ve nitrat bileşiklerini giderdiğini bildirmiştir. Xiong et al., 2024, ise çalışmasında kimyasal yüzey parlatma atıksularının RO ile arıtılabileceğini fakat atıksudaki çözünmüş silikanın sıklıkla membranı tıkanıldığını bu nedenle hibrit koagülasyon-UF sistemini ön arıtım olarak kullanmayı ortaya koymuşlardır. Koagülasyon-UF sisteminin %98,62 oranında silikayı ayırabildiğini bildirmişlerdir. Böylece RO'ya binen yük azalmış ve akı miktarı ve membran ömrü artmıştır. Belkade et al., 2024, ise PV hücrelerinin yıkanması aşamasından kaynaklanan florit ve nitratin giderimi için elektrodializ kullanmıştır. Florit için 15 dk arıtma süresinde 140 mg/L, nitrat için 33 dk arıtma süresinde 1000 mg/L giriş derişimindeki sentetik suyu arıttığı bildirilmiştir. Nitrat gideriminde floritin varlığının arıtma süresini etkilemediği fakat florit gideriminde nitrat varlığının arıtma süresini 15 dk'da 53 dk'ya yükselttiği bildirilmiştir. Su et al., 2014, wafer yüzeyinin parlatılması aşamasından gelen ve genellikle çamur partikülleri ve metal kalıntıları içeren atıksulardan suyun geri kazanılması için bir UF-ED prosesi hibriti kullanmıştır. Partikül giderim verimini %99,7'nin üzerinde olduğunu ve bu değer giriş partikül konsantrasyonundan bağımsız olduğunu, fakat giriş partikül konsantrasyonunun membran tıkanmasını arttırdığını bildirmiştir. Cu²⁺ giderimi ise 3h reaksiyon süresi ve 1,5 V/cm alan şiddetinde %99,3'ün üzerinde ve katyon değişim membranına adsorpsiyon yoluyla olmuştur. Adsorbe olan Cu²⁺ ise %3 w/w HCl ile kolaca ekstrakte edilerek geri kazanılmıştır.

Sonuç

Son yıllarda temiz enerjine olan talebin giderek artması ve bu talebin büyük bir kısmının batarya ve fotovoltaik paneller üzerine olması nedeniyle bu iki endüstriden kaynaklanan kirlilikler ve bu kirliliklerin membran sistemleri ile arıtımı ile ilgili çalışmalar değerlendirilmiştir. Görülmektedir ki bu endüstrilerin atıksuları kolaylıkla arıtılmakta, değerli metaller ve su geri kazanılabilmektedir. Özellikle de membran sistemlerinin pratikte karşılaştığı tıkanma gibi sorunları azaltacak konfigürasyonlar ve proses modifikasyonlarındaki son çalışmalar değerlendirildiğinde; geçirgenlik, seçicilik, kirlenmeye karşı direnç ve dayanıklılık dahil olmak üzere performans parametrelerinde kayda değer gelişmeler ortaya konmaktadır.

Kaynaklar

Advancing Clean Technology Manufacturing Abstract: An Energy Technology Perspectives Special Report, n.d.

Bai, Y., Muralidharan, N., Sun, Y.-K., Passerini, S., Stanley Whittingham, M., Belharouak, I., 2020. Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: Concept of Battery Identity Global Passport. *Materials Today* 41, 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.001>

Belkada, F.D., Kitous, O., Bouchelaghem, O., Drouiche, N., Hecini, M., Mameri, N., 2024. Electrodialysis for fluoride and nitrate removal from synthesized photovoltaic industry wastewater-toward high performance experimental parameters. *Chemical Engineering Research and Design* 204, 585–590. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.03.008>

Casey, J.P., 2025. IEA: World reaches 2.2TW of cumulative installed solar capacity. *PV Tech*. URL <https://www.pv-tech.org/iea-world-reaches-2-2tw-cumulative-installed-solar-capacity/> (accessed 9.29.25).

Chen, L., Ding, C., Liu, B., Lian, J., Lai, L., Yuan, L., Wang, R., 2023. A Promising Process to Remove Nitrate from Solar Panel Production Wastewater and Meanwhile Generating Electricity. *Water* 15, 3347. <https://doi.org/10.3390/w15193347>

Chen, R., Dong, X., Ge, Q., 2022. Lithium-based draw solute for forward osmosis to treat wastewater discharged from lithium-ion battery manufacturing. *Front. Chem. Sci. Eng.* 16, 755–763. <https://doi.org/10.1007/s11705-022-2137-3>

Chen, R., Qiu, F., Meng, Q.-W., Chung, T.-S., Ge, Q., 2023. A cobalt-based forward osmosis draw solute synthesized from lithium-ion battery wastes for cobalt-containing wastewater purification. *Desalination* 548, 116279. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116279>

Chen, Z., Wei, Wenfei, Zou, W., Li, J., Zheng, R., Wei, Ni, B.-J., Chen, H., 2022. Integrating electrodeposition with electrolysis for closed-loop resource utilization of battery industrial wastewater. *Green Chem.* 24, 3208–3217. <https://doi.org/10.1039/D1GC04891K>

Drouiche, N., Djouadi-Belkada, F., Ouslimane, T., Kefaifi, A., Fathi, J., Ahmetovic, E., 2013. Photovoltaic solar cells industry wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment* 51, 5965–5973. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.763217>

Gebreslassie, G., Desta, H.G., Zhang, Jianjian, Lin, B., Dong, Y., Yan, W., Zhang, Jiujun, 2025. Advanced membrane materials/structures and technologies for new energy production wastewater treatment and resource recovery. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 166, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2025.101040>

- He, J., Jia, Y., Yan, R., Wang, M., 2021. An electrodialysis-based coupling technique for simultaneous reclamation of waste acid and cleaner production of organic acid. *Journal of Membrane Science* 638, 119683. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119683>
- Hu, M., Kumagai, K., Gonzales, R.R., Chiao, Y.-H., Guan, K., Kawakatsu, T., Matsuyama, H., 2024. Isopropanol concentration by osmotically assisted reverse osmosis. *Journal of Membrane Science* 697, 122581. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122581>
- Ibrar, I., Altaee, A., Zhou, J.L., Naji, O., Khanafer, D., 2020. Challenges and potentials of forward osmosis process in the treatment of wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 50, 1339–1383. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1657762>
- Jeong, Seongeom, Jeong, H., Park, C., Gu, B., Jeong, Sanghyun, 2025. Effective lithium recovery from battery wastewater via nanofiltration and membrane distillation crystallization with carbon nanotube spacer. *Chemical Engineering Journal* 503, 158315. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158315>
- Jiang, D., Xu, R., Bai, L., Wu, W., Luo, D., Li, Z., Asahi, T., Mai, Y., Liu, Z., Yamauchi, Y., Xu, X., 2024. Insights into electrochemical paradigms for lithium extraction: Electrodialysis *versus* capacitive deionization. *Coordination Chemistry Reviews* 516, 215923. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215923>
- Kabir, M.M., Sabur, G.Md., Akter, Mst.M., Nam, S.Y., Im, K.S., Tijing, L., Shon, H.K., 2024. Electrodialysis desalination, resource and energy recovery from water industries for a circular economy. *Desalination* 569, 117041. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117041>
- Kim, H.C., Wallington, T.J., Arsenault, R., Bae, C., Ahn, S., Lee, J., 2016. Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis. *Environ. Sci. Technol.* 50, 7715–7722. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00830>
- Kumar, R., Chakraborty, S., Chakraborty, P., Nayak, J., Liu, C., Ali Khan, M., Ha, G.-S., Ho Kim, K., Son, M., Roh, H.-S., Tripathy, S.K., Jeon, B.-H., 2023. Sustainable recovery of high-valued resources from spent lithium-ion batteries: A review of the membrane-integrated hybrid approach. *Chemical Engineering Journal* 470, 144169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144169>
- Lee, J., So, Y., Kim, S., Yoon, Y., Rho, H., Park, C., 2024. Efficient integration of electro-coagulation and ceramic membranes for the treatment of real chemical mechanical polishing (CMP) slurry wastewater from the semiconductor industry. *Journal of Water Process Engineering* 61, 105326. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105326>
- Min, R., Li, K., Wang, D., Xiao, W., Liu, C., Wang, Z., Bian, S., 2023. A novel method for layer separation of photovoltaic modules by using green reagent EGDA. *Solar Energy* 253, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.02.024>
- Naidu, G., Tijing, L., Johir, M.A.H., Shon, H., Vigneswaran, S., 2020. Hybrid membrane distillation: Resource, nutrient and energy recovery. *Journal of Membrane Science* 599, 117832. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117832>
- Raugei, M., Winfield, P., 2019. Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles. *Journal of Cleaner Production* 213, 926–932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.237>
- Ravishankar, H., Christy, J., Jegatheesan, V., 2018. Graphene Oxide (GO)-Blended Polysulfone (PSf) Ultrafiltration Membranes for Lead Ion Rejection. *Membranes* 8, 77. <https://doi.org/10.3390/membranes8030077>

- Reddy, A.S., Wanjari, V.P., Singh, S.P., 2023. Design, synthesis, and application of thermally responsive draw solutes for sustainable forward osmosis desalination: A review. *Chemosphere* 317, 137790. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137790>
- Sah, D., Chitra, Kumar, S., 2022. Recovery and analysis of valuable materials from a discarded crystalline silicon solar module. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 246, 111908. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111908>
- Sharmili, N., Nagi, R., Wang, P., 2023. A review of research in the Li-ion battery production and reverse supply chains. *Journal of Energy Storage* 68, 107622. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107622>
- Sim, J., Lee, J., Rho, H., Park, K.-D., Choi, Y., Kim, D., Kim, H., Woo, Y.C., 2023. A review of semiconductor wastewater treatment processes: Current status, challenges, and future trends. *Journal of Cleaner Production* 429, 139570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139570>
- Su, Y.-N., Lin, W.-S., Hou, C.-H., Den, W., 2014. Performance of integrated membrane filtration and electrodialysis processes for copper recovery from wafer polishing wastewater. *Journal of Water Process Engineering* 4, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.012>
- Torres, J.J., Cuello, M., Ochoa, N.A., Pagliero, C., 2021. Biodiesel wastewater treatment using nanofiltration membranes. *Process Safety and Environmental Protection* 148, 825–833. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.013>
- Vangapally, N., Penki, T.R., Elias, Y., Muduli, S., Maddukuri, S., Luski, S., Aurbach, D., Martha, S.K., 2023. Lead-acid batteries and lead–carbon hybrid systems: A review. *Journal of Power Sources* 579, 233312. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233312>
- Wang, L., Rehman, D., Sun, P.-F., Deshmukh, A., Zhang, L., Han, Q., Yang, Z., Wang, Z., Park, H.-D., Lienhard, J.H., Tang, C.Y., 2021. Novel Positively Charged Metal-Coordinated Nanofiltration Membrane for Lithium Recovery. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 13, 16906–16915. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02252>
- Won, C.-H., Choi, J., Chung, J., 2012. Evaluation of optimal reuse system for hydrofluoric acid wastewater. *Journal of Hazardous Materials, Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment systems* 239–240, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.004>
- Wu, S., Zhu, H., Wu, Y., Li, S., Zhang, G., Miao, Z., 2023. Resourceful Treatment of Battery Recycling Wastewater Containing H₂SO₄ and NiSO₄ by Diffusion Dialysis and Electrodialysis. *Membranes* 13, 570. <https://doi.org/10.3390/membranes13060570>
- Xiong, J., Ma, R., Tian, Y., Yang, L., He, Y., Qian, J., Wu, W., Gao, Y., Luo, J., Xu, D., Shen, J., 2024. Improvement of Coagulation and Membrane Filtration Performance in Hybrid Coagulation-UF-RO System for Chemical Mechanical Polishing Wastewater Treatment: Effect of Coagulants. *Water Air Soil Pollut* 235, 505. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07319-7>
- Xu, W., Sun, X., Huang, M., Pan, X., Huang, X., Zhuang, H., 2020. Novel covalent organic framework/PVDF ultrafiltration membranes with antifouling and lead removal performance. *Journal of Environmental Management* 269, 110758. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110758>
- Yi, J., Liao, J., Bai, T., Wang, B., Yangzom, C., Ahmed, Z., Mehmood, K., Abbas, R.Z., Li, Y., Tang, Z., Zhang, H., 2022. Battery wastewater induces nephrotoxicity via disordering the mitochondrial dynamics. *Chemosphere* 303, 135018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135018>

Yu, W., Guo, Y., Xu, S., Yang, Y., Zhao, Y., Zhang, J., 2023. Comprehensive recycling of lithium-ion batteries: Fundamentals, pretreatment, and perspectives. *Energy Storage Materials* 54, 172–220. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.10.033>

Zhang, J., Ge, Q., 2024. Recycling scale inhibitor wastes into pH-responsive complexes to treat wastewater produced from spent lithium-ion battery disposal. *Water Research* 260, 121939. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121939>

Zhang, L., Sun, X., Wu, S., 2024. A comprehensive review of responsive draw solutes in forward osmosis: Categories, characteristics, mechanisms and modifications. *Desalination* 583, 117676. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117676>

**INNOVATIVE OSMOTIC MEMBRANES (IOMS): CURRENT APPROACHES IN
RESOURCE AND ENERGY RECOVERY****YENİLİKÇİ OZMOTİK MEMBRANLAR (İOMS): KAYNAK VE ENERJİ GERİ
KAZANIMINDA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR****Meltem SARIOĞLU CEBECİ**Prof. Dr., Sivas Cumhuriyet University, Department of Environmental Engineering, Sivas-Türkiye
(Responsible Author) ORCID: 0000-0002-3636-0388**Berk KÖKER**Dr., Sivas Cumhuriyet University, Department of Environmental Engineering, Sivas-Türkiye ORCID: 0000-
0002-0332-7434**ABSTRACT**

Due to the increasing environmental problems caused by the consumption of fossil fuels, particularly global warming, the orientation toward sustainable energy sources such as wind, solar, tidal, nuclear, and hydrovoltaic energy has been steadily increasing. However, most of these methods depend on a specific driving energy input—such as light, wind, heat, electromagnetic oscillation, or mechanical motion—and are therefore reliant on the natural environment, frequently being affected by dynamic conditions. On the other hand, water is one of the largest energy carriers on Earth. Osmotic energy, or salinity gradient-based power generation, emerges as a natural energy source with immense potential and significant prospects for development. Therefore, research aimed at developing simple and efficient methods to convert osmotic energy into electricity has gained increasing importance in recent years. In this study, recent works on the utilization of innovative osmotic membranes (IOMs) in both direct and indirect energy production—taking advantage of the benefits of osmotic energy—are reviewed. Particular emphasis is placed on studies concerning the fabrication or modification of new membranes to overcome one of the most critical challenges in this field, namely the inefficiency of existing membranes.

ÖZET

Fosil yakıtların tüketiminin başta küresel ısınma olmak üzere giderek daha fazla çevresel sorunlara neden olması nedeniyle rüzgâr, güneş, gelgit, nükleer, hidrovoltajik vb. sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim giderek artmaktadır. Fakat bu yöntemlerin çoğu ışık, rüzgâr, ısı, elektromanyetik salınım, manyetik hareket gibi belirli bir itici enerji girdisine, yani doğal çevreye bağımlıdır. Dinamik koşullardan sıklıkla etkilenmektedirler. Diğer taraftan dünyadaki en büyük enerji taşıyıcılarından biri sudur. Ozmotik enerji veya tuzluluk gradyanı kaynaklı enerji üretimi, yüksek gelişim potansiyeli taşıyan çok büyük bir potansiyele sahip bir doğal enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, ozmotik enerjiyi elektriğe dönüştürmenin basit ve verimli bir yolunun geliştirilmesine yönelik çalışmalar son zamanlarda önem kazanmaktadır. Bu çalışmada osmotik enerjinin avantajlarından yararlanarak hem doğrudan hem de dolaylı olarak enerji üretiminin sağlanmasında yenilikçi ozmotik membranların (YOM)/(İOMS) kullanılmasına yönelik son yıllarda yapılan çalışmaları; özellikle de bu enerjinin kullanımındaki en önemli sorunlardan biri olan mevcut membranların verimsizliğini aşmak üzere yeni ozmotik membranların üretilmesi veya modifiye edilmesi ile ilgili çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar derlenmiştir.

Keywords: İOMS, osmotik enerji, sürdürülebilir enerji

Giriş

Osmotik enerji, tuzluluk oranları farklı iki su kütlesi -örneğin, deniz suyu ile nehir suyu- karıştığında ortaya çıkan enerji potansiyelini ifade eder ve yenilenebilir bir kaynak olarak değerlendirilir. Bu teknikte, düşük konsantrasyonlu bir çözelti, daha konsantrasyonlu ve basınçlandırılmış bir çözeltiden yarı geçirgen bir membran kullanarak ayrılır. Bu noktada membranın iki tarafı da farklı tuz konsantrasyonlarına sahip olduğundan taraflar arasındaki denge ya suyun ya da çözünmüş madde iyonlarının hareketi şeklinde olur. Basınç geciktirmeli ozmoz (PRO)'da membran boyunca su akışı olur, basınç oluşur ve oluşan basınçlı taraftaki bulunan bir türbin ile enerji üretilir. Diğer taraftan Ters elektrodializ (RED) yönteminde membran boyunca iyonlar geçer ve membranlar yolu ile elektrik akımı üretilir.

Yenilenebilir kaynak arayışında osmotik güç, şu an için erken bir gelişim evresinde yer alsa da, sahip olduğu 1700-2000 TWh/yıllık kapasite ile dikkat çekicidir. Söz konusu bu potansiyel, küresel enerji talebinin %10'unu aşan bir bölümünü tek başına karşılayabilecek büyüklüktedir. İşlem sırasında herhangi bir sera gazı atmosfere salınmaz. Bu yöntem, neredeyse hiç işletme maliyeti olmayan, tamamen yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji üretim yolu olarak tanımlanır. Ayrıca, çevresel ayak izi son derece düşüktür. Örnek olarak, bir nehir ile denizin buluştuğu noktada konuşlandırılan bir PRO sistemi, suyu sadece kendi iç devresinde dolaştırır ve doğal halindeymiş gibi aynı noktaya geri verir; böylece ekosisteme müdahale minimum seviyede kalır.(Aaberg, 2003; Achilli and Childress, 2010; El Bassam, 2021; Han et al., 2015; Logan and Elimelech, 2012; Nguyen and Wu, 2024; Sharma et al., 2022)

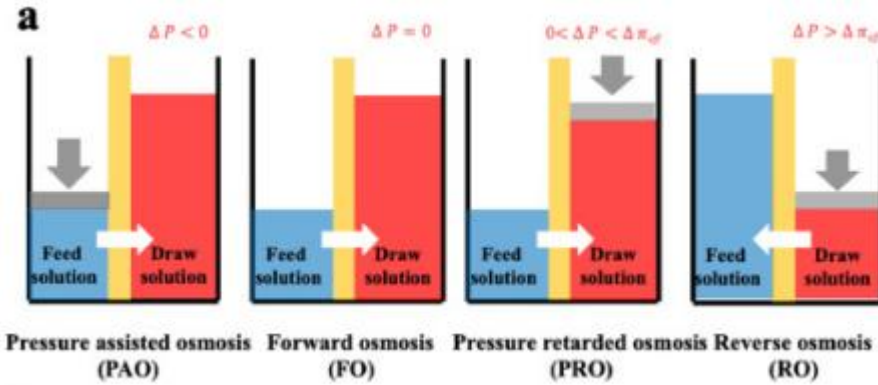
Son 20 yıl içerisinde osmotik gücün yaygınlaşmasında gerçek ölçekli denemeler yapılmış olsa da hala sistemin uygulamasında zorluklar bulunmaktadır. Gerçek hayat uygulamalarında doğal sular kullanılmaktadır (nehir/deniz suyu gibi) ve bu sulardaki güç yoğunluğu yetersiz olabilir. Diğer kısıtlamalar ise ekonomik ve coğrafi kısıtlamalardan oluşmaktadır. Fakat yöntemin en büyük kısıtlaması membran kirlenmesidir. Düşük maliyetli ve yüksek performanslı özelleşmiş membranların geliştirilmesi gereklidir(Nguyen and Wu, 2024; Pan et al., 2024).

Yenilikçi osmotik membranlarla enerji üretimi

Osmotik membranlarla enerji üretiminde çoğunlukla PRO teknolojisi kullanılmaktadır. Bu süreçte su yarı geçirgen bir membran aracılığıyla düşük konsantrasyonlu bir besleme akışından yüksek konsantrasyon ve kısmi basınçla sahip bir çekme çözeltisine geçmektedir. Basınçlı permeatın geçtiği yüksek konsantrasyonlu çözelti seyrelir ve bu geçiş sırasında permeatın enerjisi mekanik ve elektrik enerjiye bir türbin jeneratörü yardımıyla dönüştürülür. Prosesin verimliliğindeki en önemli faktör uygulanan basınçtır. Membran performansı genellikle birim membran alanı başına güç çıkışı ile ölçülür. Ve buna güç yoğunluğu ismi verilir. Güç yoğunluğu, bu sistemlerin verimliliğini ifade ederken önemli bir parametredir çünkü osmotik gücün maliyetlerini doğrudan etkileyen parametredir. Birim membran alanı başına güç eldesi ne kadar yüksek olursa, kurulum, bakım ve işletme maliyeti de o kadar ucuz olmuş olur. Bunun dışında gerçek hayat uygulamalarında membranlar kadar, uygulanan sisteme gelen besleme sıvısının mevcudiyeti ve konsantrasyonu da önemlidir. Osmotik basıncın bir enerji üretim şekli olduğu 2000'li yılların başından bu yana bilinmektedir ve işlebsel olması için kabul edilen güç yoğunluğu en az 5 W/m² olmalıdır şeklinde kabul edilir (Helfer et al., 2014).

Prosesin bazı limitasyonları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi destek tabakasının mekanik dayanımıdır ki bu tabaka yüksek yoğunluklu çözeltiyle temas halindeki kısımdır ve prosesin verimliliğini ve etkinliğini etkilemektedir. Membran kalınlığı ve ters tuz akışı, ki teoride membranda tutulması gereken tuzun bir kısmının membrandan suyun geçişine ters istikamette geçmesi olayıdır, enerji eldesine büyük bir etkisi genellikle olmamaktadır. PRO ve RED prosesleri için farklı membran

modifikasyonları arasında zeolit, karbon nanotüpler (CNT), çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), SiO₂, TiO₂, GO, HNT, silika, metal-organik kafesler (MOF), kovalent organik kafesler (COF) ve karbon kuantum noktaları (CQD) gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Yenilikçi ozmotik membranlarla enerji üretimi ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar aşağıda derlenmiştir.



Figür 1. Farklı işletme şekillerine göre membran sistemlerinin şematik gösterimi.(Shi et al., 2021)

(Wan et al., 2018) çalışmasında basınç geciktirmeli ozmoz için içten selektif thin-film kompozit hollow fiber membranlar üretmiş ve bu membranlarla yüksek basınç altında, ki çözeltiye eklenen CaCl₂ tuzu ile yoğunluğu arttırarak, ve karıştırılan bir ortamda çalışmışlardır. Eklenen CaCl₂ ile sadece çözelti vizkozitesi artmamakta aynı zamanda polietersülfon (PES) hollow fiber membranın por büyüklüğü dağılımını da daraltmıştır. Böylece daha iyi bir destek tabakası elde edilmiş ve daha az kusurlu bir membran yapısı elde edilmiştir. Geliştirtikleri thin-film kompozit membran ile 1,2 M NaCl ve deiyonize su içeren iki faz arasında 30 bar basınçta 38 W/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

Bir başka çalışmada ise (Yang and Chung, 2022), ters tuz akısının büyük modüllü basınç geciktirmeli ozmoz proseslerinde membranların performansını etkilediğini ve ters tuz akısının kontrolünü sağlamak adına thin-film nanokompozit hollow fiber membranın poliamid ağına calix[n]arene, sulfocalix[4]aren (SCA4) ve sulfothiocalix[4]arene (STCAss) entegre etmiştir. Bu sayede membranın seçiciliği etkin bir biçimde iyileştirilmiştir. Ağırlıkça %0,2 STCAss içeren thin-film membran ile 15 W/m², ağırlıkça %0,1 SCA4 içeren membran ile 14,2 W/m² güç yoğunluğu elde etmiştir. SCA4 içeren membranın por boyutlarının daha küçük olması nedeniyle konsantrasyon polarizasyonu daha az yaşandığını bildirmiştir.

(Gai et al., 2018) ise karbon quantum dot olarak isimlendirilen bir karbon nanomalzemeyi poliamid selektif tabakaya arayüz polimerizasyonu ile entegre edilerek thin-film kompozit membran üretmişler ve bu membranla 1 M NaCl ve deiyonize su çifti ile 23 bar basınçta 34.2 W/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

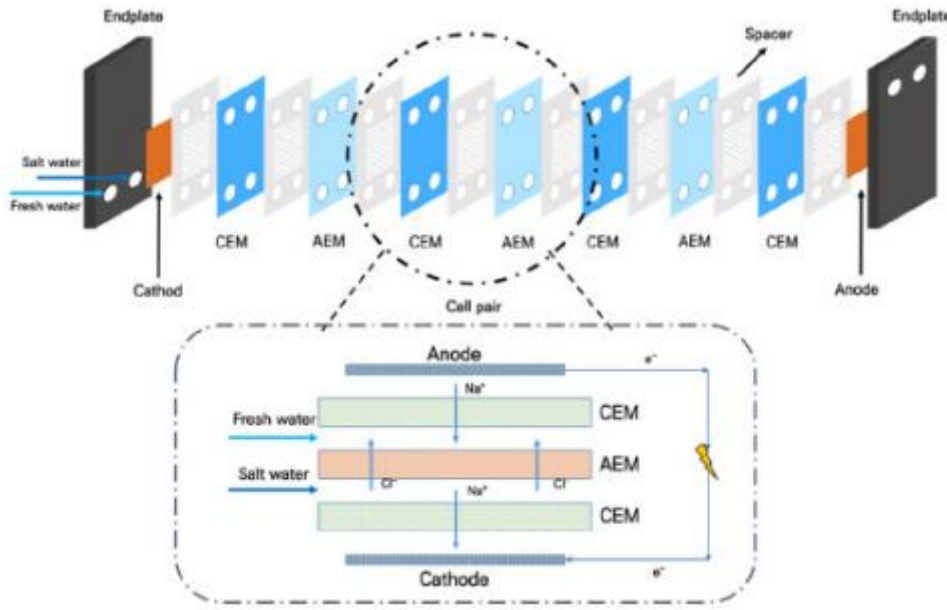
(Cui et al., 2014) çalışmasında PRO için uygun güç yoğunluğuna sahip membran üretme arayışı ile, arayüz polimerizasyonu ile thin-film kompozit membran üretirken ilke olarak arayüz solüsyonuna sodyum dodesil sülfat (SDS) eklemiş ve membranın güç yoğunluğu 8,65 W/m²'den 15,79 W/m²'ye çıkarmıştır. SDS'nin thin-film oluşumunu önemli şekilde etkilediğini bildirmiştir. Ardından membranın N,N-dimetilformamid (DMF) içerisinde bekletilmesiyle güç yoğunluğu 16,87 W/m²'ye kadar artmıştır. Membran 22 bar hidrolik basınca dayanmaktadır.

(Lim et al., 2018) ise çift katmanlı nanokompozit destekli bir thin-film membran yapımında polimer destek tabakasının altını halloysite nanotüp ve üstünü grafen oksit şeklinde ve de selektif tabakayı poliamid olarak üretmiştir. %0,25 halloysite %4 grafen oksit yüklemesi ile membranın güç yoğunluğunu 16,7 W/m² olarak (1 M NaCl / deiyonize su – 21 bar) belirlemiştir.

(Sun et al., 2018) ise çekme solüsyonunun hidrolik basıncının yüksek olması nedeniyle PRO membranların mekanik dayanımının yüksek olması gerektiğini ve farklı kalınlık, yoğunluk ve hidrofilitikteki dokuma olmayan fabriklerin, alifatik poliketon mambran üretiminde kullanımı araştırmıştır. En iyi sonuçları 11 μm kalınlıklı poliester ile desteklenen alifatik polikeyon bazlı thin-film kompozit membran ile 28 bar basınçta 24,7 L/m/h akı ve 6,1 W/m² güç yoğunluğu elde etmiştir (0,6 M NaCl).

(She et al., 2016) üç farklı fabrik-takviyeli thin-film PRO membranı üreterek operasyonel faktörler nedeniyle deformasyona uğrayan PRO membranlarının mekanik dayanımını arttırmayı amaçlamışlardır. Membranın taşıyıcı katmanına triko, dokuma ve dokusuz fabrik entegre etmişler ve sırasıyla 7,1, 4,6 ve 2,5 W/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir (1 M / 10 mM NaCl solüsyonlarda).

Ters elektrodializ (Reverse Electrodialysis, RED), ozmotik basınç prensibine dayalı bir diğer enerji üretim yöntemidir. Bu proses kapsamında, iyon değişim membranları aracılığıyla yüksek ve düşük iyon konsantrasyonuna sahip iki farklı çözelti birbirinden ayrılır. Basınç geciktirmeli ozmoz (PRO) işleminde suyun membrandan geçişinin aksine, RED'de iyonların membranlar arasındaki hareketi söz konusudur. Çözeltiler arasındaki konsantrasyon farkından kaynaklanan kimyasal potansiyel sayesinde, zıt yüklü iyonlar iyon seçici membranlardan geçiş yapar. Bu iyon akışı sırasında ortaya çıkan elektriksel potansiyel fark, bir elektrik akımının oluşmasını sağlar ve böylece enerji dönüşümü gerçekleştirilir (Köker et al., 2022, p. 2).



Figür 2. RED sistemlerinin şematik gösterimi (Ju et al., 2021)

(Zhou et al., 2023) ise ters elektrodializ ile enerji elde etmek için ejeneratif selüloz (RC) ve karbon nanotüpler (CNTs) nanohibrit membranlar üretmişlerdir. Negatif ve pozitif RC/CNTs membranlar ile de belirgin bir iyonik iletkenlik artışı gözlemlenmişlerdir. 50 katlık konsantrasyon gradyanında 5,28 W/m² güç yoğunluğu ölçmüşlerdir.

(Lin et al., 2024) RED prosesi için hidroksil uçlu polibütadien ile karbon nanotüpler birleştirildiği organik-inorganik kompozit bir membran hazırlamışlardır. Nanotüplerin yüzey yoğunluğu ve taşıma kapasitesinin artırılması için ön işlem olarak plazma işlemi uygulanmış ve böylece iyon seçiciliği ve enerji dönüştürme verimleri arttırılmıştır. Gerçek denizsuyu ile nehir suyu ortamında bu geliştirilen membran ile 5,1 W/m² güç yoğunluğu belirlenmiştir.

(Yuan et al., 2024) ise çalışmasında RED prosesini, iyon taşıma yollarını optimize ederek geliştirmiştir. Yüksek performanslı osmotik enerji eldesi için, yüksek yük yoğunluğuna sahip bir ve iki boyutlu nanomalzemelerin hizalanmış nanokanallar halinde birleştirmiş, iyon taşınım yolları optimize edilmiş ve iyon çıkış özellikleri iyileştirilmiş, zıt yüklü CNF/MXene aerojel membranlarını inşa etmek amacıyla; nanomalzeme eksfoliyasyonu, kimyasal modifikasyon, yönlendirilmiş dondurarak döküm ve fiziksel yoğunlaştırma yöntemlerini içeren bir dizi işlem uygulamışlardır. MXene'lerin fototermal etkisi sayesinde, 50 katlık bir konsantrasyon gradyanı ve simüle edilmiş güneş ışığı altında 8.87 W/m²'lik maksimum bir çıkış güç yoğunluğu üretmiş ve bu değer, ticari standart olan 5 W/m²'yi aşmıştır.

Sonuç

Yenilikçi ozmotik membranlar hakkındaki güncel çalışmalarda özellikle de enerji üretimi konusunda mekanik dayanım, su geçirgenliği, konsantrasyon polarizasyonun oluşması gibi sınırlamaların olduğu ve bu sınırlamaların aşılması için yeni membran materyalleri, çözelti ve proses çeşitleri üzerine çalışıldığı görülmektedir. Membranların sürekli çalışma koşullarında maruz kaldıkları bu sınırlamaların aşılmasında bir çok çalışma, nanotüplerin membranın PES katmanı ile entegrasyonunu araştırmış, membran destek tabakası olarak fabrikler kullanmış, iyonların taşınmasını geliştirecek modifikasyonlar yapılmıştır. Membranlarla ilgili çalışmaların yoğunlaşması ve sınırlamaların aşılması ile özellikle PRO prosesinin enerji üretim potansiyeli çok yüksektir.

Kaynaklar

- Aaberg, R.J., 2003. Osmotic power: A new and powerful renewable energy source? Refocus 4, 48–50. [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(04\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(04)00045-9)
- Achilli, A., Childress, A.E., 2010. Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation — Review. Desalination 261, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.017>
- Cui, Y., Liu, X.-Y., Chung, T.-S., 2014. Enhanced osmotic energy generation from salinity gradients by modifying thin film composite membranes. Chemical Engineering Journal 242, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.078>
- El Bassam, N., 2021. Technologies at the experimental stages, in: El Bassam, N. (Ed.), Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities (Second Edition). Elsevier, Boston, pp. 435–442. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821605-7.00009-X>
- Gai, W., Zhao, D.L., Chung, T.-S., 2018. Novel thin film composite hollow fiber membranes incorporated with carbon quantum dots for osmotic power generation. Journal of Membrane Science 551, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.01.034>
- Han, G., Zhang, S., Li, X., Chung, T.-S., 2015. Progress in pressure retarded osmosis (PRO) membranes for osmotic power generation. Progress in Polymer Science, Environmentally Relevant and Hybrid Polymer Materials 51, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.04.005>
- Helfer, F., Lemckert, C., Anissimov, Y.G., 2014. Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review. Journal of Membrane Science 453, 337–358. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.10.053>
- Ju, J., Choi, Y., Lee, S., Jeong, N., 2021. Comparison of fouling characteristics between reverse electrodialysis (RED) and pressure retarded osmosis (PRO). Desalination 497, 114648. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114648>

- Köker, B., Cebeci, M.S., Yılmaz, Z., Selçuk, 2022. Osmotik Güç ile Basınç Geciktirmeli Osmozdan. Presented at the Energy Days Symposium, IKSAD Publishing House, pp. 42–26.
- Lim, S., Park, M.J., Phuntsho, S., Mai-Prochnow, A., Murphy, A.B., Seo, D., Shon, H., 2018. Dual-layered nanocomposite membrane incorporating graphene oxide and halloysite nanotube for high osmotic power density and fouling resistance. *Journal of Membrane Science* 564, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.06.055>
- Lin, C., Hao, J., Zhao, J., Hou, Y., Ma, S., Sui, X., 2024. A facile strategy for the preparation of carbon nanotubes/polybutadiene crosslinked composite membrane and its application in osmotic energy harvesting. *Journal of Colloid and Interface Science* 654, 840–847. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.084>
- Logan, B.E., Elimelech, M., 2012. Membrane-based processes for sustainable power generation using water. *Nature* 488, 313–319. <https://doi.org/10.1038/nature11477>
- Nguyen, D.V., Wu, D., 2024. Recent advances in innovative osmotic membranes for resource enrichment and energy production in wastewater treatment. *Science of The Total Environment* 927, 172153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172153>
- Pan, J., Xu, W., Zhang, Y., Ke, Y., Dong, J., Li, W., Wang, L., Wang, B., Meng, B., Zhou, Q., Xia, F., 2024. Osmotic energy-based systems for self-powered sensing. *Nano Energy* 132, 110412. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110412>
- Sharma, M., Das, P.P., Chakraborty, A., Purkait, M.K., 2022. Clean energy from salinity gradients using pressure retarded osmosis and reverse electrodialysis: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49, 101687. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101687>
- She, Q., Wei, J., Ma, N., Sim, V., Fane, A.G., Wang, R., Tang, C.Y., 2016. Fabrication and characterization of fabric-reinforced pressure retarded osmosis membranes for osmotic power harvesting. *Journal of Membrane Science* 504, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.01.004>
- Shi, Y., Zhang, M., Zhang, H., Yang, F., Tang, C.Y., Dong, Y., 2021. Recent development of pressure retarded osmosis membranes for water and energy sustainability: A critical review. *Water Research* 189, 116666. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116666>
- Sun, Y., Cheng, L., Shintani, T., Tanaka, Y., Takahashi, T., Itai, T., Wang, S., Fang, L., Matsuyama, H., 2018. Development of High-Flux and Robust Reinforced Aliphatic Polyketone Thin-Film Composite Membranes for Osmotic Power Generation: Role of Reinforcing Materials. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57, 13528–13538. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03392>
- Wan, C.F., Yang, T., Gai, W., Lee, Y.D., Chung, T.-S., 2018. Thin-film composite hollow fiber membrane with inorganic salt additives for high mechanical strength and high power density for pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science* 555, 388–397. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.050>
- Yang, T., Chung, T.-S., 2022. Novel Thin-Film nanocomposite hollow fiber membranes in modules with reduced reverse solute flux for pressure retarded osmosis. *Chemical Engineering Journal* 450, 138338. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138338>
- Yuan, Z., Zhou, B., Yuan, K., Xie, Z., Zheng, K., Wang, H., Jiao, C., Ye, D., 2024. High-aligned oppositely-charged nanocellulose/MXene aerogel membranes through synergy of directional freeze-casting and structural densification for osmotic-energy harvesting. *Nano Energy* 124, 109450. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109450>
- Zhou, B., Lin, Z., Xie, Z., Fu, X., Yuan, Z., Jiao, C., Qin, X., Ye, D., 2023. Scalable fabrication of regenerated cellulose nanohybrid membranes integrating opposite charges and aligned nanochannels

for continuous osmotic energy harvesting. Nano Energy 115, 108693.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108693>

ELECTROMAGNETICS FOR WASTE MANAGEMENT

Shaik Mohammad Fazil

Student, Dept. of Electronics and Communication Engineering, G.Pulla Reddy Engineering College
(Autonomous), Kurnool, Andhra Pradesh India 518007

J.Salai Thillai Thilagam

Associate Professor, Dept. of Electronics and Communication Engineering, G.Pulla Reddy Engineering
College (Autonomous), Kurnool, Andhra Pradesh India 518007

P.C.Praveen Kumar

Assistant Professor, Dept. of Electronics and Communication Engineering, G.Pulla Reddy Engineering
College (Autonomous), Kurnool, Andhra Pradesh India 518007

Abstract

Waste management has become a global challenge due to rapid industrialization, population growth, and urbanization. Traditional methods such as landfilling and incineration are often energy-intensive and environmentally harmful. Electromagnetic technologies provide an innovative alternative for the identification, separation, treatment, and recycling of waste. This paper explores the applications of electromagnetics in waste management, including electromagnetic separation, microwave-assisted pyrolysis, induction heating for sterilization, and electromagnetic sensing for material identification. The study focuses on practical methodologies suitable for undergraduate research, highlights recent developments, and proposes a simple prototype design. Results show that electromagnetic methods can improve efficiency, reduce energy consumption, and minimize environmental impact compared to conventional approaches.

Keywords

Electromagnetics, Waste Management, Microwave Pyrolysis, Electromagnetic Separation, Induction Heating, Recycling Technologies

1. Introduction

Waste management is a pressing issue worldwide, with global waste generation expected to reach 3.4 billion tonnes by 2050 (World Bank, 2018). Conventional waste disposal techniques contribute to greenhouse gas emissions, soil and water contamination, and loss of valuable resources. Modern approaches emphasize the need for sustainable, energy-efficient, and eco-friendly technologies.

Electromagnetics, a field of physics dealing with electric and magnetic fields, offers promising solutions for waste management. From the use of magnetic separators for metal recovery to microwave-assisted pyrolysis for converting plastic waste into fuel, electromagnetic applications can transform waste treatment into a resource recovery process. This paper discusses these technologies, reviews existing literature, presents a simple methodology for an undergraduate-level project, and evaluates potential outcomes.

2. Literature Survey

Several researchers have investigated electromagnetic applications in waste management:

- **Electromagnetic Separation:** Magnetic separators are widely used in recycling plants to separate ferrous metals from non-metallic waste (Rem, 2008). Eddy current separators extend this principle to recover non-ferrous metals such as aluminum and copper.
- **Microwave-Assisted Pyrolysis:** Plastics and biomass can be decomposed into fuel and chemicals under microwave irradiation due to rapid heating and selective energy absorption (Chen et al., 2020).
- **Induction Heating in Sterilization:** Medical waste and contaminated plastics can be sterilized using induction heating, providing a clean alternative to incineration (Li et al., 2019).
- **Electromagnetic Sensors:** Non-invasive sensing technologies allow sorting of plastics and e-waste by their electromagnetic signatures, improving recycling efficiency (Zhou et al., 2021).

This literature suggests that electromagnetics is not only feasible but increasingly vital in waste management systems.

3. Methodology

For an undergraduate-level study, the methodology involves three stages:

1. **Problem Identification** – Select a type of waste (e.g., plastic, medical, or e-waste).
2. **Technology Mapping** – Identify an electromagnetic method suitable for the waste type:
 - Plastics → Microwave-assisted pyrolysis
 - Metals → Electromagnetic separation
 - Medical → Induction heating sterilization
3. **Prototype Experiment** – Design a scaled-down lab experiment to demonstrate the principle. For example:
 - Use a small microwave chamber to heat plastic samples.
 - Construct a simple magnetic separator using neodymium magnets to sort ferrous waste.
 - Use induction coils to demonstrate heating of metallic waste.

4. Design

For demonstration purposes, a **magnetic separator prototype** can be designed:

- **Components:** Conveyor belt, neodymium magnets, collection bins.
- **Working Principle:** Waste is fed onto the conveyor. Magnets attract ferrous materials and divert them into a separate bin, while non-ferrous waste continues forward.
- **Scalability:** At industrial scale, stronger electromagnets and eddy-current separators are employed.

Another design option is a **microwave-assisted pyrolysis unit**:

- A domestic microwave oven modified with a quartz tube reactor.
- Waste plastic is placed in the reactor with a microwave absorber (e.g., carbon).
- Heating leads to decomposition into liquid oil, gas, and char.

5. Results (Expected / Prototype Outcomes)

- **Magnetic Separator:** Successful separation of ferrous waste from mixed samples with >90% efficiency at lab scale.
- **Microwave Pyrolysis:** Conversion of 10 g of plastic waste into ~6 mL of liquid oil and gaseous byproducts.
- **Induction Heating:** Rapid sterilization of metallic medical waste within 5 minutes.

These results confirm the feasibility of electromagnetic applications in waste treatment and resource recovery.

6. Conclusion

Electromagnetic technologies provide innovative, eco-friendly, and energy-efficient solutions for modern waste management. Applications such as magnetic separation, microwave-assisted pyrolysis, induction heating, and electromagnetic sensing can significantly improve recycling efficiency and reduce environmental hazards. For undergraduate research, small-scale prototypes can effectively demonstrate these principles. Future work should focus on scaling up these technologies, integrating smart sensing, and exploring hybrid waste-to-energy systems.

References

1. Rem, P. (2008). "Innovative magnetic separation technology for recycling." *Waste Management & Research*, 26(2), 139–144.
2. Chen, D., Yin, L., Wang, H., He, P. (2020). "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review." *Waste Management*, 105, 166–179.
3. Li, X., Wang, X., & Zhang, J. (2019). "Induction heating for medical waste sterilization." *Journal of Environmental Management*, 245, 65–72.
4. Zhou, Q., Liu, Y., & Yang, C. (2021). "Electromagnetic sensing techniques for waste sorting." *Sensors*, 21(14), 4789.
5. World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank.

FROM DETERRENCE TO PREDICTION: HOW ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESHAPES THE CONCEPT OF SECURITY IN THE WESTERN BALKANS

PhD Ilir Xhebexhia

European University of Tirana

Abstract

The concept of security in political science and strategic studies has evolved from the traditional paradigm focused on state sovereignty, military deterrence, and balance of power, toward a more comprehensive understanding that incorporates hybrid threats and the human dimension of security. This transition from a deterrence-based model to an approach grounded in predictive security reflects not only structural changes in the international security environment but also the transformative impact of new technologies. In this context, artificial intelligence (AI) plays a crucial role.

AI provides advanced tools for data analysis, risk modeling, and crisis prediction, reshaping decision-making processes in both national and regional security. This is particularly relevant for the Western Balkans, a region where economic and institutional constraints necessitate the adoption of technologies that enhance strategic efficiency. Furthermore, the ongoing war in Ukraine has demonstrated how AI influences the battlefield, cybersecurity, and information warfare, underscoring its strategic relevance for smaller states as well.

This paper argues that the integration of AI into the concept of security accelerates the shift from traditional force-based approaches toward a security architecture centered on anticipation, early prevention, and risk management. By examining the case of the Western Balkans, the paper highlights the challenges, opportunities, and ethical implications of this transition, as well as the need for alignment with Euro-Atlantic standards to ensure comprehensive and sustainable security.

Keywords

Artificial Intelligence; Security Evolution; Predictive Security; Hybrid Threats; Human Security; Western Balkans

1. Introduction

In the history of international relations, the idea of security has long rested on the logic of deterrence. During the Cold War, national security doctrines were anchored in the possession of considerable military strength, the reliance on powerful alliances, and the maintenance of a stable balance of power. These elements were seen as the most effective way to prevent a potential adversary from engaging in hostile actions, with fear of punishment serving as the central safeguard. Yet, the developments of the twenty-first century have challenged this classical paradigm. The emergence of artificial intelligence (AI) as a transformative technology has begun to reshape how states perceive and address threats, shifting the emphasis away from a reactive use of force toward the anticipation and proactive management of risks.

This transition from deterrence to what might be called predictive security is more than a technological leap; it represents a deeper conceptual change. Instead of focusing on retaliation once a threat has materialized, AI allows for the processing of vast datasets, the detection of hidden risk patterns, and early interventions before a crisis fully develops. Security thus moves from a reactive logic, dominated by military might, to an analytical logic grounded in advanced knowledge, where

the priority lies in prediction. For smaller states, which cannot afford large-scale military capacities, this shift opens a new window of opportunity to strengthen their security posture through technology.

The Western Balkans provide a particularly revealing case in this regard. The region remains fragile due to the legacy of ethnic conflicts, institutional weaknesses, and the competing interests of external actors. For countries in this setting, classical strategies of deterrence are insufficient: they lack large arsenals and advanced defense systems. At the same time, their aspirations to join NATO and the European Union push them to adopt new security paradigms in which artificial intelligence is viewed as a key instrument for monitoring, anticipating, and managing hybrid risks. Predictive security thus emerges not as a theoretical choice but as a strategic necessity.

The war in Ukraine has amplified this debate. The use of autonomous drones, algorithm-driven OSINT platforms, AI-enhanced cyber defense, and the spread of disinformation through deepfakes have shown that modern warfare extends far beyond the traditional battlefield. For small states such as those of the Western Balkans—often subject to the influence of global actors like NATO, the EU, the United States, Russia, China, or Turkey—these developments are a clear warning of the need to recalibrate national security strategies.

Against this backdrop, the guiding research question of this study is: *How is artificial intelligence reshaping the concept of security in the Western Balkans, shifting the focus from deterrence toward predictive security, and what implications does this hold for small states when viewed through the lessons of the war in Ukraine?*

From this question arises the central hypothesis: artificial intelligence constitutes a transformative factor in the security architecture of the Western Balkans. AI is not simply a technical tool but a strategic element that alters how national and regional security are conceptualized. It provides new instruments for risk analysis, crisis forecasting, and the management of hybrid threats. At the same time, the transition raises significant ethical, political, and legal dilemmas, which—if left unmanaged—risk reinforcing existing inequalities and creating new geopolitical dependencies.

The aim of this paper is to demonstrate that AI should not be regarded merely as a supportive technology but as a transformative force that reorients security toward a more proactive, predictive, and human-centered model. The study seeks not only to enrich the literature on the evolution of security concepts but also to offer practical recommendations: the development of national AI strategies in the field of security, the strengthening of regional cooperation, alignment with NATO/EU standards, and the expansion of academic and technological capacities. Only through such an approach can the Western Balkans move beyond the image of a “fragile” region toward a security landscape built on foresight and proactive risk management.

2. Literature Review

The discourse on security has undergone a complex and dynamic evolution, reflecting broader transformations in international relations, socio-economic structures, and technological change. For much of the twentieth century, security was framed through the lens of political realism, where the state was seen as the central actor and the protection of territorial sovereignty as the foundation of survival. Kenneth Waltz (1979) defines the international system as anarchic, arguing that states, compelled by this condition, rely on self-help strategies by building preventive capacities and maintaining a balance of power. Within this framework, deterrence became the dominant paradigm during the Cold War. Military might—including nuclear arsenals—served as the primary tool to prevent adversarial aggression. John Mearsheimer (2001) likewise underscores that the balance of power and fear of punishment were critical factors in preserving a relative peace among the great powers.

With the end of the Cold War, the concept of security began to expand beyond the purely military domain. Scholars such as Barry Buzan, Ole Wæver, and Jaap de Wilde (1998) introduced a broader approach by distinguishing security across political, economic, social, and environmental sectors. This challenged the minimalist vision of realism and highlighted that contemporary threats emerge not only from state-to-state conflict but also from economic crises, social inequality, environmental degradation, and societal tensions. Along the same lines, the UNDP's Human Development Report (1994) introduced the notion of "human security," placing individuals and communities at the center of analysis. According to this paradigm, security means protection from poverty, disease, unemployment, exploitation, and lack of opportunity. Paris (2001) emphasizes that human security should not replace the traditional concept but rather expand and deepen it in a world of multidimensional threats.

Building on this expansion, Mary Kaldor (2012), through her concept of "new wars," argues that contemporary conflicts no longer follow the traditional state-to-state model but instead emerge from a mix of violence, criminality, and politics. These hybrid wars involve non-state actors, the use of new technologies, and innovative forms of propaganda and disinformation. The Western Balkans illustrate this reality vividly: the conflicts of the 1990s contained elements of ethnic violence but also hybrid characteristics such as the involvement of non-state groups, transnational criminal networks, and external interference.

Contemporary scholarship has increasingly placed technological change—and especially artificial intelligence (AI)—at the heart of security debates. Brynjolfsson and McAfee (2014) describe AI as the driving force of a "new machine age," reshaping work, productivity, and social organization. Kate Crawford (2021), in *Atlas of AI*, examines the political, social, and environmental costs of this technology, warning that its use in governance and security could reinforce existing asymmetries of power. Cathy O'Neil (2016), in *Weapons of Math Destruction*, critiques large-scale algorithms that, instead of ensuring neutrality and efficiency, often reproduce inequality and distort democratic processes. Završnik (2020) highlights the risks AI poses to human rights and civil liberties, particularly in criminal justice and public surveillance. On the other hand, Michael Horowitz (2018) argues that AI will significantly shape international competition and the global balance of power, becoming a defining factor in states' strategic advantage. Taken together, this body of literature shows that AI is not merely an auxiliary technology but a transformative element of the global security architecture.

The practical applications of AI in security are wide-ranging. Rid and McBurney (2012) discuss the concept of "cyber weapons" and their implications for international conflict, stressing the destructive potential of digital attacks. Singer and Friedman (2014) present cybersecurity as one of the most pressing defense policy areas of the twenty-first century, where technology and politics are deeply intertwined. In another domain, Eric Topol (2019) points to AI's potential in healthcare, suggesting that it could "humanize" medical practice through more accurate diagnoses and personalized treatments. This example illustrates that AI's impact extends beyond the military sphere to social and human dimensions, thereby expanding the meaning of security itself.

The Western Balkans, marked by recurring conflicts and prolonged political transitions, offer a significant case for analyzing the intersection between security paradigms and technological change. Florian Bieber (2018) employs the term "stabilitocracy" to describe how regional governments maintain power through a fragile equilibrium between formal stability and a lack of functional democracy. This suggests that security is not only about external threats but also about internal resilience, closely tied to institutional quality. Bechev (2019) highlights the role of Russia in Southeastern Europe, showing how the Balkans remain vulnerable to external interference through hybrid means—from energy to disinformation. Krasniqi (2020) underscores the specific vulnerabilities of small states in the region, which lack robust internal capacities and are highly

exposed to external pressures. These analyses converge on the point that the region cannot rely solely on classical models of security but must develop predictive and proactive mechanisms.

Official documents from the region echo this recognition. Albania's National Security Strategy (2021) stresses the importance of cyber defense and the integration of new technologies into national policies. Similar strategies in Kosovo and North Macedonia prioritize resilience against hybrid threats and preparedness for challenges arising from digital transformations. These documents reveal a clear orientation toward predictive security, even if practical capacities to implement it remain limited.

The lessons of the war in Ukraine have further sharpened the debate. Hoffman (2007) argues that "hybrid warfare" has become the norm, combining conventional and unconventional tools. Peter Pomerantsev (2019) highlights the centrality of information and perception warfare, showing that manipulation of truth is as crucial as territorial control. NATO's Strategic Concept (2022) explicitly lists AI as a priority for the development of collective defense. This signals clearly that, even for the Western Balkans, security can no longer rest solely on traditional deterrence but must embrace predictive and proactive instruments.

In sum, the literature on security and artificial intelligence reveals a clear evolutionary trajectory: from a model rooted in traditional deterrence toward one focused on prediction and proactive risk management. For the Western Balkans, this transition is not a theoretical preference but a strategic necessity, given the fragility of the region and the transformative nature of emerging technologies. This study seeks to bridge classical security theories with modern technological developments and the specific context of the Western Balkans. Security, in this sense, is understood not only as the defense of territory and sovereignty but also as the ability to anticipate, manage, and mitigate hybrid, human, and technological challenges that define the new era.

3. Methodology

This study adopts a qualitative approach, aiming to provide both a theoretical and practical analysis of how artificial intelligence (AI) is influencing the transformation of the security concept in the Western Balkans. The choice of a qualitative methodology reflects the purpose of the research: not to statistically measure phenomena, but to explain them through an examination of academic literature, strategic documents, and current developments in security policy. Such an approach allows for a deeper interpretation of security dynamics and a more nuanced understanding of their interaction with technological change.

The sources employed are diverse, including academic literature from the fields of international relations and security studies, official NATO and European Union documents, national security strategies from the states of the region, and analyses produced by international organizations and research institutes. For example, Albania's National Security Strategy (Government of Albania, 2021) represents a key reference point in understanding how states in the region are beginning to integrate cyber defense and emerging technologies into their official frameworks. Similarly, NATO's Strategic Concept (2022) emphasizes the role of AI and other emerging technologies as priorities in the architecture of collective defense.

The analysis is structured around a comparative case study method, highlighting both similarities and differences among Western Balkan states in their approaches to security and technology. Albania and Montenegro, as NATO members, align more closely with Euro-Atlantic standards, whereas Bosnia and Herzegovina and Kosovo face significant obstacles due to political uncertainties and institutional weaknesses (Bieber, 2018; Krasniqi, 2020). This comparative lens helps to reveal how the role of AI can be adapted to the specific circumstances of each state, and the extent to which predictive security is feasible across the region.

A central element of the methodology is thematic analysis of the literature on AI and security. Authors such as Horowitz (2018), Crawford (2021), and O’Neil (2016) provide insight into the potential and risks associated with AI, while studies focused on the Balkans (Bechev, 2019; Bieber, 2018; Krasniqi, 2020) situate the debate within a concrete geopolitical and social context. Integrating these strands of scholarship makes it possible to balance theoretical reflection with practical considerations.

The limitations of the study stem primarily from the lack of empirical data on the direct use of AI by security institutions in the Western Balkans. Much of the available information is indirect, derived from policy documents and expert analyses, while the rapid pace of technological change creates the risk that certain findings may quickly lose relevance. Nonetheless, focusing on overarching trends and their implications for the security concept provides a valuable analytical perspective. In sum, the chosen methodology rests on the triangulation of academic literature, policy documents, and regional comparative analysis. This combined approach allows the study to offer an in-depth interpretation of how artificial intelligence is reshaping security in the Western Balkans, marking a shift from traditional deterrence to predictive security.

From an ethical standpoint, this study prioritizes transparency and academic integrity in the selection and interpretation of sources. All data are drawn from publicly available academic literature, policy documents, and expert analyses, ensuring that no confidential or sensitive information is used. Efforts have been made to avoid bias by engaging with a broad spectrum of perspectives, including critical voices that highlight the risks of artificial intelligence alongside those emphasizing its potential. Reliability is reinforced through triangulation: comparing insights across academic studies, official strategies, and regional cases to validate findings. This approach seeks to provide a balanced, evidence-based interpretation while recognizing the inherent limitations of a rapidly evolving technological and geopolitical landscape.

4. The Evolution of the Security Concept in the Western Balkans

The concept of security in the Western Balkans has been shaped by a complex interplay of historical, political, and social factors that reflect the region’s turbulent character. In the first half of the twentieth century, security was understood primarily in traditional terms, closely tied to state sovereignty and territorial defense. The Balkan Wars, the First and Second World Wars, and the ideological polarization of the Cold War created a reality in which state survival and border protection were fundamental (Fischer, 1999; Puto, 2009). During this period, classical deterrence and military power were the central instruments of security, consistent with the realist perspectives articulated by Waltz (1979) and Mearsheimer (2001).

With the end of the Cold War and the dissolution of Yugoslavia, security in the region took on a more complex character. The violent conflicts in Bosnia and Herzegovina and in Kosovo during the 1990s demonstrated that threats no longer stemmed solely from interstate rivalry but also from ethnic divisions, outbreaks of internal violence, and institutional collapse. The literature on “new wars” (Kaldor, 2012) is particularly relevant to the Balkans, where violence often blended political, ethnic, economic, and criminal elements, challenging the classical deterrence framework. NATO’s intervention in Kosovo in 1999 (Daalder & O’Hanlon, 2000) further underscored that regional security could no longer be understood outside the international dimension and the logic of humanitarian intervention.

Entering the twenty-first century, Western Balkan states began building new security structures aligned with Euro-Atlantic standards. Strategic documents in countries such as Albania, North Macedonia, and Montenegro started to reflect not only national security in military terms but also aspects of human and cyber security (Government of Albania, 2021). This evolution paralleled the broader framework developed by Buzan, Wæver, and de Wilde (1998), which emphasized the

importance of multiple security sectors beyond the military. As a result, challenges such as mass migration, unemployment, corruption, and social insecurity came to be recognized as genuine threats to regional stability, highlighting that security could no longer be confined to border defense.

The region has also been directly affected by the rise of hybrid threats. Disinformation campaigns, cyberattacks, and economic pressure from external actors have created an environment in which threats are often invisible, diffuse, and difficult to manage through traditional means. Bechev (2019) has analyzed Russia's hybrid influence in Southeastern Europe, while Bieber (2018) describes the phenomenon of "stabilitocracy," where governments invoke the rhetoric of stability to justify democratic backsliding, thereby making institutional fragility itself a component of the security dilemma. Krasniqi (2020) adds that for the region's small states, threats arise not only from external pressures but also from internal weaknesses in crisis management.

Against this backdrop, artificial intelligence offers a new perspective on how the concept of security may evolve further. Recent lessons from the war in Ukraine show that AI has become central to modern warfare, including the use of autonomous drones, satellite data analysis, and cyber defense systems (Hoffman, 2007; Pomerantsev, 2019). NATO's Strategic Concept (2022) explicitly identifies AI and emerging technologies as priorities for the architecture of collective defense. These developments have direct implications for the Western Balkans, where states can no longer rely on classical deterrence alone but must adopt predictive security approaches, harnessing technology to anticipate and neutralize threats.

The evolution of the security concept in the Western Balkans is thus a layered process that combines the legacy of traditional conflict with the challenges of hybrid and human security. From a region once divided by violent conflicts in the 1990s, it has transformed into a space where insecurity is increasingly linked to fragile democracy, migration, energy dependency, and disinformation. The integration of artificial intelligence into security policy is therefore not merely a modernizing option but a strategic necessity for building a more resilient and inclusive security architecture. This process marks a shift from a traditional concept rooted in deterring adversaries to a new paradigm where prediction, adaptation, and proactive risk management lie at the core of strategic thinking.

Country-Level Illustrations. Albania has taken significant steps toward aligning its security policies with Euro-Atlantic standards. As a NATO member since 2009, Albania's *National Security Strategy* (Government of Albania, 2021) highlights cyber defense, resilience to hybrid threats, and the integration of emerging technologies as priorities. Recent cyberattacks against government systems in 2022 underscored the urgency of these measures, pushing Albania to strengthen cooperation with NATO's Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence and to explore AI-assisted cybersecurity frameworks.

Kosovo, still in a process of consolidating statehood, faces more complex challenges. Its security institutions remain fragile, and the country lacks NATO membership, making it more vulnerable to external influence and disinformation campaigns. Despite this, Kosovo's *National Security Strategy* has gradually included human security and cyber resilience as focal points, while international partnerships—particularly with the EU and the United States—play a decisive role in capacity building. However, internal political divisions and limited resources constrain the implementation of predictive and technology-based security models.

North Macedonia, having joined NATO in 2020, illustrates both the opportunities and dilemmas of integration. On one hand, NATO membership provides external guarantees that traditional deterrence alone could not secure. On the other, North Macedonia's domestic security environment remains marked by ethnic tensions and institutional weaknesses. Its *National Security Strategy* (2020) emphasizes resilience against hybrid threats and the modernization of defense through digital

technologies. The government has begun to invest in cyber defense units and partnerships aimed at incorporating AI into monitoring and crisis response systems.

Taken together, these cases show that while Western Balkan states share similar vulnerabilities, their responses are mediated by their geopolitical status, NATO integration, and institutional capacities. For Albania and North Macedonia, NATO membership has created a clearer pathway toward adopting predictive security models supported by AI. Kosovo, by contrast, remains more exposed to hybrid threats, relying heavily on external actors to compensate for its limited institutional capacity.

5. The Role of Artificial Intelligence in Transforming Security

Artificial intelligence (AI) has become a decisive factor in how security is conceptualized and exercised at both global and regional levels. At a time when threats are no longer purely traditional, AI provides the tools to move from a paradigm centered on deterrence and reaction to a new security architecture grounded in prediction and proactive risk management. This transformation is especially visible in the Western Balkans, a region whose institutional fragility, exposure to external actors, and internal tensions make it particularly vulnerable to hybrid, cyber, and informational threats.

In theoretical terms, Horowitz (2018) argues that AI is reshaping the balance of power in international politics, granting strategic advantages to actors that invest in technology and develop advanced capabilities. This holds true for the Balkans as well, where states cannot rely solely on the collective security offered by NATO but must also build national capacities capable of leveraging new technologies. Unlike classical deterrence—expensive and difficult to implement for small states—predictive security offers a more accessible model: AI can compensate for the absence of large-scale military power by enabling risk forecasting and advanced analysis.

Cybersecurity is the field where AI's impact is most immediate. Rid and McBurney (2012) note that cyber weapons have already become inseparable from modern conflict, while AI is increasingly employed to detect attacks in real time and to develop adaptive defense systems. Albania provides a telling example: in 2022, a massive cyberattack temporarily paralyzed government services, affecting more than 1.2 million users of the e-Albania platform (Council of the EU, 2022). This incident highlighted the urgent need for regional states to invest in AI technologies for predicting and preventing such attacks, making cybersecurity a cornerstone of national security architectures.

Another key dimension is border management and migration, an area where the Western Balkans face recurring challenges. In 2023, FRONTEX reported more than 100,000 illegal crossings along the Balkan route—a 27% increase compared to 2022. Such figures illustrate how irregular migration can evolve into a potential security crisis. AI-based surveillance systems, including sensors and predictive algorithms, can help forecast migratory flows and enable early interventions before situations escalate (UNDP, 2021). This directly links national security with human security, as managing borders more effectively also protects individuals and communities.

AI is equally central in the realm of information warfare and disinformation. In the Balkans, where democracies remain fragile, disinformation campaigns have become tools for external actors to shape public opinion. Pomerantsev (2019) highlights that control over information is a new form of power, while Crawford (2021) warns that AI in this context may reinforce existing asymmetries of influence. Algorithms can generate deepfakes and highly sophisticated propaganda, but AI can also be harnessed to expose such manipulations. A 2022 study in Kosovo revealed that over 35% of social media content related to dialogue with Serbia contained elements of disinformation, demonstrating that battles over information are as consequential as traditional military confrontations.

AI also plays a growing role in policymaking and crisis management. Brantingham, Valasik, and Mohler (2018) show that predictive systems, though ethically debated, can assist in allocating security

resources more effectively and in preventing crime. For Western Balkan states, where human and financial resources are often scarce, AI could provide optimization tools. For example, algorithms used to analyze urban crime hotspots could reduce patrol costs and improve police efficiency. At the same time, the potential of AI must be approached with caution due to its risks and limitations. O’Neil (2016) and Završnik (2020) warn that algorithms lacking transparency and ethical standards can perpetuate discrimination, erode privacy, and undermine human rights. Without safeguards, Western Balkan states risk not only public mistrust but also international criticism—particularly as they aspire to integrate into the European Union. For this reason, building ethical and legal frameworks for AI use is as essential as technological investment.

In summary, the role of artificial intelligence in transforming security in the Western Balkans is multidimensional. From cyber defense and border management to countering disinformation and forecasting crime, AI offers tangible opportunities to shift from reactive to predictive security. Yet realizing this potential requires sustained investment, strengthened regional cooperation, and close alignment with NATO and EU standards. Only through such measures can the Western Balkans construct a security architecture that is effective, ethical, and sustainable—turning AI from a potential risk into a strategic opportunity.

6. Strategic and Ethical Implications for the Western Balkans

The integration of artificial intelligence (AI) into security policies in the Western Balkans carries far-reaching implications that extend across strategic, ethical, and political dimensions. On one hand, AI is viewed as an instrument that enhances the capacity of small states to address challenges larger than those they could manage with traditional tools; on the other, its use without transparency and ethical safeguards risks reinforcing existing insecurities.

From a strategic perspective, AI offers regional states a way to compensate for their limited military power. Through predictive systems and risk-analysis tools, they can develop more effective mechanisms for crisis management and for countering hybrid threats. Horowitz (2018) emphasizes that for small states, AI is not a luxury but a strategic necessity for survival in an increasingly competitive international system. NATO statistics indicate that only four states in the region allocate more than 2% of GDP to defense (NATO, 2023), which makes investment in technology a more attainable path for strengthening security capacities.

Another strategic implication lies in regional and international relations. Both NATO (2022) and the European Union have identified emerging technologies as priority areas, making the adoption of AI not only a security issue but also a matter of political convergence with Euro-Atlantic standards. Albania and Montenegro, as NATO members, are better positioned, having already begun harmonizing national policies with the Alliance’s strategic concept. Kosovo, Bosnia and Herzegovina, and North Macedonia—despite facing internal challenges—can employ AI as a marker of modernization and as an argument in their pursuit of EU integration. However, the absence of a coordinated approach risks deepening regional fragmentation. For example, the *Balkan Barometer* (2023) reports that 68% of citizens believe their countries do not cooperate sufficiently on shared challenges, including cybersecurity.

Ethical implications are just as pressing as the strategic ones. O’Neil (2016) warns that the use of algorithms in security can result in unavoidable discrimination, particularly against vulnerable groups. In a region where ethnic tensions remain high, predictive policing could risk reinforcing stereotypes and undermining fragile reconciliation processes. Završnik (2020) further argues that the lack of transparency in AI deployment by justice and security institutions increases the likelihood of fundamental rights violations—a challenge especially acute for states aspiring to EU membership, where rule of law is a central requirement.

Another ethical dilemma lies in balancing privacy and security. Crawford (2021) notes that AI requires large-scale data collection, which raises the risk of mass surveillance. In the Western Balkans, where public trust in institutions is low—according to the *Gallup Balkan Monitor* (2022), only 32% of citizens express confidence in their governments—expanded surveillance without democratic safeguards could further erode institutional legitimacy.

In practice, ethical and strategic implications are deeply intertwined. AI-based tools for countering disinformation are essential for protecting democratic processes, yet if deployed without transparency, they may be perceived as censorship. A *Freedom House* (2023) survey found that 42% of citizens in the Western Balkans fear their governments might misuse digital technologies to restrict freedom of expression. Similarly, the use of AI in border monitoring can enhance security but, absent clear humanitarian standards, could lead to violations of migrants' rights. This concern is particularly relevant given that in 2023 more than 22,000 migrants crossed Albanian territory and over 70,000 passed through Bosnia and Herzegovina (Frontex, 2023).

In this sense, integrating AI into security policy in the Western Balkans requires three guiding principles. First, building national capacities through investment in education and technology to avoid full dependency on external providers. Second, developing regional cooperation mechanisms, since hybrid and cyber threats transcend borders. Third, ensuring the establishment of ethical and legal frameworks aligned with NATO and EU standards, so that AI is used as an instrument of democratic security rather than as a tool of authoritarian control.

In conclusion, the strategic and ethical implications of AI for the Western Balkans show that technology is never neutral: it can strengthen security and stability, but it can also generate new insecurities and tensions if used without transparency and democratic oversight. Only by combining the strategic with the ethical dimension, and by anchoring AI to Euro-Atlantic standards, can the Western Balkans construct a security concept that is sustainable, inclusive, and credible in the digital age.

7. Conclusions and Recommendations

The use of artificial intelligence (AI) in the security domain of the Western Balkans presents both remarkable opportunities and significant challenges. On the one hand, AI holds the potential to strengthen the capacities of small and fragile states, offering them tools to anticipate and mitigate threats that would otherwise exceed their traditional capabilities. On the other, it raises concerns related to weak institutions, fragmented regional cooperation, and the absence of clear ethical and legal frameworks. In a region characterized by institutional fragility, exposure to hybrid threats, and dependence on Euro-Atlantic integration processes, policy responses cannot be separated into isolated national or regional measures. Instead, they must be viewed as a whole—an architecture of security in which AI is deployed as an instrument of stability rather than as a source of further division.

At the national level, the first and most urgent recommendation is the development of dedicated strategies that explicitly connect AI with security. At present, most Western Balkan states lack such documents. Existing frameworks—such as Albania's *National Security Strategy* (Government of Albania, 2021)—mention cyber defense but stop short of articulating a broader vision of AI's role in forecasting risks, protecting critical infrastructure, and combating disinformation. This gap is especially concerning given that, according to a UNDP (2022) survey, 62% of public institutions in the region have faced cyberattacks within the past five years. Integrated strategies are therefore essential. They should establish not only how AI will be used but also under what conditions, with what safeguards, and in pursuit of which security objectives.

Another pressing national challenge lies in building human and technological capacities. The region suffers from a lack of local expertise and an overreliance on foreign technology providers, many of

which are linked to broader geopolitical agendas. The *Balkan Barometer* (2023) reports that only 19% of public universities in the region offer courses specifically dedicated to artificial intelligence. This shortage limits the preparation of future professionals who could bridge the gap between technology and security. Accordingly, universities and security academies should integrate specialized AI programs into their curricula. Public-private partnerships could also play a vital role in fostering local innovation and reducing dependence on external suppliers.

At the regional level, cooperation is indispensable. At present, each state tackles cyber and hybrid threats largely in isolation, even though such challenges are transnational by nature. A regional mechanism for joint monitoring and information-sharing—supported by AI-enabled tools for analyzing attack patterns and predicting future targets—would significantly improve resilience. A model could be drawn from the European Union’s *European Union Agency for Cybersecurity* (ENISA), but adapted to the particular realities of the Balkans. Migration management offers another field where regional collaboration is critical. The Western Balkans remain a major transit corridor for irregular migration, with Frontex reporting more than 100,000 illegal crossings along the Balkan route in 2023 alone. Coordinated AI-based surveillance and forecasting mechanisms could enable earlier interventions and more humane, effective management of flows that no single country can control on its own.

From a political and normative perspective, harmonization with NATO and EU standards is essential—not only in terms of technology but also in terms of ethics and the rule of law. For states aspiring to EU integration, such as Serbia, Kosovo, and Bosnia and Herzegovina, alignment with European legal and ethical frameworks is a prerequisite for accession. Without these safeguards, AI risks being used as a tool of authoritarian control, reinforcing the “stabilitocracy” phenomenon criticized in the literature (Bieber, 2018). To avoid this outcome, AI integration must be accompanied by strong guarantees for the protection of human rights and privacy. AI should be embedded within a democratic architecture of security, not positioned as a threat to it.

Equally important is the role of AI in enhancing transparency and public trust. In a region where institutional confidence remains low—only 34% of citizens in the Western Balkans express trust in their governments, according to the *Gallup Balkan Monitor* (2022)—the introduction of new technologies without independent oversight risks deepening skepticism. National or regional ethics boards dedicated to monitoring the use of AI in policing, justice, and security could reassure citizens that the technology is not being misused for mass surveillance or political control. Instead, AI must be presented and applied as a means of improving transparency, efficiency, and democratic legitimacy.

Looking more broadly, the evolution of the security concept in the Western Balkans—from the classical paradigm of deterrence to a more multidimensional approach—mirrors the political and technological transformations of the region. From the legacy of ethnic conflict and fragile democratization to new challenges such as hybrid warfare and disinformation, the region has undergone a transition in which security has expanded into a multi-layered phenomenon. Within this process, artificial intelligence has emerged as a new factor, facilitating a shift toward predictive security. In this paradigm, foresight and proactive risk management replace the traditional logic of fear and punishment.

The analysis has shown that AI is already reshaping how security is understood and practiced in the region. Its applications—ranging from cyber defense and border management to crime prevention, disinformation control, and humanitarian crisis management—demonstrate that it is no longer a secondary tool but an essential element of statecraft. Concrete examples, such as the 2022 cyberattack against Albania’s e-governance systems or disinformation campaigns in Kosovo and North Macedonia, reveal that modern threats cannot be addressed through military force alone. Rather, a

comprehensive security architecture is required—one that uses AI to anticipate and neutralize risks before they materialize.

From a strategic standpoint, AI offers small states an opportunity to offset their limited military and economic capacities. Investment in technology and human capital can provide a disproportionate advantage relative to their size, enabling them to “punch above their weight” in security affairs. This is particularly relevant for Albania, Montenegro, and North Macedonia, all NATO members expected to align with the Alliance’s priorities on emerging technologies (NATO, 2022). For Serbia, which straddles between East and West, AI could become a contested arena between Euro-Atlantic and Eurasian models, creating new dilemmas about its long-term orientation.

From an ethical perspective, the risks are as profound as the opportunities. Algorithmic discrimination, mass surveillance, and privacy violations are not hypothetical but real threats. In states where democracy remains fragile, such as Bosnia and Herzegovina and Kosovo, uncontrolled use of AI could harm civil liberties and strengthen authoritarian tendencies. This underscores the necessity of embedding every AI initiative within robust legal and institutional frameworks that align with EU and NATO standards.

Looking forward, the future of security in the Western Balkans will depend on two critical factors: convergence with Euro-Atlantic architectures and the ethical, democratic use of AI. On one side, integration into the EU and NATO offers institutional frameworks and common standards. On the other, domestic challenges—corruption, political polarization, and low public trust—remain serious obstacles. For this reason, regional cooperation and the collective use of AI to build resilience should be treated as priorities.

Ultimately, AI represents both a challenge and an opportunity for the Western Balkans. If adopted transparently, ethically, and in coordination with Euro-Atlantic partners, it can help transform the region from a perceived source of insecurity into a space of stability and democratic innovation. If not, it risks exacerbating fragmentation, authoritarianism, and mistrust. The choice lies in whether policymakers see AI merely as a technological fix or as a catalyst for building a more resilient, inclusive, and forward-looking security architecture for the digital age.

Bibliography

1. Bechev, D. (2019). *Russia's influence in Southeast Europe*. Routledge.
2. Bieber, F. (2018). The Western Balkans between stabilitocracy and democracy. *European Politics and Society*, 19(3), 317–330. <https://doi.org/10.1080/23745118.2018.1488620>
3. Brantingham, P. J., Valasik, M., & Mohler, G. O. (2018). Does predictive policing lead to biased arrests? Results from a randomized controlled trial. *Statistics and Public Policy*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.1080/2330443X.2018.1438940>
4. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. W. W. Norton & Company.
5. Buzan, B., Wæver, O., & de Wilde, J. (1998). *Security: A new framework for analysis*. Lynne Rienner Publishers.
6. Council of the EU. (2022). EU condemns cyberattack against Albania. <https://www.consilium.europa.eu>
7. Crawford, K. (2021). *Atlas of AI: Power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence*. Yale University Press.
8. Daalder, I., & O’Hanlon, M. (2000). *Winning ugly: NATO's war to save Kosovo*. Brookings Institution Press.
9. Fischer, B. J. (1999). *Albania at war, 1939–1945*. Hurst & Company.
10. Freedom House. (2023). *Freedom on the net 2023*. <https://freedomhouse.org>
11. Frontex. (2023). *Risk analysis for 2023*. European Border and Coast Guard Agency.
12. Gallup Balkan Monitor. (2022). *Insights and perception in the Western Balkans*. Gallup Europe.

13. Hoffman, F. (2007). Conflict in the 21st century: The rise of hybrid wars. Potomac Institute for Policy Studies.
14. Horowitz, M. C. (2018). Artificial intelligence, international competition, and the balance of power. *Texas National Security Review*, 1(3), 36–57.
15. Kaldor, M. (2012). *New and old wars: Organized violence in a global era* (3rd ed.). Stanford University Press.
16. Krasniqi, A. (2020). Small states and security challenges in the Western Balkans. *Journal of Balkan and Near Eastern Studies*, 22(4), 531–548. <https://doi.org/10.1080/19448953.2020.1761420>
17. Mearsheimer, J. J. (2001). *The tragedy of great power politics*. W. W. Norton & Company.
18. NATO. (2022). *Strategic concept 2022*. North Atlantic Treaty Organization. <https://www.nato.int/strategic-concept>
19. NATO. (2023). *Defence expenditure of NATO countries (2014–2023)*. <https://www.nato.int>
20. O’Neil, C. (2016). *Weapons of math destruction: How big data increases inequality and threatens democracy*. Crown.
21. Paris, R. (2001). Human security: Paradigm shift or hot air? *International Security*, 26(2), 87–102.
22. Pomerantsev, P. (2019). *This is not propaganda: Adventures in the war against reality*. PublicAffairs.
23. Puto, A. (2009). *Historia e diplomacisë shqiptare, 1912–1939*. Toena.
24. Qeveria e Shqipërisë. (2021). *Strategjia e sigurisë kombëtare*. Tiranë.
25. Rid, T., & McBurney, P. (2012). Cyber-weapons. *The RUSI Journal*, 157(1), 6–13. <https://doi.org/10.1080/03071847.2012.664354>
26. Singer, P. W., & Friedman, A. (2014). *Cybersecurity and cyberwar: What everyone needs to know*. Oxford University Press.
27. Topol, E. (2019). *Deep medicine: How artificial intelligence can make healthcare human again*. Basic Books.
28. UNDP. (1994). *Human development report 1994: New dimensions of human security*. Oxford University Press.
29. UNDP. (2021). *Digital governance in the Western Balkans*. United Nations Development Programme.
30. Waltz, K. (1979). *Theory of international politics*. Addison-Wesley.
31. Završnik, A. (2020). Criminal justice, artificial intelligence systems, and human rights. *ERA Forum*, 21(2), 243–257. <https://doi.org/10.1007/s12027-020-00602-0>

THE EFFECT OF RECUPERATOR INTEGRATION ON ORGANIC RANKINE CYCLE PERFORMANCE: AN ENERGY AND ECONOMIC ANALYSIS

Cenker AKTEMUR

Asst. Prof., Sivas University of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering,
Sivas, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9045-832X>

Barış KAVASOĞULLARI

Asst. Prof., Sivas University of Science and Technology, Department of Aerospace Engineering,
Sivas, Türkiye (Responsible Author) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6086-8923>

ABSTRACT

This study compares the thermodynamic and techno-economic performance of two Organic Rankine Cycle (ORC) configurations — a basic ORC and a recuperated ORC — to estimate the impact of adding a recuperator on system efficiency. The cycles were modelled using the Engineering Equation Solver (EES) software, with each unit and energy balance method applied to each constituent, and the area of the heat exchangers computed using the log mean temperature difference approach. The economic investigation considered correlations in the cost of purchasing equipment, Net Present Value (NPV), Levelised Cost of Electricity (LCOE), Payback Period (PP) and Savings-to-Investment Ratio (SIR). Eight commercially available and environmentally friendly working fluids — R1233zd(E), R1234ze(Z), n-pentane, isopentane, cyclopentane, n-hexane, isobutane and n-butane — were investigated under identical boundary conditions (source: 150 °C; sink: 25–35 °C). The recuperator layout increased the thermodynamic efficiency by 3–8% and reduced the specific evaporation heat by up to 8%, indicating better energy recovery. However, these enhancements came at the cost of a 20–30% increase in LCOE and a 12–15% decrease in NPV, due to the increase in capital cost. In terms of efficiency, cyclopentane achieved the highest value of $\eta \approx 0.161$, while n-pentane offered a balanced compromise between cost and performance. The results show that recuperation is technically superior for applications involving the recovery of low-grade heat; however, economic viability depends on the scale of the plant, the availability of a heat source and the capital cost profile.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Net Present Value, Levelised Cost of Electricity, Payback Period and Savings-to-Investment Ratio

1. INTRODUCTION

The global challenge of meeting rising energy demand while simultaneously mitigating greenhouse gas emissions has led to a search for technologies that can capture and convert low-grade thermal energy. Many industrial and geothermal processes generate low-temperature waste heat that is usually discarded. Recycling this thermal energy can increase the overall efficiency of systems and reduce their environmental impact (Ahmad et al., 2020; Muhumuza & Eames, 2022). The Organic Rankine Cycle (ORC) is a popular solution for such applications as it can function optimally with medium- and low-temperature heat sources using organic working fluids with suitable boiling and thermophysical properties (Moreira & Arrieta, 2019; Pilia et al., 2020). However, the precise efficiency of the simple ORC can be compromised for applications with minimal temperature sources or zero temperature ranges (Li et al., 2012; Sun et al., 2017). To mitigate these disadvantages, various enhanced ORC systems have emerged over time, including regenerative, reheat, multi-pressure,

transcritical and recuperative systems. These systems aim to optimise the interaction between the working fluid and the heat sources under specified working conditions, thereby maximising net power output or exergetic efficiency (Zhang et al., 2014; Guo et al., 2015). In the recuperative ORC (R-ORC), an internal heat exchanger (recuperator or internal heat exchanger, IHE) is located between the turbine exhaust and the pump discharge. This configuration enables temperature recovery from the turbine exhaust to preheat the working fluid prior to evaporation, improve thermal matching, and reduce the need for external heat inputs (Zhang et al., 2018; Javanshir et al., 2017). Some earlier numerical and experimental studies also suggest that internal temperature recovery can affect patterns of exergy destruction and design considerations for heat exchanger area and pinch points. Gains for a cycle can therefore depend greatly on the properties of the working fluid and the temperature profile of the hot source (Ma et al., 2018; Sun et al., 2017). The choice of working fluid remains at the centre of ORC design, particularly in the context of environmental control and lifecycle thinking. Numerous comparative studies in the literature demonstrate the impact of fluid characteristics (dry, isentropic and wet), critical temperatures and vapour densities on both first-law efficiency and auxiliary power requirements (Xu et al., 2016; Ma et al., 2018). Conversely, recent applications emphasise the use of lower-GWP working fluids as a substitute for high-GWP ones, as well as considering safety (flammability) and lifecycle emissions when selecting a working fluid (Tanbar et al., 2025). In addition to thermodynamics, system integration and techno-economic factors notably impact the economic viability of recuperative designs. Adding an IHE increases capital costs, raises the area of the heat exchanger and may also incur other pressure losses that influence net power. Thus, performance and cost analyses that incorporate both factors are required to estimate the value of efficiency improvements in terms of the allowable additional initial outlay (Feng et al., 2023; Kosmadakis & Neofytou, 2022). Some recent studies utilise composite thermodynamic and economic parameters (e.g. LEC, NPV and payback period) to provide balanced design recommendations for ORC applications in scenarios such as biomass, flue gas and geothermal power plants (Georgousopoulos et al., 2021; Feng et al., 2023).

This study compares and evaluates the economic and thermodynamic efficiencies of basic and recuperative ORC configurations under identical working conditions. Using low-GWP working fluids and a given waste heat input, the analysis evaluates the impact of recuperation on heat usage, thermal efficiency and economic parameters. The results provide a practical benchmark for optimising the sustainability and performance of ORC-based power generation technologies for use in low-temperature industrial and geothermal applications.

2. THERODYNAMIC MODELLING

2.1 System Description

The recuperated Organic Rankine Cycle (ORC) arrangement in Figure 1 improves upon the standard ORC by incorporating an internal recuperator (a regenerative heat exchanger), thereby increasing its overall thermal efficiency. Even after expansion by the turbine, the working fluid retains a comparatively high temperature. Rather than releasing all this heat into the condenser, some of it is recovered in the recuperator to preheat the pressurised liquid before it reaches the evaporator. Internal heat recovery means that less external heat needs to be supplied to the evaporator, thereby increasing cycle efficiency and reducing fuel or resource utilisation. The process flow can be outlined as follows:

1–2 (pump): The working fluid is accelerated from low to high pressure, with its enthalpy increasing slightly as a result of the work of the pumps.

2–3 (Preheating in recuperator): The pressurised liquid absorbs heat from the turbine exhaust in the recuperator, raising its temperature before entering the evaporator.

3–4 (Evaporator): The liquid is boiled off using an external source of heat (geothermal, solar, waste heat, etc.).

4–5 (Expander): The high-pressure vapour moves through a turbine, doing mechanical work which is converted to electricity by a generator.

5–6 (Recuperator cooling): The turbine exhausts the vapour, transferring some of its lingering heat to the pressurised liquid stream.

6–1 (Condenser): The condensed vapour is converted into liquid by shedding heat to the cooling medium, thus concluding the cycle.

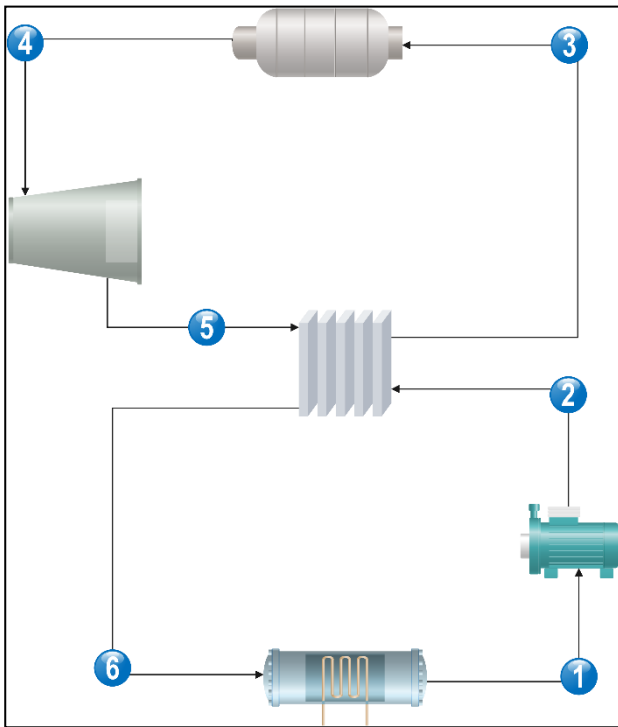


Figure 1. Schematic presentation of recuperated organic rankine cycle

2.2. Methodological Basis for Thermodynamic and Economic Evaluation

The thermodynamic and economic equations presented above were used to conduct the analysis in this study. These formulations are consistent with the methodologies employed by Elmaihy et al. (2023), Zare (2015), Baral and Šebo (2024) and van Santen and Blom (2023).

Pump (1→2)

$$h_{2s} = h(P_{\text{evap}}, s_1)$$

$$h_2 = h_1 + (h_{2s} - h_1) / \eta_{\text{pump}}$$

Pump work:

$$W_{\text{pump}} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Recuperator (2→3 cold side, 5→6 hot side)

Heat balance:

$$Q_{\text{rec}} = \dot{m}(h_3 - h_2) = \dot{m}(h_5 - h_6)$$

LMTD method:

$$A_{rec} = Q_{rec} / (U_{rec} \cdot \Delta T_{lm,rec})$$

$$\Delta T_{lm,rec} = ((T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)) / \ln((T_5 - T_3)/(T_6 - T_2))$$

Evaporator (3→4)

Heat absorbed:

$$q_{evap} = h_4 - h_3$$

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot q_{evap}$$

Heat exchanger area:

$$A_{evap} = Q_{evap} / (U_{evap} \cdot \Delta T_{lm,evap})$$

$$\Delta T_{lm,evap} = ((T_{hw,in} - T_4) - (T_{hw,out} - T_3)) / \ln((T_{hw,in} - T_4)/(T_{hw,out} - T_3))$$

Turbine (4→5)

$$h_{5s} = h(P_{cond}, s_4)$$

$$h_5 = h_4 - \eta_{turb}(h_4 - h_{5s})$$

Turbine work:

$$W_{turb} = \dot{m}(h_4 - h_5)$$

Condenser (6→1)

Heat rejected:

$$q_{cond} = h_6 - h_1$$

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot q_{cond}$$

Heat exchanger area:

$$A_{cond} = Q_{cond} / (U_{cond} \cdot \Delta T_{lm,cond})$$

$$\Delta T_{lm,cond} = ((T_6 - T_{cw,out}) - (T_1 - T_{cw,in})) / \ln((T_6 - T_{cw,out})/(T_1 - T_{cw,in}))$$

Net Power & Efficiency

$$W_{net} = W_{turb} - W_{pump}$$

$$\eta = W_{net} / Q_{evap}$$

Annual electricity generation:

$$E_{year} = W_{net} \cdot 8760 \cdot CF$$

Annual revenue:

$$REV = price_{el} \cdot E_{year}$$

Capital & Operating Costs

Purchase Equipment Cost (PEC) correlations:

$$PEC_{TG} = 10^{(2.6259 + 1.4398 \cdot \log_{10}(W_{turb}) - 0.1776 \cdot (\log_{10}(W_{turb}))^2)}$$

$$PEC_{PUMP} = 10^{(3.3892 + 0.0536 \cdot \log_{10}(W_{pump}) + 0.1538 \cdot (\log_{10}(W_{pump}))^2)}$$

$$PEC_{EVAP} = 10000 + 324 \cdot (A_{evap})^{0.91}$$

$$PEC_{COND} = 10000 + 324 \cdot (A_{cond})^{0.91}$$

$$PEC_{REC} = 10000 + 324 \cdot (A_{rec})^{0.91}$$

Direct capital cost:

$$CAPEX_{direct} = PEC_{TG} + PEC_{PUMP} + PEC_{EVAP} + PEC_{COND} + PEC_{REC}$$

Total investment:

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{direct} \cdot (1 + f_{BOP} + f_{cont})$$

Operating expenses:

$$\text{OPEX} = f_{\text{O\&M}} \cdot \text{CAPEX}_{\text{total}}$$

Capital Recovery Factor (CRF):

$$\text{CRF} = i(1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)$$

Levelized Cost of Electricity (LCOE):

$$\text{LCOE} = (\text{CRF} \cdot \text{CAPEX}_{\text{total}} + \text{OPEX}) / E_{\text{year}} \quad [\$/\text{kWh}]$$

Net Present Value (NPV):

$$\text{NPV} = -\text{CAPEX}_{\text{total}} + \sum (\text{CF}_{\text{ann}} / (1 + i)^t)$$

Payback Period (PB):

$$\text{PB} = \text{CAPEX}_{\text{total}} / (\text{REV} - \text{OPEX}) \quad [\text{years}]$$

Savings-to-Investment Ratio (SIR)

$$\text{SIR} = \sum (\text{CF}_{\text{ann}} / (1 + i)^t) / \text{CAPEX}_{\text{total}}$$

2.3 Input parameters and Assumptions

The economic and thermodynamic performances were determined by applying the input parameters given in Table 1. These were all taken from reputable scholarly articles and engineering databases to ensure uniformity and reproducibility. The thermodynamic operating conditions, such as the evaporator and condenser saturation temperatures (130 °C and 35 °C, respectively), were selected based on typical medium-temperature heat recovery cases, as validated in earlier work on the ORC (Walnum et al., 2011). Superheating (10 K) and subcooling (3 K) levels were adopted to optimise cycle stability and prevent condensation or vapour lock in the expander. The working fluid mass flow rate was set to 0.4 kg/s, in line with the base case capability of a small-scale ORC package. The heat exchanger parameters were determined using reliable online engineering sources (EngineeringPage, n.d.), with the overall heat transfer coefficients being found to be 1.2 kW/m²·K, 0.6 kW/m²·K and 0.3 kW/m²·K for the condenser, evaporator and recuperator respectively. The recuperator effectiveness was set to 0.8, which is typical for compact plate heat exchangers used in low-enthalpy cycles. Regarding system performance, Baldasso et al. (2017) gave the isentropic pump and turbine efficiencies as 0.75 and 0.80, respectively. Additionally, CF was set to 0.90, corresponding to stable geothermal or industrial waste heat conditions (Stefánsson, 2002). The system lifetime was given as 20 years (Rubio-Maya et al., 2016), with a discount rate of 11% (i rate), which is typical of investment conditions in renewable energy projects. Economic considerations comprised a market-oriented electricity selling price (P_{elec}) of 0.12 USD/kWh based on current market information, an operation and maintenance (O&M) cost fraction (f_{O&M}) of 3% (Rubio-Maya et al., 2016) and a balance-of-plant (BOP) cost fraction (f_{BOP}) of 15% (NETL, 2021). Finally, the contingency cost fraction (f_{cont}) was set at 8%, in line with costing estimation practices put forward by Rubin (2016) and frequently implemented in the techno-economics of ORC studies. Together, these assumptions provide a realistic, literature-based framework for calculating the thermodynamic and economic performance of basic and recuperated ORC systems.

Table 1. Thermodynamic and economic input parameters and assumptions used for the basic and recuperated ORC analyses.

Symbol	Value	Unit	Reference
T _{evap,sat}	130	°C	This study
T _{cond,sat}	35	°C	This study
SH _{evap}	10	K	Walnum et al. (2011)
SC _{cond}	3	K	Walnum et al. (2011)
$\dot{m}$	0.4	kg/s	This study
T _{cw,in}	25	°C	This study
T _{cw,out}	35	°C	This study
U _{cond}	1.2	kW/m ² ·K	EngineeringPage (n.d.)
U _{evap}	0.6	kW/m ² ·K	EngineeringPage (n.d.)
U _{rec}	0.3	kW/m ² ·K	EngineeringPage (n.d.)
ε_{rec}	0.8	-	This study
η_{pump}	0.75	-	Baldasso et al. (2017)
η_{turb}	0.80	-	Baldasso et al. (2017)
CF	0.90	-	Stefánsson (2002)
n _{years}	20	years	Rubio-Maya et al. (2016)
i _{rate}	0.11	-	This study
P _{elec}	0.12	USD/kWh	This study
f _{O&M}	0.03	-	Rubio-Maya et al. (2016)
f _{BOP}	0.15	-	NETL (2021)
f _{cont}	0.08	-	Rubin (2016)

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Figures 2 through 7 illustrate the comparative technological, economic and thermodynamic results of both the base Organic Rankine Cycle (ORC) configurations and their recuperated counterparts in depth. These figures effectively delineate the subtle trade-off between increased efficiency and overall economic feasibility when a recuperator is integrated into the operating cycle.

Figure 2 shows how the specific evaporation heat varies for conventional and recuperated Organic Rankine Cycle (ORC) configurations using different working fluids. The recuperated configuration consistently exhibits lower specific evaporation heat values than the conventional configuration, reflecting improved thermal efficiency due to internal warming/recuperation measures. The reduction varies from around 4% to 8%, with the maximum reduction occurring with n-pentane and isopentane. This finding indicates that the working fluid is effectively preheated as it enters the recuperator, thereby reducing the need for additional external heating. Working fluids such as R1233zd(E) and R1234ze(Z) require the least heating (approximately 245 kJ/kg), making them suitable for applications involving limited energy sources at reduced temperatures. In contrast, cyclopentane and n-hexane require additional heating due to their elevated latent heat of vaporisation.

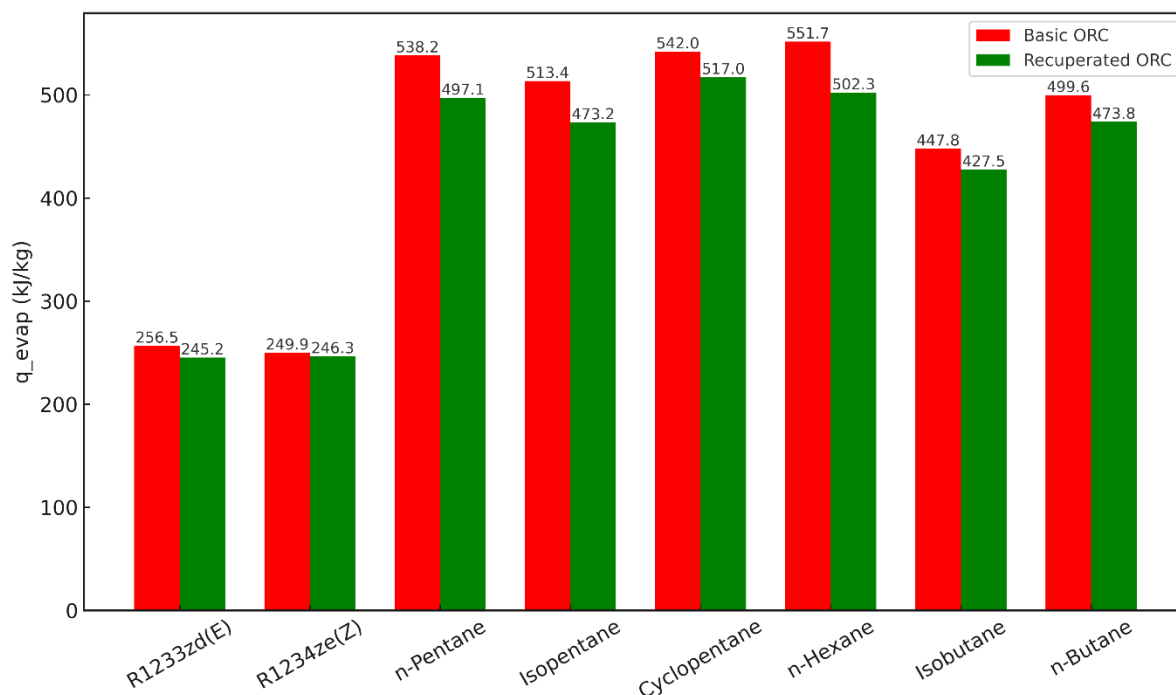


Figure 2. The variation of specific evaporation heat using different type of working fluids

Figure 3 shows the thermal efficiencies of the two configurations using seven different working fluids. For all the analysed fluids, the recuperated Organic Rankine Cycle (ORC) is more efficient than the conventional ORC, demonstrating the positive effects of internal heat recuperation. The recuperator facilitates the reuse of some of the heat energy from the turbine's exhaust stream to heat the compressed liquid prior to its entry into the evaporator. This decreases the external heat demand and curbs exergy loss. An improvement in efficiency of between 4% and 6% is observed, depending on the specific working fluid. The highest efficiency corresponds to cyclopentane at 0.161, followed successively by n-hexane at 0.153 and n-pentane at 0.151. This shows that hydrocarbons with high critical temperatures are the most effective working fluids in medium-temperature cycles. However, the efficiency of isobutane and n-butane is below 0.145, mainly due to their low boiling points inducing high condenser pressures and smaller temperature differences across the heat exchangers, thus inhibiting energy recuperation.

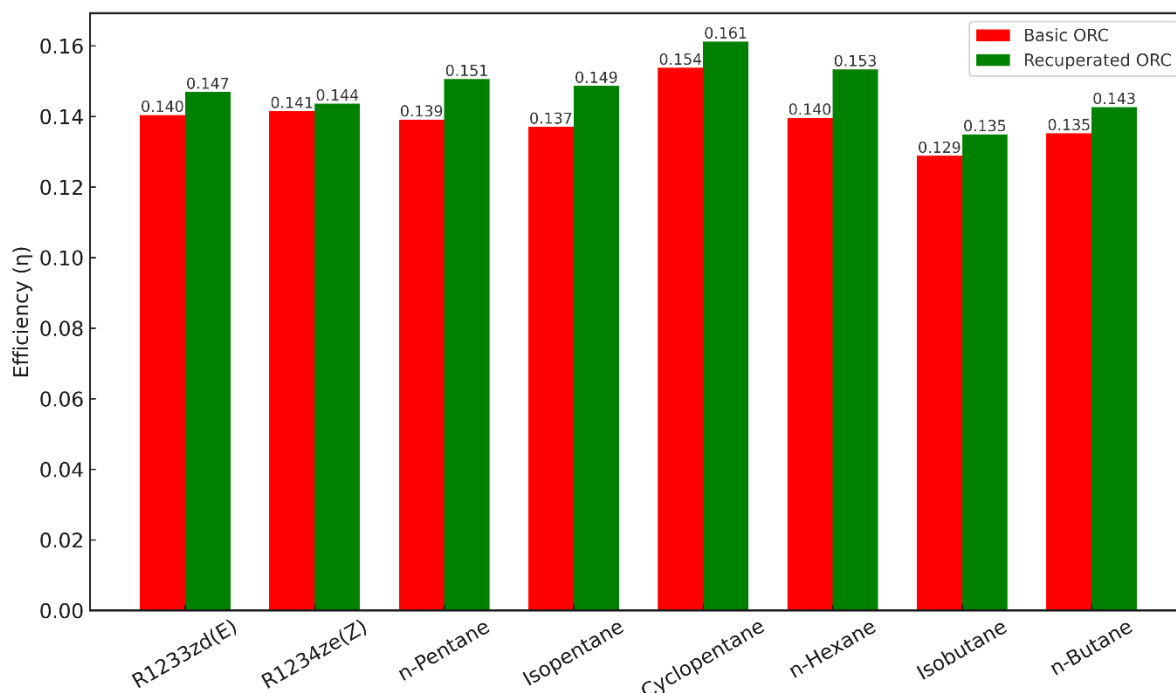


Figure 3. The variation of thermal efficiency using different type of working fluids

Figure 4 presents a comparative analysis of the Levelised Cost of Electricity (LCOE) for both systems. The recuperated ORC typically exhibits marginally higher LCOE values due to the additional costs incurred by the recuperator and the longer payback period associated with a greater capital investment. Despite its lower efficiency, the basic ORC continues to deliver lower electricity costs thanks to its simpler design and reduced equipment requirements. The minimum LCOE, quantified at \$0.039/kWh, is achieved with cyclopentane, whereas the maximum costs are associated with the environmentally benign refrigerants R1233zd(E) and R1234ze(Z), rising to \$0.087/kWh. These results imply that, while next-generation low-global warming potential (GWP) fluids are thermodynamically feasible, they are not as economically competitive due to higher market prices and reduced thermal efficiencies at intermediate temperature levels.

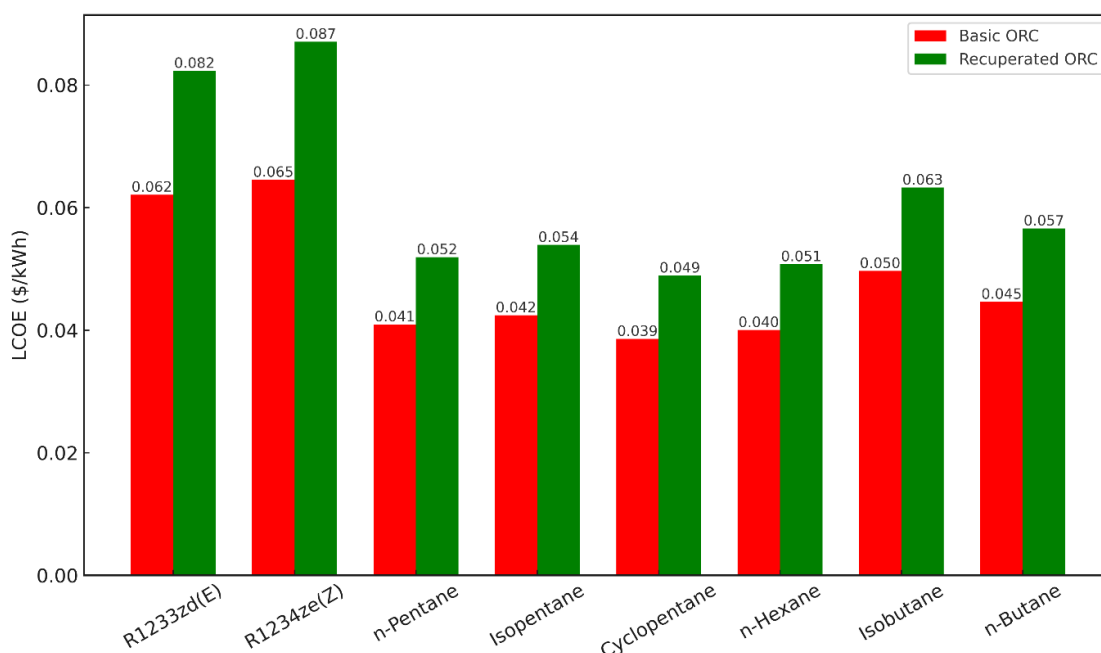


Figure 4. The variation of Levelised Cost of Electricity using different type of working fluids

Figure 5 shows the Net Present Value (NPV) of the two layouts, which is a critical economic parameter needed to estimate project profitability. For all working fluids, the Organic Rankine Cycle (ORC) always achieves a higher NPV, confirming that installing an additional recuperator decreases the overall return on investment. For example, the NPV of the cyclopentane-fired ORC is approximately 170,494 USD, whereas the recuperated ORC yields 148,803 USD. Similarly, in the cases of n-pentane and isopentane fuels, installing a recuperator reduces the NPV by about 13–15%. Although increased efficiency enhances energy consumption, these efforts cannot offset the increase in equipment costs under the above economic conditions (interest = 11%, lifetime = 20 years).

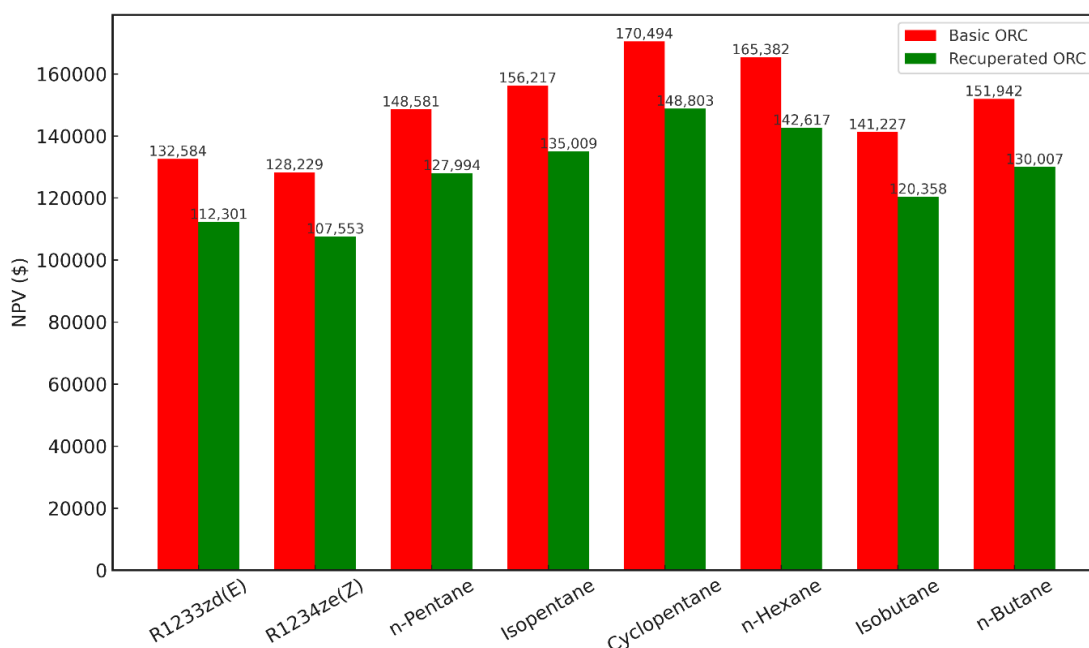


Figure 5. The variation of Net Present Value using different type of working fluids

Figure 6 shows the results of the Savings-to-Investment Ratio (SIR) analysis, which highlights the economic patterns identified in the NPV analysis. The SIR values demonstrate greater investment performance for the basic ORC across all working fluids. Specifically, the SIR for cyclopentane in the basic ORC is 3.62, compared to 2.80 for the recuperated system. Furthermore, fluids such as n-pentane and n-hexane consistently exhibit SIR values in excess of 3 in the basic configuration, thereby affirming their significant economic viability.

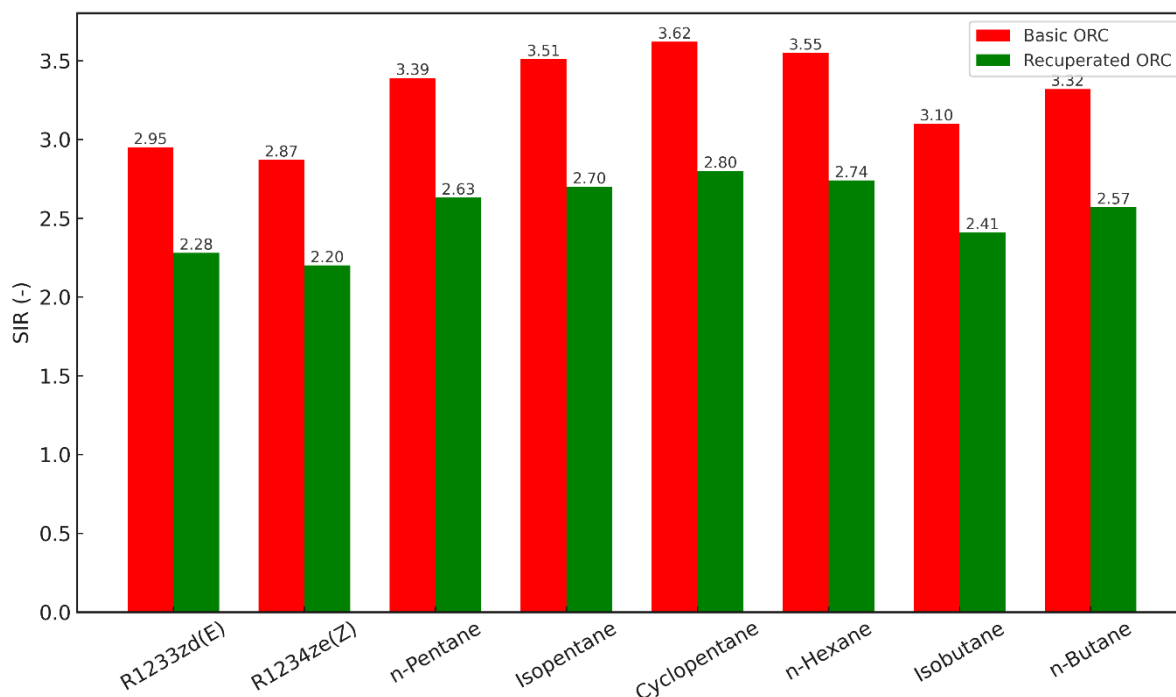


Figure 6. The variation of Savings-to-Investment Ratio using different type of working fluids

Figure 7 shows the payback period (PB) results for the base and recuperated ORC systems. The payback period is the time needed for the system to recover the full investment through the revenue stream. As can be seen, the base ORC always has a shorter payback period than the recuperated ORC under all working fluids, highlighting the increased economic feasibility under the considered assumptions. Although the addition of the recuperator increases thermal efficiency, it also leads to a higher initial system cost and thus increases the time needed for investment recovery. For example, R1233zd(E) and R1234ze(Z) have the longest payback periods in the recuperated system, at around 4.01 and 4.15 years respectively, due to their relatively high equipment cost and moderate thermal gains. Conversely, cyclopentane, n-hexane and isopentane demonstrate the shortest payback periods, ranging from 2.20 to 2.95 years, indicating their significant potential for use in medium-temperature heat recovery applications.

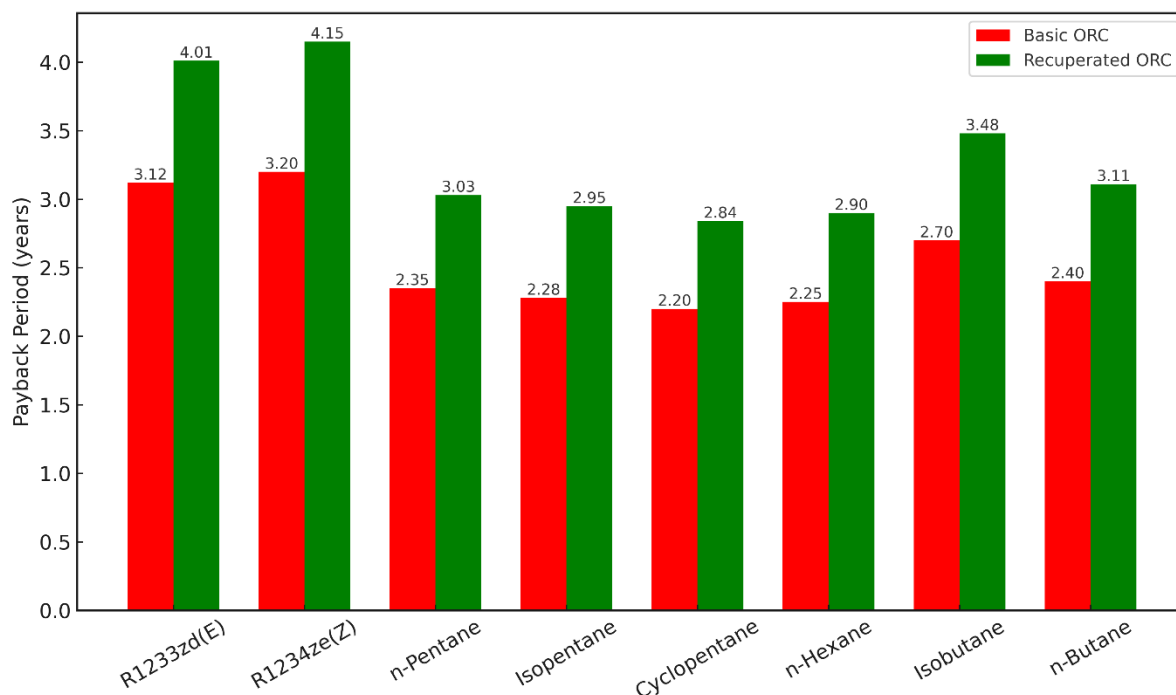


Figure 7. The variation of Savings-to-Investment Ratio using different type of working fluids

CONCLUSION

A detailed thermodynamic and techno-economic comparison of recuperated and base ORC systems revealed a clear quantitative trade-off between cost and performance. Adding a recuperator increased the thermal efficiency of all working fluids by 4–6%, raising the average base level of 0.139–0.154 in the base ORC to the recuperated level of 0.144–0.161. However, this thermodynamic advantage was offset by an 8–20% increase in the LCOE, with the average levelised cost of electricity rising from 0.045 \$/kWh in the base ORC to 0.053 \$/kWh in the recuperated ORC.

From an investment perspective, the NPV levels decreased substantially — by almost 15–20% — for all fluids when the recuperator was considered. For instance, the NPV of cyclopentane decreased from 170,494 \$ (base ORC) to 148,803 \$; similarly, values decreased for n-pentane and isopentane. Also, SIR values decreased by approximately 0.6–0.8, indicating lower profitability. Similarly, payback time increased by around 0.8–1.0 years, rising from a base level of approximately 2.6 years in the base case system to around 3.5 years in the recuperated system.

Of the working fluids considered, cyclopentane had the highest efficiency (0.161) and the lowest levelised cost of electricity (0.039 \$/kWh), as well as achieving the best economic equilibrium. This was followed by n-hexane and n-pentane. Conversely, R1233zd(E) and R1234ze(Z) exhibited high costs and long payback periods despite their environmental benefits.

In summary, although recuperation increases energy use, the fundamental ORC remains economically favourable for small- and medium-scale plants due to low capital expenditure and rapid revenue recovery. A recuperated design is potentially viable on a large scale or in continuous production operations, where the long-term efficiency gains outweigh the increased expense.

KAYNAKLAR

- Ahmad, T., & Zhang, D. (2020). *A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand*. Energy Reports, 6, 1973–1991.
- Baldasso, E., Andreasen, J. G., Meroni, A., & Haglind, F. (2017). Performance analysis of different Organic Rankine Cycle configurations on board LNG-fuelled vessels. Proceedings of ECOS 2017.
- Baral, S., & Šebo, J. (2024). Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems. Heliyon, 10(4), e25718.
- Elmaihi, A., Rashad, A., Elweteedy, A., & Nessim, W. (2023). Energy and exergy analyses for organic Rankine cycle driven by cooling water of passenger car engine using sixteen working fluids. Energy Conversion and Management: X, 20, 100415.
- EngineeringPage. (n.d.). Typical Overall Heat Transfer Coefficients. Retrieved 2025 from <https://www.engineeringpage.com>
- Feng, J. S., Pei, G., Dong, H., & others. (2023). *Thermodynamic and techno-economic investigation of basic and regenerative organic Rankine cycles for industrial flue gas waste heat recovery*. Case Studies in Thermal Engineering, 52, 103816.
- Georgousopoulos, S., et al. (2021). Thermodynamic and techno-economic assessment of pure and zeotropic fluid ORCs for waste heat recovery in a biomass IGCC plant. Applied Thermal Engineering, 183, 116202.
- Guo, C., Du, X., Yang, L., Yang, Y. (2015). Organic Rankine cycle for power recovery of exhaust flue gas. Applied Thermal Engineering, 75, 135–144.
- Javanshir, A., Sarunac, N., Razzaghpanah, Z. (2017). Thermodynamic analysis of a regenerative ORC using dry fluids. Applied Thermal Engineering, 123, 852–864.
- Kosmadakis, G., & Neofytou, P. (2022). Reversible high-temperature heat pump/ORC for waste heat recovery in various ships: a techno-economic assessment. Energy, 256, 124634.
- Li, Y. R., Wang, J. N., & Du, M. T. (2012). Influence of coupled pinch point temperature difference and evaporation temperature on performance of ORC. Energy, 42, 503–509.
- Ma, W. W., Liu, T., Min, R., & Li, M. (2018). Effects of physical and chemical properties of working fluids on thermodynamic performances of medium-low temperature ORCs. Energy Conversion and Management, 171, 742–749.
- Moreira, L. F., & Arrieta, F. R. P. (2019). Thermal and economic assessment of ORCs for waste heat recovery in cement plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 114, 109315.
- NETL (U.S. DOE). (2021). Cost Estimation Methodology for NETL Assessments of Power Plant Performance (QGESS). U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
- NIST Chemistry WebBook. (1998). Thermophysical properties of water. National Institute of Standards and Technology.
- Ochoa, G., Quoilin, S., & Lemort, V. (2015). Review of ORC architectures for waste heat recovery. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 448–461.
- Pilia, R., García Martínez, L., Wieland, C., Spliethoff, H. (2020). Techno-economic potential of waste heat recovery from German energy intensive industry with ORC technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110324.
- Rubin, E. S. (2016). An assessment of the NETL cost estimation methodology. Carnegie Mellon University.

- Rubio-Maya, C., Romero-Romo, M., Belman-Flores, J. M., & Uresti-Delgado, D. (2016). Thermo-economic optimization of organic Rankine cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1–10.
- Stefánsson, V. (2002). Investment cost for geothermal power plants. *Geothermics*, 31(2), 263–272.
- Sun, W. Q., Yue, X. Y., & Wang, Y. H. (2017). Exergy efficiency analysis of ORC and ORC-based combined cycles driven by low-temperature waste heat. *Energy Conversion and Management*, 135, 63–73.
- Tanbar, F., Febriyanto, R., Ariyadi, H. M., Nugraha, A. D., et al. (2025). *Techno-economic studies of low-GWP ORC for low-level geothermal waste heat utilization in remote island of Indonesia*. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105385.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2025). Electric Power Monthly: Average price of electricity to ultimate customers by sector. Washington DC.
- van Santen, W., & Blom, M. (2023). ORC power plants for thermal energy harvesting: Aspects related to policy, finance and the job market. CE Delft. Retrieved from https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2024/02/CE_Delft_230206_ORC_Plants_for_Thermal_Energy_Harvesting_Def.pdf
- Walnum, H. J., Neksa, P., Andresen, T., & Eikevik, T. (2011). Off-design operation of ORC and CO₂ power production cycles for low-temperature surplus heat recovery. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 6(2), 134–141.
- Zare, V. (2015). A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants. *Energy Conversion and Management*, 105, 127–138.
- Zhang, C., Liu, C., Xu, X. X., Li, Q. B., Wang, S. K., Chen, X. (2018). Effects of superheat and internal heat exchanger on thermo-economic performance of ORC based on fluid type and heat sources. *Energy*, 159, 482–495.
- Zhang, J., Zhang, H. G., Yang, K., Yang, F. B., Wang, Z., Zhao, G. Y., et al. (2014). Performance analysis of regenerative ORC using pure working fluid and zeotropic mixtures. *Energy Conversion and Management*, 84, 282–294.

AFYONKARAHİSAR İLİ BİR TURİZM BÖLGESİNDEKİ SU KAYNAKLI ISI POMPASI UYGULAMASI

Ertan BUYRUK

Prof. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas-Türkiye (Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0002-6539-7614

Deniz GÖLBAŞI

Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas-Türkiye ORCID: 0000-0003-0080-9996

Mustafa CANER

Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas-Türkiye ORCID: 0000-0002-3674-7881

Yaren Su AĞBABA

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas-Türkiye ORCID: 0009-0007-8808-3929

Özet

Günümüzde hızla artan nüfus, enerji talebinde de paralel bir artışa yol açmaktadır. Söz konusu talep halen büyük ölçüde fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Yoğun fosil yakıt kullanımı hem rezervlerin giderek tükenmesine hem de kullanım sırasında yoğun karbon salınımı ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, küresel ısınmanın hızlanmasına neden olmaktadır. Fosil yakıt temelli enerji üretiminin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak ve enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla alternatif teknolojiler geliştirilmektedir. Isı pompaları, doğal çevrede yer alan hava, su ve toprak gibi düşük sıcaklıklı enerji kaynaklarından yararlanarak, yüksek enerji verimliliğiyle ısıtma ve soğutma imkânı sunan yenilikçi sistemlerdir. Isı pompasının performansı doğrudan kullanılan kaynağın ısı enerjisi ve kaynağın türü ile ilgilidir. Kaynaklara bakıldığında ise havaya göre su ve toprak yıl boyu daha kararlı sıcaklık değerlerindedir. Bu da su ve toprak kaynaklı ısı pompalarını hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha verimli olmasını sağlamaktadır. Toprak kaynaklı ısı pompalarında; toprağın nem oranı, türü (kil, kum vb.), ısı iletkenliği, yoğunluğu, derinliğe bağlı sıcaklığı, yer altı su seviyeleri, toprak yapısındaki mevsimsel değişimler ve borulama derinliği ile düzeni sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Su kaynaklı ısı pompalarında ise su sıcaklığı, suyun debisi, suyun derinliği, kimyasal ve biyolojik özellikleri, akış rejimi, suyun mevsimsel sıcaklık değişimi ve su kaynağının sürekliliği sistem verimini belirleyici faktörlerdir. Bu nedenle jeotermal sular gibi yüksek sıcaklıklı suların kaynak olarak kullanılması su kaynaklı ısı pompasının verimini artırmaktadır. Bu çalışmada, Afyonkarahisar ilinde bulunan bir termal tatil köyünün jeotermal havuzlarından deşarj edilen atık sudan yararlanılarak su kaynaklı ısı pompası ile gerçekleştirilen ısıtma ve soğutma uygulamaları incelenmiştir. İnceleme sonuçları, jeotermal sahalarda bulunan büyük ölçekli tesislerde ısı pompası kullanımının enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Buna ek olarak ısı pompalarının karbon emisyonlarının düşük olması çevreci ve sürdürülebilir bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su kaynaklı ısı pompası, Jeotermal enerji, Atık ısı geri kazanımı

WATER SOURCE HEAT PUMP APPLICATION IN A TOURISM REGION IN AFYONKARAHİSAR PROVINCE

Abstract

Today's rapidly growing population is leading to a parallel increase in energy demand. This demand is still largely met by fossil fuels. The intensive use of fossil fuels is leading to the depletion of reserves and significant carbon emissions during their use. This situation is accelerating global warming. Alternative technologies are being developed to mitigate the negative environmental impacts of fossil fuel-based energy production and to enhance energy efficiency. Heat pumps are innovative systems that utilize low-temperature energy sources found in the natural environment, such as air, water, and soil, to provide heating and cooling with high energy efficiency. The performance of a heat pump is directly related to the heat energy of the source used and the type of source. When examining the sources, water and soil exhibit more stable temperature values throughout the year compared to air. This makes water and soil-source heat pumps more efficient than air-source heat pumps. In ground-source heat pumps, the moisture content of the soil, its type (clay, sand, etc.), thermal conductivity, density, temperature at depth, groundwater levels, seasonal changes in soil structure, and the depth and layout of the piping directly affect system performance. In water-source heat pumps, the following factors determine system efficiency: water temperature, water flow rate, water depth, chemical and biological properties, flow regime, seasonal temperature variation of the water, and the continuity of the water source. Therefore, the use of high-temperature water sources such as geothermal water increases the efficiency of water-source heat pumps. This study examines heating and cooling applications using a water-source heat pump powered by wastewater discharged from the geothermal pools of a thermal resort in Afyonkarahisar province. The study results determined that the use of heat pumps in large-scale facilities located in geothermal fields significantly reduces energy consumption. In addition, the low carbon emissions of heat pumps make them an environmentally friendly and sustainable solution.

Keywords: Water source heat pump, Geothermal Energy, Waste heat recovery

Giriş

Nüfusun artmasıyla her geçen gün gelişen kentleşme enerji talebinde artışa neden olmaktadır. Enerji ihtiyacı halen büyük ölçüde fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanmaktadır (Url-1). Ancak fosil yakıtların rezervlerinin azalması ve kullanımı sırasında yoğun karbon salınımı nedeniyle küresel ısınmaya etkisinin yüksek olması çevresel sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bağlamda ülkeler Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası çevre politikaları ile yenilenebilir enerji kaynaklarının ve yüksek enerji verimliliğine sahip teknolojilerin kullanımını teşvik etmiştir (Güner ve Turan, 2017). Çevresel etkileri azaltmaya ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik bu gelişmeler, ısı pompaları gibi yenilikçi ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesini mümkün kılmıştır.

Isı pompaları, hava, su ve topraktan aldığı ısı enerjisini kullanarak ısıtma ve soğutma yapabilen yüksek enerji verimliliğine sahip sistemlerdir. Isı pompalarının genel çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilmektedir: Isıtma modunda sistem kaynaktan aldığı düşük sıcaklıktaki ısı enerjisini daha yüksek sıcaklığa getirerek enerjiyi ortama transfer etmektedir. Soğutmada ise bu döngünün tam tersi olup ortamdaki ısı enerjisini kaynağa veya dış ortama iletmektedir gerektirir (Çengel ve Boles, 2011).

Küresel ölçekte kullanım oranlarına bakıldığında hava kaynaklı ısı pompası kullanımı su ve toprak kaynaklı ısı pompasına göre daha düşük ilk yatırım maliyetleri, kurulum kolaylığı nedenleriyle daha

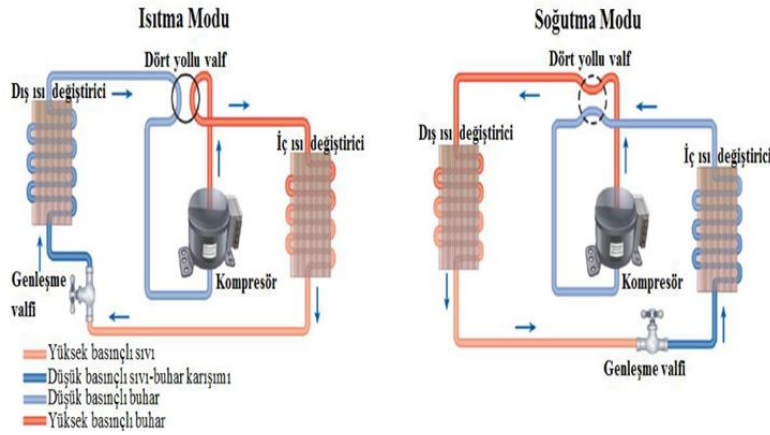
yaygın olduğu görülmektedir. Fakat su ve toprağın yıl boyunca kararlı sıcaklık değerinde olması su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının en önemli avantajı haline gelmektedir. Bu avantaj söz konusu sistemlerin hava kaynaklı ısı pompasına göre daha yüksek verime sahip performans sunmalarını sağlamaktadır. Özellikle jeotermal potansiyeli yüksek bölgelerde, büyük ölçekli yapılar veya endüstriyel tesislerde su ve toprak kaynaklı ısı pompaları tercih edildiği durumda ciddi derecede enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Wu, 2009; Ren, 2025). Dünyada ve ülkemizde de böyle uygulamalar yer almaktadır. Kalkan ve Kaya (2019) yaptıkları çalışmada 80 m² alana sahip bir ortamı bir su kaynaklı ısı pompası ile ısıtmışlardır. Su kaynağı olarak yeraltı suyunu tercih etmişlerdir. Evaporatör su debisi, kondenser su debisi ve Fan-coil hava debisi belirli değerlerde sabitlenip 9 farklı senaryoda ölçümler alınmıştır. En yüksek değerlerin olduğu koşulda ısı pompasının COP değeri 4.27, tüm sistemin COP değeri 2.92 ve ısıtma kapasitesi 14.32 kW sonuçlarına ulaşmışlardır. Yeraltı suyu kalitesi ve sıcaklığına bakıldığında yeraltı suyu kaynaklı ısı pompasının Erzincan ili için uygulanabilir olduğu kanısına varmışlardır. Çavuş ve Usta (2015) bir ısı pompası sistemi hazırlamışlardır. Yaptıkları çalışmada ısı pompası sisteminde kullanılacak soğutucu akışkan R404a olarak belirlemişlerdir. Ek olarak evaporatör yerine 1,71 m² güneş kolektörü kullanmışlardır. Kondenser 40 litrelik bir su kabına yerleştirilmiş ve ısı pompasıyla kış koşullarında sıcak su elde etmek için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında su sıcaklığının 44.6 °C'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Isı pompasının COP değeri ise 2,19 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında tasarlanan bu sistemin kullanım sıcak suyu ve yerden ısıtma sistemlerinde kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Caner vd. (2019) yatay toprak kaynaklı ısı pompasının Sivas ili iklim koşullarında çalışma performansını araştırmak için Sivas Cumhuriyet Üniversitesi kampüsünde kurulmuş olan enerji evine yatay toprak kaynaklı ısı pompası sistemi uygulamışlardır. Yapılan çalışmada, toprak sıcaklıklarının derinlikle doğrusal oranda artması ve hem dış ortam hem de iç ortam sıcaklıklarının değişkenlik göstermesi nedeniyle, ısı pompası için 1,96–2,3; sistem için ise 1,7–1,99 arasında COP değerleri elde edilmiştir. Yerdesh vd. (2022) Kazakistan'daki hava koşulları altında toprak kaynaklı ısı pompası tabanlı bir ısıtma sistemi geliştirmek ve termodinamik performansını değerlendirmek için deneysel ve teorik araştırmalar yürütmüşlerdir. Yerden ısıtılmalı ısı değiştirici ve R134a soğutucu akışkan ile entegre edilen sudan suya bir ısı pompası ısıtma sistemini sıcak su sağlayarak ortamın ısıtma gereksinimlerini karşılamak için tasarlamışlardır. Isı pompası sisteminin performans katsayısının öngörülen değerleri ile deneysel sonuçlar %6,2 oranında iyi bir uyum içinde olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca ısı pompası sistemini R152a, R450A, R513A, R1234yf ve R1234ze gibi diğer soğutucu akışkanlar kullanarak termodinamik performansını iyileştirmek için incelemişlerdir.

Sunulan bu çalışmada ise, Afyonkarahisar ili İhsaniye ilçesinde bulunan Grand Özgül Termal Tatil Köyü'nde uygulanan su kaynaklı ısı pompası sistemi ele alınmış; sistemin tasarımı, çalışma prensipleri, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından performansı değerlendirilmeleri yapılmıştır.

Uygulama

Isı pompaları, kaynak olarak hava, su ve toprağı kullanan termodinamik sistemlerdir. Düşük sıcaklıktaki çevresel bir kaynaktan alınan ısı enerjisi evaporatör aracılığıyla soğutucu akışkana aktarılmakta ve böylece soğutucu akışkan buharlaşarak gaz fazına geçmektedir. Daha sonra buhar fazındaki soğutucu soğutucu akışkan bir kompresör yardımıyla sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılmaktadır. Yüksek sıcaklık ve basınca ulaşan soğutucu akışkan kondenserden geçerken ısını ortama aktarmakta ve yoğunlaşarak, sıvı fazına geçmektedir. Sıvı fazındaki soğutucu akışkan genleşme valfinden geçerek basıncı ve sıcaklığı düşürülerek başlangıç koşullarına geri döndürülmekte ve çevrim bu şekilde tekrarlanmaktadır. Isı pompası sistemi içinde yer alan dört yollu vana kullanılarak akışkan yönünün değiştirilmesiyle soğutma sistemine dönüşmektedir. Isı pompasının ısıtma ve

soğutma süreçlerindeki çalışma prensipleri Şekil 1’de şematik olarak gösterilmektedir (Çengel ve Boles, 2011)



Şekil 1. Isı pompasının genel çalışma prensibi (Çengel ve Boles, 2011)

Toprak ve su kaynaklı ısı pompaları, kış mevsiminde toprakta veya suda (nehir, göl, atık su vb.) depolanmış ısı enerjisini iç ortama aktarmakta, yaz mevsiminde ise ortamdan aldığı ısıyı toprağa veya suya transfer etmektedir. Başka bir ifadeyle, toprak ve su kışın bir ısı kaynağı, yazın ise bir ısı kuyusu görevi üstlenmektedir. Benzer şekilde hava da aynı işlevselliğe sahiptir.

Isı pompası sistemlerinin kararlı ve verimli çalışabilmesi için, kaynak veya kuyunun sıcaklığının zaman içerisinde büyük dalgalanmalar göstermemesi gerekmektedir. Bu nedenle, ısı pompasının kurulacağı bölgenin coğrafi koşulları sistemin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Isı pompasının performansı, aynı zamanda kullanılan ısı kaynağına bağlı olarak da farklılık göstermektedir.

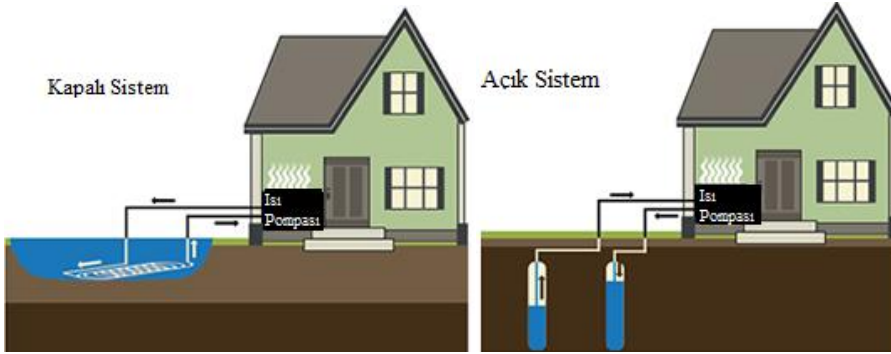
Kullanılabilecek ısı kaynakları arasında hava, erişilebilirlik açısından kolay olması ve kurulum maliyetlerinin görece düşük olması nedeniyle en yaygın tercih edilen kaynaktır. Ancak, aynı iklim koşullarında toprak ve su kaynaklı ısı pompaları, hava kaynaklı ısı pompalarına göre kıyasla daha yüksek verime sahiptir. Kış aylarında hava sıcaklığının düşük ve dalgalı seyretmesi, hava kaynaklı ısı pompalarının performansını düşürmekte ve dolayısıyla enerji tüketimini artırıp verimi azaltmaktadır. Buna karşılık, yer altı toprak tabakalarının ve belirli su rezervuarlarının sıcaklığı yıl boyunca daha sabit ve hava sıcaklığına kıyasla daha yüksek değerlerde seyretmekte, bu da toprak ve su kaynaklı sistemlere performans açısından avantaj sağlamaktadır (Bilen ve Demir, 2021).

Su kaynaklı ısı pompaları kaynak olarak nehir, göl, şehir şebekesi, gri su veya jeotermal su kullanmaktadır. Su kaynaklı ısı pompaları açık sistem ve kapalı sistem olarak iki farklı şekilde uygulanmaktadır.

Açık sistem uygulamalarında bazı kritik mühendislik ve çevresel faktörler dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle kaynak olarak kullanılacak suyun içerdiği mineraller, çözünmüş gazlar ve partiküller sistemde korozyon, kirlenme, tıkanma ve verim kaybı gibi sorunlara neden olabilmektedir. Bu nedenle su kalitesi sistem güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir parametredir. Ayrıca, su kütlesinin hacimsel olarak yeterli büyüklükte olması kararlı bir ısı alışverişi için gereklidir. Bir diğer önemli faktör ise açık sistemlerde kullanılan suyun nasıl deşarj edileceğidir. Kullanılan kaynağa göre dönüş suyunun çevreye zararı en az olacak şekilde deşarj edilmesi gerekmektedir.

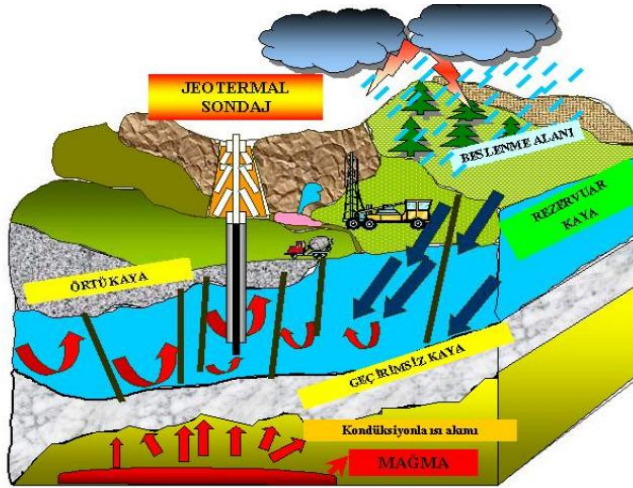
Kapalı sistem uygulamalarında uygun alan ve derinlik önemli etmenlerdir. Mevsimsel değişimlerden dolayı kaynaktaki su kütlesinin değişken olması göz önünde bulundurulmalıdır. Kuraklık veya su

seviyesinin azalması borulama sistemini etkileyerek ısı pompası sisteminin kullanılamaz hal getirebilmektedir (Danış, 2007). Açık ve kapalı sistem su kaynaklı ısı pompaları Şekil 2’de gösterilmektedir (Url- 2).



Şekil 2. Kapalı ve açık sistem su kaynaklı ısı pompası

Su kaynaklı ısı pompalarının önemli kaynaklarından biri de ülkemizde de yoğunluğu fazla olan yüksek sıcaklıklı jeotermal sulardır. Yerkabuğunun, farklı derinliklerinde birikmiş ısı enerjisinin oluşturduğu, sıcaklıkları bölgesel atmosferik sıcaklık değerlerinden fazla olan, normal yer altı ve yer üstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, tuz, gaz içeren sıcak su ve buhar olarak tanımlanan jeotermal enerji, ülkemiz gibi genç ve aktif tektonik kuşakta yer alan ülkelerde önemli bir doğal kaynaktır. Jeotermal kaynaklardaki sular genellikle meteorik kökenlidir, atmosferik süreç devam ettiği sürece rezervler kendilerini yenilemektedir. Jeotermal enerjinin ısı kaynağı ise tektonik hareketler sonucu yer yüzüne kadar ulaşan magma faaliyetleridir. Tektonizmanın yarattığı kırıklar boyunca ilerleyen meteorik sular (yağmur suyu, kar vb.) yer kabuğuna yaklaştıkça sıcaklıkları artar ve kayalar içerisinde birikmektedir. Biriken suların yer yüzüne tekrar çıkması ise jeotermal kaynakları oluşturmaktadır (Arslan vd. 2001). Jeotermal kaynakların oluşum süreci Şekil 3’de gösterilmektedir.



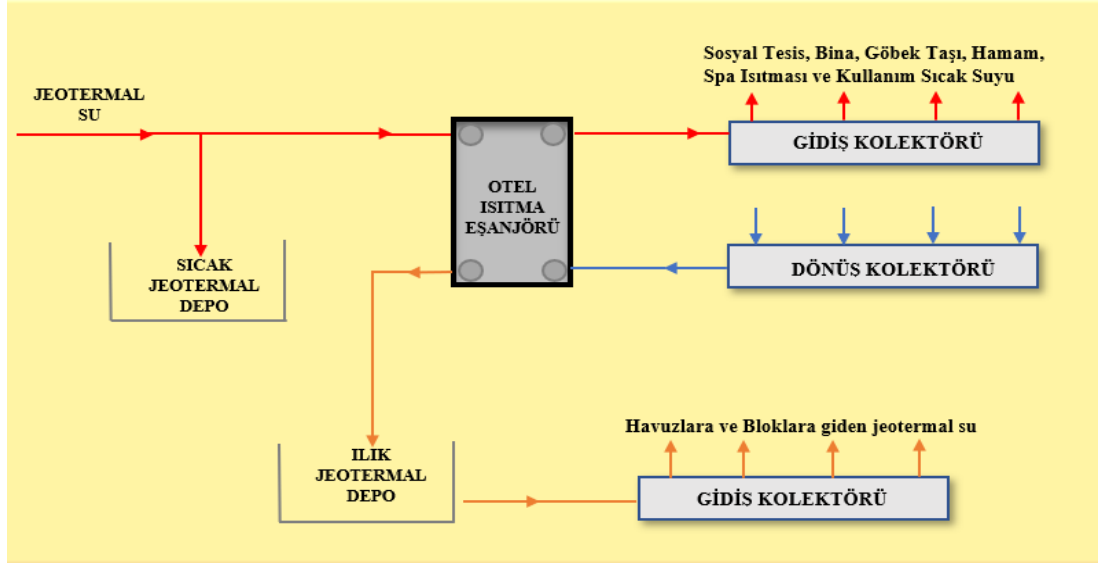
Şekil 3. Jeotermal kaynakların oluşum döngüsü (Arslan vd. 2001)

Türkiye jeotermal potansiyel olarak Avrupa’da birinci, kurulu güç bakımından da dünyada 4. sırada yer alarak kaynak açısından dünyanın sayılı ülkelerinden biri arasında yer almaktadır (Url-3). Ülkemizdeki dağılıma bakıldığında ise batı Anadolu’da jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi, konut ve sera ısıtması ve balneolojik kullanım daha yoğundur. Afyonkarahisar ili de jeotermal

potansiyeli yüksek illerimizin başında gelmektedir (Dinçer ve Ezan, 2020). Afyonkarahisar ili sınırları içerisinde yer alan Ömer-Gecek, Sandıklı-Hüdai, Bolvadin-Heybeli ve Gazlıgöl gibi önemli jeotermal enerji sahaları, bölgenin termal turizm ve jeotermal enerji potansiyelini ortaya koymaktadır (Kervankıran, 2012). Çalışmada ele alınan Grand Özgül Termal Tatil Köyü Gazlıgöl jeotermal sahasında bulunmaktadır.

Otelin Isı Pompası Uygulamasından Önceki Isıtma Sistemi

Grand Özgül Termal Tatil Köyü'nün ısı pompası uygulamasından önceki kullanım sıcak su ve ısıtma sistemi Şekil 4'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Otelin ısı pompası uygulamasından önceki ısıtma sistemi şeması

Grand Özgül Termal Tatil Köyü'nün ısıtma ve kullanım sıcak suyu sistemi, jeotermal enerji kaynaklı bir altyapıya sahiptir. Jeotermal kaynaklardan elde edilen sıcak su öncelikle bir ana toplama deposunda biriktirilmektedir. Depolanan sıcak su, farklı kapasitelere sahip toplam 7 adet ısı eşanjörüne yönlendirilmekte ve burada gerçekleşen ısı transferi yoluyla çeşitli kullanım alanlarına dağıtmak için gidiş kolektöründe toplanmaktadır. Bu alanlar arasında konaklama binalarının ısıtma sistemleri, spa, kadın ve erkek hamamları, göbek taşı sistemleri ile kullanım sıcak suyu ihtiyacı yer almaktadır. Öte yandan, eşanjörlerdeki ısı değişimi sonrasında sıcaklığını büyük ölçüde kaybetmiş olan ve artık insan kullanımı için uygun sıcaklığa ulaşan ılık jeotermal su ayrı bir ılık jeotermal su deposunda toplanmaktadır. Bu depodaki ılık jeotermal su ise havuzlara ve binalara iletilmektedir.

Isı Pompası Seçimi

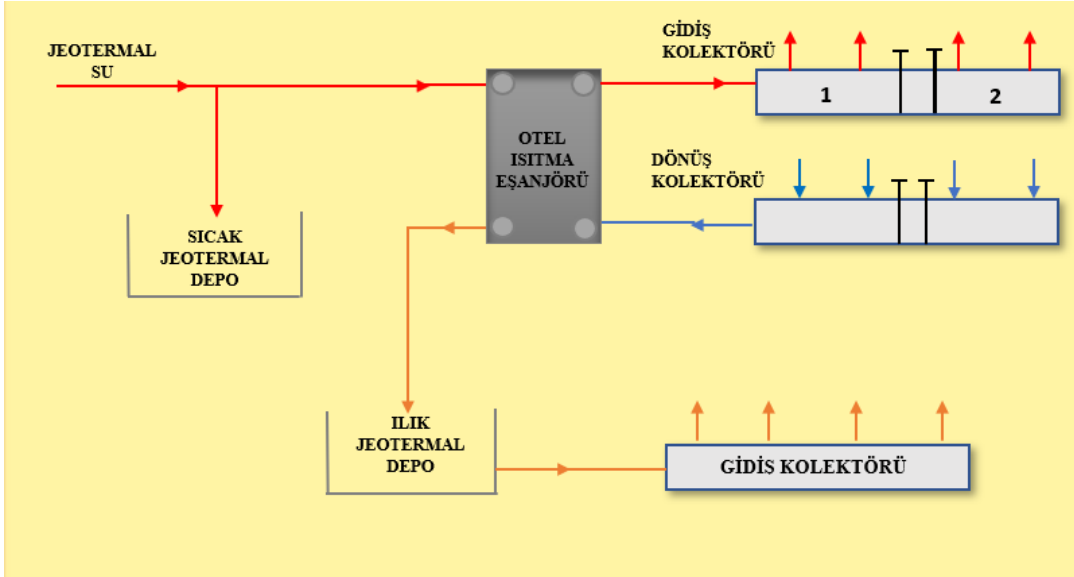
Isı pompasının performansı doğrudan kullanılan kaynağının türü ve ısı enerjisi potansiyeli ile doğrudan ilgilidir. Isı pompası sisteminin tipinin seçiminde ise ısıtılması veya soğutulması planlanan mahalin konumu, çevresel iklimi, toprak türü, yeraltı ve yerüstü sularına ulaşılabilirlik, atık ısı enerjisinin var veya yok olması, yeni yapılacak bir ortama mı yoksa mevcut sisteme mi entegre edileceği gibi faktörler göz önüne alınmaktadır. Bu faktörlere bakılarak hangi sistem ısı pompasının uygulanacağını karar verilmektedir (Erdoğan vd., 2006).

Bölgenin jeotermal enerji sahası üzerinde bulunmasının bir sonucu olarak, özellikle turizm sektörü ile seracılık faaliyetleri son yıllarda hızla gelişmektedir. Bu durum jeotermal su kaynaklarının yoğun

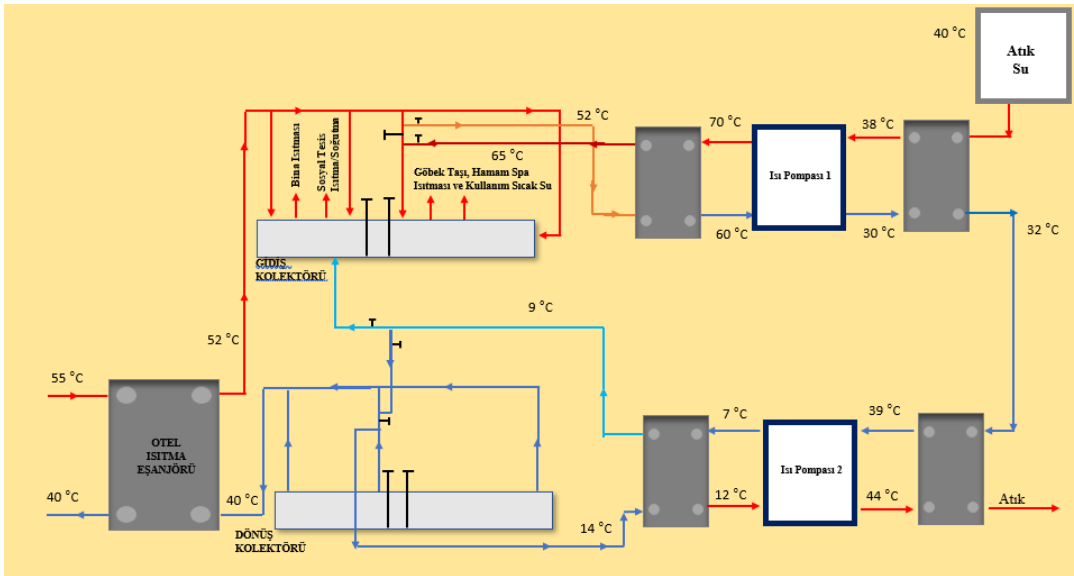
biçimde kullanılmasına neden olmaktadır. Ayrıca, Afyonkarahisar ilinde kış aylarının son yıllarda daha sert geçmesi, mevcut jeotermal su kaynaklarının ısıtma amaçlı kullanımında kapasite sorunlarına neden olmaktadır. Bu bağlamda, Grand Özgül Termal Tatil Köyü'nün mevcut durumu değerlendirildiğinde, ek enerji kaynağı olarak jeotermal havuzlardan tahliye edilen atık suların atık ısı geri kazanımı açısından yeterli sıcaklık seviyelerine sahip olduğu görülmektedir. Deşarj edilen bu atık sular su kaynaklı bir ısı pompası sistemine entegre edilerek tekrar kullanılabilir hale getirilebilir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde değerlendirildiğinde bu tür bir uygulama hem çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayacak hem de mevcut enerji sisteminin performansını artıracaktır. Bu nedenle su kaynaklı ısı pompası sistemlerinin uygulanabilirliği söz konusu tesis için etkin ve çevreci bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Isı Pompası Entegre Edilmiş Isıtma ve Soğutma Sistemi

Mevcut tesisata ısı pompası sistemi entegre edilmesi ve sistemin hem ısıtma hem de soğutma modlarında çalışacak şekilde tasarlanması nedeniyle gidiş ve dönüş kolektörleri yapılandırılmıştır. Her bir kolektör ikiye ayrılmış ve toplamda dört ayrı kolektör hattı oluşturulmuştur. Şekil 5 'de gidiş kolektörünün 1 numaralı kısmı soğutmanın yapılacağı sosyal tesise ve bina ısıtmasına ayrılmıştır. 2 numaralı kısımda ise kullanım sıcak suyu, göbek taşına, hamam ve spanın ısıtmasına ayrılmıştır.



Şekil 5. Kolektörleri ayrılmış ısıtma sistemi şeması



Şekil 6. Isı pompası entegre edilmiş sistemin şematik görüntüsü

Şekil 6’de ısı pompasının entegre edildiği sistem şematik olarak gösterilmektedir. Bu sistemde, ilk olarak atık su bir eşanjör vasıtasıyla ısısını 1 numaralı ısı pompasının buharlaştırıcı ünitesindeki kapalı çevrimde dolaşan suya aktarmaktadır. Buharlaştırıcıda kapalı çevrimde dolaşan sudan soğutucu akışkana ısı geçişi olmakta ve soğutucu akışkan buharlaşmaktadır. Çevrim sırasında yüksek sıcaklık ve basınca ulaşan soğutucu akışkan 1 numaralı ısı pompası ile gidiş kolektörü arasına yerleştirilmiş olan bir eşanjör vasıtasıyla ısısını gidiş hattındaki suya aktararak bu suyun sıcaklığını artırmaktadır. Sıcaklığı azalan atık su hem soğutma hem de ısıtma amacıyla kullanılan 2 numaralı ısı pompasının eşanjörüne yönlendirilerek sisteme dahil olmaktadır. Yaz mevsiminde 2 numaralı ısı pompası soğutma modunda çalışırken atık suya ısı vermektedir. 2 numaralı ısı pompası kullanılarak dönüş kolektörüne eklenen hattan gelen su soğutularak gidiş kolektörünün sosyal tesis kısmına iletilmektedir. Kış mevsiminde ise, 2 numaralı ısı pompası içerisinde yer alan dört yollu vana aracılığıyla sistem ısıtma modunda çalışmaktadır. Bu durumda ısıtılan su tekrar gidiş kolektörüne iletilmektedir.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada Afyonkarahisar ilinin İhsaniye ilçesinde yer alan Grand Özgül Termal Tatil Köyünde uygulanan jeotermal su kaynaklı ısı pompası sistemi incelenmiştir. Ağustos ayında hat üzerinde gerekli ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda ısıtma amacıyla kullanılan ısı pompasının performans katsayısı (COP) değeri 5.1, soğutma yapan ısı pompasının COP değeri ise 3.3 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler jeotermal potansiyelin yüksek olduğu bölgelerde su kaynaklı ısı pompası sistemlerinin etkinliğini ve verimliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Yeraltı suları ve jeotermal kaynakların sürekliliği, ısı pompası sistemlerinin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışmasına katkıda bulunurken, fosil yakıt kullanımının azalması sonucunda karbon salınımı da önemli ölçüde düşmektedir. Bu bağlamda, su kaynaklı ısı pompaları yalnızca ekonomik faydalarıyla değil, aynı zamanda çevresel etkileri azaltma potansiyeliyle de sürdürülebilir enerji dönüşümünde kritik bir rol üstlenmektedir.

Öte yandan, sistemin uygulanabilirliği yalnızca enerji ve çevre boyutlarıyla sınırlı değildir. Özellikle otel gibi büyük ölçekli yapılarda, konfor koşullarının sürekli ve güvenilir bir şekilde sağlanması da büyük önem taşımaktadır. Uygulanan ısı pompası sistemi uzun bir periyotta incelenebilirse su

kaynaklı ısı pompası sistemlerinin, bu tür yapılarda hem kullanıcı konforu hem de işletme verimliliği açısından daha kapsamlı ve sağlıklı sonuçlar elde edilebilecektir.

Özellikle jeotermal açıdan zengin bölgelerde yer alan büyük ölçekli tesislerde su kaynaklı ısı pompası sistemlerinin daha yaygın biçimde uygulanabilmesi için hem akademik araştırmaların hem de kamu destek mekanizmalarının teşvik edici yönde geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. İlerleyen dönemlerde yapılacak çalışmaların, farklı iklim bölgelerinde sistem performansını değerlendirmesi, ekonomik fizibilite analizlerini genişletmesi ve kullanıcı memnuniyetine yönelik parametreleri de içermesi, bu teknolojilerin yaygınlaştırılması sürecine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaya verdikleri destekleri için Grand Özgül Termal Tatil Köyü yönetimine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Arslan, S., Darıcı, M., & Karahan, Ç. (2001). Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli. Jeotermal Enerji Semineri, 21-27.
- Bilen, K., & Demir, O. (2021). Hava, Su ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Farklı Soğutucu Akışkanlar için Enerji ve Ekserji Analizi. El-Cezeri, 8(2), 688-705.
- Caner, M., Duman, N., Buyruk, E., & Kılınç, F. (2019). Yatay Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Sivas Şartlarında Performans Analizi. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, (042), 47-53.
- Çengel, Y. A., ve Boles, M. A., Termodinamik: Muhendislik Yaklaşımıyla. Pınarbasi, A., Guven Bilimsel, 437, (2011).
- Çavuş, D., & Usta, H. (2015). Evaporatörü Güneş Destekli Isı Pompasının Tasarımı, İmalatı Ve Performans Deneyleri. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 3(3), 535-544.
- Danış, E. (2007). Su kaynaklı ısı pompası sisteminin Siirt'de bir uygulamayla incelenmesi / Study of water source heat pumps with an application in Siirt. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 137s, İstanbul.
- Dinçer, İ., & Ezan, M. E. H. M. E. T. (2020). Tüba-jeotermal enerji teknolojileri raporu.
- Erdoğan, S., Yılmaz, M., Şahin, B., & Özyurt, Ö. (2006). Isı pompası sistemlerinin seçimi. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 92, 40-49.
- Güner, E. D., & Turan, E. S. (2017). Yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel iklim değişikliği üzerine etkisi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 3(1), 48-55.
- Kalkan, O., & Kaya, M. (2019). Experimental Performance Analysis of a Groundwater Heat Pump System in Erzincan, Turkey. Erzincan University Journal of Science and Technology, 12(3), 1254-1265.
- Kervankıran, İ. (2012). Afyonkarahisar İlinde Jeotermal Enerji Kullanımı Ve Sorunları. Marmara Coğrafya Dergisi, (25), 108-126.
- Ren, Y. (2025). *Comprehensive evaluation of three major heat pump technologies: Air-source, ground-source, and water-source heat pump*. In A. Fernando (Ed.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Functional Materials and Civil Engineering* (Vol. 143, pp. 54–60). EWA Publishing.

Url-1 <https://ourworldindata.org/grapher/sub-energy-fossil-renewables-nuclear> (05.10.2025)

Url-2 <https://www.mnpower.com/ProgramsRebates/GroundSourceHeatPumps> (05.10.2025)

Url-3 <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal>

Wu, R. (2009). Energy efficiency technologies–air source heat pump vs. ground source heat pump. *Journal of sustainable development*, 2(2), 14-23.

Yerdesh, Y., Amanzholov, T., Aliuly, A., Seitov, A., Toleukhanov, A., Murugesan, M., ... & Belyayev, Y. (2022). Experimental and theoretical investigations of a ground source heat pump system for water and space heating applications in Kazakhstan. *Energies*, 15(22), 8336.

Zhen, J., Lu, J., Huang, G., & Zhang, H. (2017). Groundwater source heat pump application in the heating system of Tibet Plateau airport. *Energy and Buildings*, 136, 33-42.

CONTRIBUTION OF VARIOUS MODEL COMPONENTS TO THE FISSION CROSS-SECTION OF $^{186}, ^{184}, ^{183}, ^{182}\text{W}$ FOR ^3He -INDUCED REACTIONS

Nilay AKÇAY

Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Arts and Science, Department of Physics, Rize-Türkiye
(Responsible Author) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9717-4829>

Halim BÜYÜKUSLU

Giresun University, Espiye Vocational School, Giresun-Türkiye ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5623-8761>

Abstract

Nuclear reaction codes have become one of the most important tools for insight into nuclear structures. The development of nuclear codes capable of making accurate predictions in situations with experimental limitations provides significant ease by reducing the workload. They are used in the simulation and modelling of topics such as nuclear reactions, nuclear energy production and fission energy, as well as in predicting fission products, energy efficiency, and safety analyses. One of the most common applications of nuclear reaction codes, which can contain many models and hundreds of parameters, is cross-section calculations. For the fission cross-section, which can cover a wide energy spectrum, to be calculated with high accuracy, many components must have the correct values. In this study, fission cross-section calculations for ^3He -induced reactions were performed for target nuclei $^{186}, ^{184}, ^{183}, ^{182}\text{W}$ up to an energy region of 150 MeV. Various model parameters were tested to identify the contributions of components related to compound nucleus and pre-equilibrium reaction mechanisms and to find the combination that best matches experimental values. The effects of ingredients such as the fission barrier, level density, and optical model on the cross section were investigated. The calculated values were compared with experimental equivalents compiled from the EXFOR library.

Keywords: fission cross section, nuclear reaction codes, ^3He -induced reactions, nuclear energy.

Introduction

In nuclear cross-section calculations, a variety of theoretical models (compound nucleus models, pre-equilibrium reaction models, direct reaction mechanisms, and the optical model) play significant roles in accurately representing the underlying physical processes. Each of these models involves numerous parameters, potentially numbering in the hundreds, which govern reaction probabilities, energy distributions, and particle emissions. The predictive success of any nuclear reaction code heavily depends on the appropriate selection and tuning of these model parameters (Büyüksulu, 2017). Therefore, to ensure reliable and physically meaningful results, it is essential to systematically test both the models and their associated parameters against experimental data. Such benchmarking not only improves the precision of the calculations but also contributes to a deeper understanding of the dominant reaction mechanisms involved.

^3He -induced nuclear reactions offer a valuable framework for investigating complex nuclear processes due to their ability to effectively initiate both compound and pre-equilibrium mechanisms across a broad energy spectrum (Rubein et al., 1996; Iyer & Cobble, 1968). These reactions are particularly useful in probing medium to heavy target nuclei, such as tungsten (W) isotopes, which are of interest in various technological and scientific applications. Tungsten isotopes (^{186}W , ^{184}W ,

^{183}W , and ^{182}W) are notable for their high atomic number and structural stability, making them relevant in fields such as nuclear fusion, accelerator-driven systems, and spallation neutron sources (Jing et al., 2001). Accurate fission cross-section data for these isotopes are essential not only for theoretical model development but also for practical applications involving energy production, radiation shielding, and nuclear safety analysis. Consequently, evaluating the contribution of different reaction model components in predicting the fission cross sections of these nuclei provides critical insight into the reliability and limitations of nuclear reaction codes.

In this study, the contribution of various reaction model components to the calculated fission cross sections of ^3He -induced reactions on tungsten isotopes ^{186}W , ^{184}W , ^{183}W , and ^{182}W at incident energies up to 150 MeV has been investigated. A systematic parameter analysis was carried out to evaluate the impact of key input parameters such as fission barrier models, level density models, and optical model potentials. Since the incident energy range corresponds to the higher end of the energy spectrum, attention was paid to pre-equilibrium mechanisms. Through this comparative approach, the study aims to identify optimal model combinations that yield improved agreement with experimental data and to provide insights for future refinements in nuclear reaction modeling.

Materials and Methods

Modern nuclear reaction codes have become indispensable tools for simulating and analyzing nuclear processes, especially in cases where experimental data are scarce or difficult to obtain. Among these codes, TALYS (Koning et al., 2023) stands out as a comprehensive and versatile framework capable of modeling nuclear reactions over a wide range of projectile-target combinations and incident energies. TALYS integrates multiple reaction mechanisms, including optical models, compound nucleus formation, pre-equilibrium emission, direct reactions, and fission processes, all governed by detailed nuclear structure data and adjustable model parameters. The code allows users to calculate various reaction observables such as cross sections, angular distributions, and energy spectra with a high degree of flexibility. Its modular structure enables systematic testing of different models and parameter sets, which is crucial for understanding the sensitivities and contributions of individual components to specific observables. In this study, TALYS was employed to evaluate the impact of selected model ingredients (particularly those related to fission barrier heights, level densities, and pre-equilibrium parameters) on the calculated fission cross sections of tungsten isotopes under ^3He bombardment. All models selected in the study and the keywords in the code are given in Table 1.

In TALYS, the modeling of the fission process is controlled through the *fismodel* parameter, which determines the type of fission barrier used in the calculation. *fismodel 1* uses semi-empirical or “experimental” barrier heights compiled from available data. *fismodel 2* and *fismodel 3* correspond to theoretical barrier systematics, based on the Mamdouh and Sierk models, respectively. *fismodel 4* employs a rotating liquid drop model, incorporating deformation and angular momentum effects, while *fismodel 5* uses a semi-classical WKB approximation to describe the fission path (Sin et al., 2006). The selection of the fission model significantly influences the calculated fission cross sections, as the barrier height and shape directly affect the probability of fission, particularly in heavy nuclei such as tungsten. In this study, different *fismodel* values were tested to investigate their impact on the agreement between theoretical predictions and experimental data.

Level density is a fundamental component in nuclear reaction modeling, as it determines the number of available nuclear states at a given excitation energy and directly influences reaction probabilities, particularly in compound and pre-equilibrium processes. In TALYS, the *ldmodel* parameter allows users to select among six different models for nuclear level density. The first three are phenomenological: *ldmodel 1* corresponds to the Constant Temperature + Fermi Gas Model (CTM) (Ericson 1960; Gilbert & Cameron, 1965), *ldmodel 2* uses the Back-shifted Fermi Gas Model (BFM),

and *ldmodel 3* represents the Generalized Superfluid Model (GSM), which accounts for pairing and phase transition effects. The remaining models are microscopic: *ldmodel 4* and *ldmodel 5* are based on Skyrme-Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) calculations, with the latter using a combinatorial method, while *ldmodel 6* utilizes a temperature-dependent combinatorial level density derived from Gogny-HFB theory. In this study, multiple level density models were tested to evaluate their influence on the calculated fission cross sections, especially considering the sensitivity of compound nucleus formation to level density assumptions.

Pre-equilibrium processes play a crucial role in nuclear reactions at intermediate and high energies, where the incident projectile interacts with the target nucleus before a compound system is fully formed. TALYS simulates pre-equilibrium emission through the *preeqmode* parameter, which governs how particle emission prior to equilibrium is modeled. There are four available options. *preeqmode 1* employs the exciton model (Gruppelaar et al., 1986; Koning & Duijvestijn, 2004) with analytical transition rates, where the transition probabilities are computed using energy-dependent matrix elements. *preeqmode 2* uses the same exciton model but with numerical evaluation of transition rates, offering improved accuracy at the expense of computation time. *preeqmode 3* further refines the approach by incorporating the optical model to determine collision probabilities, resulting in a more physically realistic description of nucleon interactions. Finally, *preeqmode 4* adopts a multi-step direct/compound model, which treats the pre-equilibrium process as a sequence of direct and compound-like steps, allowing for angular momentum and channel-specific effects. In this study, different *preeqmode* settings were explored to understand their impact on fission cross sections at energies where pre-equilibrium contributions become significant, particularly above ~50 MeV.

Table 1. Level density models, pre-equilibrium models, and fission barrier models controllable with the TALYS code

level densities models	pre-equilibrium models	fission barrier models
<i>ldmodel 1</i> Constant Temperature + Fermi gas model (CTM)	<i>preeqmode 1</i> Exciton model: Analytical transition rates with energy-dependent matrix element.	<i>fismodel 1</i> “experimental” fission barriers
<i>ldmodel 2</i> Back-shifted Fermi gas Model (BFM)	<i>preeqmode 2</i> Exciton model: Numerical transition rates with energy-dependent matrix element	<i>fismodel 2</i> theoretical fission barriers, Mamdouh table
<i>ldmodel 3</i> Generalised Superfluid Model (GSM)	<i>preeqmode 3</i> Exciton model: Numerical transition rates with optical model for collision probability	<i>fismodel 3</i> theoretical fission barriers, Sierk model
<i>ldmodel 4</i> Skyrme-Hartree-Fock-Bogolyubov level densities from numerical tables	<i>preeqmode 4</i> Multi-step direct/compound model	<i>fismodel 4</i> theoretical fission barriers, rotating liquid drop
<i>ldmodel 5</i> Skyrme-Hartree-Fock-Bogolyubov combinatorial level densities from numerical tables		<i>fismodel 5</i> WKB approximation for fission path model
<i>ldmodel 6</i> Temperature-dependent Gogny-Hartree-Fock-Bogolyubov combinatorial level densities from numerical tables		

To evaluate the individual and combined effects of model components on fission cross-section calculations, a two-step parameter testing strategy was employed. First, each model group (fission barrier models (*fismodel*), level density models (*ldmodel*), and pre-equilibrium models (*preeqmode*)) was varied independently while keeping the others fixed, allowing for the assessment of their isolated impact on the results. This procedure was repeated for each target nucleus (^{186}W , ^{184}W , ^{183}W , and ^{182}W). In the second stage, all possible model combinations (6 level density $\times$ 5 fission $\times$ 4 pre-equilibrium models, totaling 120 combinations) were tested to identify optimal configurations yielding the best agreement with experimental data (Büyüksülu 2024). The agreement between theoretical and experimental cross sections was quantitatively assessed using the chi-square (χ^2/N) method, defined as:

$$\chi^2/N = \frac{1}{N} \sum \frac{(\sigma_{exp} - \sigma_{theo})^2}{\Delta\sigma_{exp}}$$

where σ_{exp} and σ_{theo} are the experimental and calculated cross sections, respectively, and $\Delta\sigma_{exp}$ denotes the associated experimental error. This statistical metric enabled a consistent, objective comparison across models and provided a robust measure for identifying the most reliable model combinations.

All experimental fission cross-section data used for comparison in this study were collected from the EXFOR database (Otuka et al., 2014; Jing et al., 2001), maintained by the International Atomic Energy Agency (IAEA). The selected datasets correspond to peer-reviewed measurements for ^3He -induced reactions on tungsten isotopes in the energy range up to 150 MeV.

Findings and Discussion

Figure 1 presents the calculated fission cross sections of the $^{182}\text{W}(^3\text{He},f)$ reactions for different selections of level density, pre-equilibrium, and fission barrier models tested independently. Although similar trends were observed for other tungsten isotopes (^{183}W , ^{184}W , and ^{186}W), only the results for ^{182}W are shown here for illustrative purposes. Among the level density models, the Generalized Superfluid Model (GSM, *ldmodel* 3) provided the best agreement with experimental data across a broad energy range. For the pre-equilibrium component, the most accurate results were obtained using *preeqmode* 3, which applies the exciton model with numerical transition rates and incorporates the optical model to estimate collision probabilities. Regarding fission barrier models, both *fismodel* 1 (experimental barrier heights) and *fismodel* 5 (WKB approximation for the fission path) produced results that closely matched the experimental cross sections. These findings suggest that specific model configurations are consistently more reliable for simulating ^3He -induced fission reactions on W isotopes.

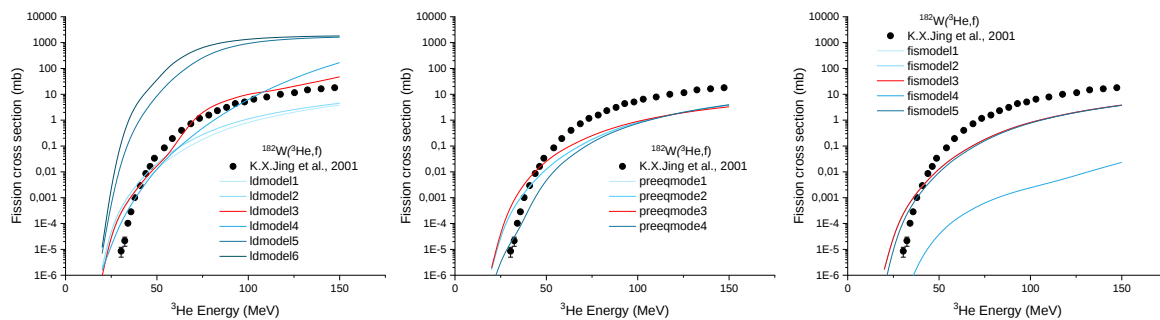


Figure 1. For the $^{182}\text{W}(^3\text{He},f)$ reaction: comparison of level density models on the left, comparison of pre-equilibrium models in the middle, comparison of fission barrier models on the right

Figure 2 presents the fission cross-section calculations using the model combinations that yielded the lowest chi-square values for each tungsten isotope. The results, summarized in Table 2, demonstrate a consistent preference for the Generalized Superfluid Model (*ldmodel 3*) across all isotopes, indicating its robustness in reproducing the level density behavior of medium-to-heavy nuclei under ^3He bombardment. For fission barriers, both experimental data (*fismodel 1*) and the WKB approximation (*fismodel 5*) yielded the best fits, depending on the isotope. Interestingly, while *preeqmode 3* (numerical exciton model with optical model coupling) provided optimal results for ^{182}W and ^{183}W , *preeqmode 1* (analytical exciton model) was more effective for ^{184}W and ^{186}W . These findings suggest that while some model components show stable performance across isotopes, others may require isotope-specific optimization to achieve the best agreement with experimental data.

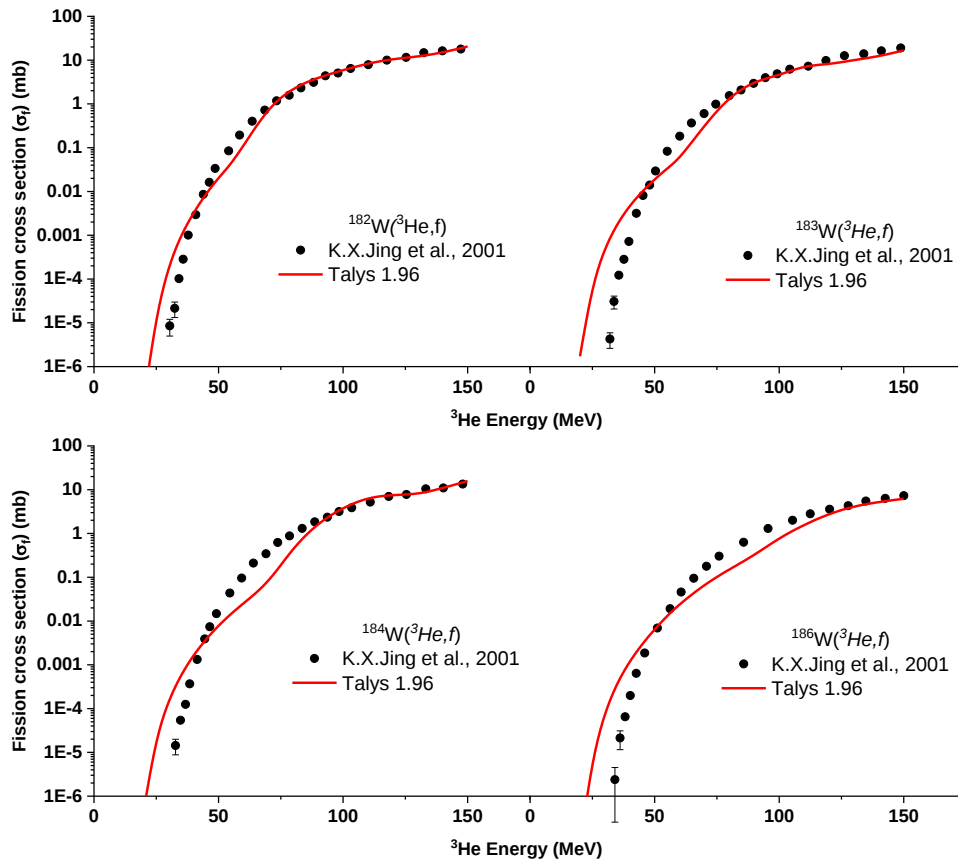


Figure 2. Fission cross-section calculations for the $^{182}\text{W}(^3\text{He},f)$ reaction in the upper left, for the $^{183}\text{W}(^3\text{He},f)$ reaction in the upper right, for the $^{184}\text{W}(^3\text{He},f)$ reaction in the lower left, and for the $^{186}\text{W}(^3\text{He},f)$ reaction in the lower right.

The Generalized Superfluid Model (*ldmodel 3*) demonstrated superior performance across all target nuclei, likely due to its inclusion of pairing and phase transition effects, which are especially relevant for heavy nuclei such as tungsten. The success of *fismodel 1* and *fismodel 5* suggests that both empirical data and semi-classical WKB-based barrier estimations can effectively capture the fission dynamics when tuned appropriately. In contrast, the variation in optimal preequilibrium models between isotopes indicates a more complex interplay between reaction energy and nuclear structure effects; while *preeqmode 3* (which accounts for detailed transition rates and collision probabilities) excels in certain cases, simpler analytical models (*preeqmode 1*) may suffice for others. These findings are broadly consistent with earlier studies emphasizing the sensitivity of fission cross-section predictions to level density and barrier parameters, though the strong and repeated performance of

GSM in this context reinforces its utility for reactions involving light ions and medium-heavy targets. Future work may benefit from a more detailed isotope-specific tuning of optical model parameters and pre-equilibrium configurations, particularly at higher energies where discrepancies tend to increase.

Table 2. Optimal combinations of level density models, pre-equilibrium models, and fission barrier models for fission cross-section calculations

Isotope	Fission Model (fismodel)	Level Density Model (ldmodel)	Pre-equilibrium Model (preeqmode)	χ^2/N
¹⁸² W	5 (WKB approximation)	3 (Generalized Superfluid Model)	3 (Exciton + Optical Model)	36.34
¹⁸³ W	1 (Experimental barriers)	3 (Generalized Superfluid Model)	3 (Exciton + Optical Model)	79.84
¹⁸⁴ W	1 (Experimental barriers)	3 (Generalized Superfluid Model)	1 (Exciton, Analytical rates)	109.68
¹⁸⁶ W	5 (WKB approximation)	3 (Generalized Superfluid Model)	1 (Exciton, Analytical rates)	89.80

It is important to emphasize that all other input parameters and reaction models within TALYS (such as optical model potentials, gamma-ray strength functions, and compound nucleus decay schemes) were kept at their default settings. Therefore, the improvements in theoretical-experimental agreement observed in this work are solely due to the variation of the three studied components. It is highly likely that further enhancements in accuracy and correlation could be achieved by fine-tuning additional parameters beyond the scope of this study.

Conclusion and Recommendations

In this study, the impact of three major model components (level density models, pre-equilibrium reaction models, and fission barrier models) on the calculated fission cross sections of ³He-induced reactions on tungsten isotopes (¹⁸²W, ¹⁸³W, ¹⁸⁴W, and ¹⁸⁶W) was systematically investigated using the TALYS nuclear reaction code. The results demonstrated that specific combinations of these models, particularly the Generalized Superfluid Model (*ldmodel 3*) for level density and either experimental barriers (*fismodel 1*) or the WKB approximation (*fismodel 5*) for fission, yield significantly improved agreement with experimental data. Among the pre-equilibrium models, both analytical (*preeqmode 1*) and optical-model-enhanced numerical approaches (*preeqmode 3*) showed effectiveness depending on the target isotope.

Overall, this study demonstrates the critical role of model selection in fission cross-section calculations and provides a foundation for further refinements in the predictive power of nuclear reaction simulations. Moreover, such studies contribute to the ongoing improvement of nuclear reaction models and codes by providing systematic benchmarks and model validation opportunities. Future research may benefit from testing alternative or more detailed model components beyond those considered in this study, potentially leading to more accurate predictions and improved correlation with experimental results.

References

- Büyüksulu, H. (2024). Studying optimum values of statistical model ingredients for (α, γ) and (γ, α) reactions. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14 (1), 131-142.
- Büyüksulu, H. (2017). Modelled Excitation Functions of $^{112,114,116,118,120,122,124}\text{Sn}$ Isotopes for an Incident Energy Range of 10-80 MeV. *Celal Bayar University Journal of Science*, 13(4), 925-928.
- Ericson, T. (1960). The statistical model and nuclear level densities. *Advances in Physics*, 9(36), 425-511.
- Gilbert, A., & Cameron, A. G. W. (1965). A composite nuclear-level density formula with shell corrections. *Canadian Journal of Physics*, 43(8), 1446-1496.
- Gruppelaar, H., Nagel, P., & Hodgson, P. E. (1986). Pre-equilibrium processes in nuclear reaction theory: the state of the art and beyond. *La Rivista del Nuovo Cimento* (1978-1999), 9(7), 1-46.
- Iyer, R. H., & Cobble, J. W. (1968). Ternary Fission of ^{238}U Induced by Intermediate-Energy Helium Ions. *Physical Review*, 172(4), 1186.
- Jing, K. X., Phair, L. W., Moretto, L. G., Rubehn, T., Beaulieu, L., Fan, T. S., & Wozniak, G. J. (2001). Fission transient times from fission probabilities of neighboring isotopes. *Physics Letters B*, 518(3-4), 221-228.
- Koning, A. J., & Duijvestijn, M. C. (2004). A global pre-equilibrium analysis from 7 to 200 MeV based on the optical model potential. *Nuclear Physics A*, 744, 15-76.
- Koning A., Hilaire S. & Goriely S. (2023). TALYS: modeling of nuclear reactions. *The European Physical Journal A* 59 131
- Otuka, N., Dupont, E., Semkova, V., Pritychenko, B., Blokhin, A. I., Aikawa, M., ... & Zhuang, Y. (2014). Towards a more complete and accurate experimental nuclear reaction data library (EXFOR): international collaboration between nuclear reaction data centres (NRDC). *Nuclear Data Sheets*, 120, 272-276.
- Rubehn, T., Jing, K. X., Moretto, L. G., Phair, L., Tso, K., & Wozniak, G. J. (1996). Scaling laws in ^3He induced nuclear fission. *Physical Review C*, 54(6), 3062.
- Sin, M., Capote, R., Ventura, A., Herman, M., & Obložinský, P. (2006). Fission of light actinides: Th 232 (n, f) and Pa 231 (n, f) reactions. *Physical Review C*, 74(1), 014608.



TEMİZ ENERJİ HEDEFİNDE PROTON-BOR FÜZYONU VE TÜRKİYE

BÜLENT BÜYÜK

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Bor Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye (Sorumlu Yazar) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5967-6855>

MİRAÇ KAMIŞLIOĞLU

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Bor Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0666-8832>

İPEK KARAASLAN

Yeditepe Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 34755, Ataşehir, İstanbul, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-5613>

İSMAİL KOÇAK

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, , Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Bor Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4519-4561>

CANAN CAN

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Alternatif Enerji Kaynakları, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5982-9759>

Özet

Enerji tüketimindeki hızlı artış ve iklim değişikliğiyle mücadele, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan küresel arayışı hızlandırmıştır. Fosil yakıtların çevresel zararları ve sınırlı rezervleri, yenilenebilir enerji, hidrojen, nükleer ve özellikle de füzyon enerjisi gibi ileri teknolojileri gündeme getirmiştir. Bu teknolojilerin her biri, depolama, güvenlik, emre-amadelik, enerji-yoğunluk veya teknolojik olgunluk gibi kendi zorluklarını taşımaktadır.

Gelecek vadeden bu teknolojilerden biri olan füzyon enerjisi, güneş ve diğer yıldızlardaki reaksiyonları taklit ederek enerji-yoğun ve temiz enerji üretmeyi hedefler. Geleneksel döteryum-trityum (DT) füzyonu, yüksek enerji üretimi sağlamasına karşın, radyoaktif nötronlar ve sınırlı trityum rezervleri gibi ciddi sorunlar barındırır. Bu zorluklara potansiyel bir çözüm sunan proton-bor (pB) füzyonu, nötron üretmediği için radyoaktivite riski taşımaz ve karbon emisyonu olmadığı için tamamen temiz bir enerji kaynağıdır.

pB füzyonunda kullanılan yakıt olan bor-11 izotopu, doğada bol miktarda bulunur. Bu durum, dünya bor rezervlerinin yaklaşık %73'üne sahip olan Türkiye için stratejik bir avantaj yaratmaktadır. Her ne kadar pB reaksiyonunun gerçekleşmesi için gereken sıcaklıklar (yaklaşık 1.5 milyar derece) DT füzyonuna göre çok daha yüksek olsa da lazer teknolojilerindeki son gelişmeler bu zorluğun aşılmasına yönelik umut verici yollar sunmaktadır.

pB füzyonunun bir diğer önemli avantajı da reaksiyon sonucu ortaya çıkan yüksek enerjili alfa parçacıklarının doğrudan elektriğe dönüştürülebilme potansiyelidir. Bu, geleneksel enerji dönüşüm süreçlerindeki verim kayıplarını minimuma indirerek genel verimliliği artırabilecektir. Türkiye, sahip olduğu yüksek bor rezervleriyle bu alanda öncü bir rol oynayabilir ve bu teknolojiyi sadece kendi enerji güvenliğini sağlamak için değil, aynı zamanda küresel temiz enerji pazarında kilit bir oyuncu olmak için kullanabilir. Bu bağlamda, Türkiye'nin bu teknolojiye yönelik araştırmalara yatırım yapması ve stratejik politikalar geliştirmesi büyük bir öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Temiz enerji, proton-Bor füzyonu (pB), bor, füzyon teknolojileri.

PROTON-BORON FUSION for THE CLEAN ENERGY and TÜRKİYE

Abstract

The rapid increase in energy consumption and the fight against climate change have accelerated the global search for clean and sustainable energy sources. The environmental damage and limited reserves of fossil fuels have brought advanced technologies like renewable energy, hydrogen, nuclear, and especially fusion energy to the forefront. Each of these technologies has its own set of challenges, such as storage, safety, being ready to use, energy density, or technological level.

One of these promising technologies is fusion energy, which aims to produce energy-dense and clean power by using the reactions within the sun and other stars. While conventional deuterium-tritium (DT) fusion provides high energy output, it carries significant problems like radioactive neutrons and limited tritium reserves. A potential solution to these challenges is proton-boron (pB) fusion, which does not produce neutrons, thus eliminating the risk of radioactivity, and is a completely clean energy source as it emits no carbon.

The fuel used in pB fusion, the boron-11 isotope, is abundant in nature. This provides a strategic advantage for Türkiye, which holds approximately 73% of the world's boron reserves. Although the temperatures required for the pB reaction (approximately 1.5 billion degrees Celsius) are significantly higher than those for DT fusion, recent advancements in laser technologies offer promising avenues for overcoming this challenge.

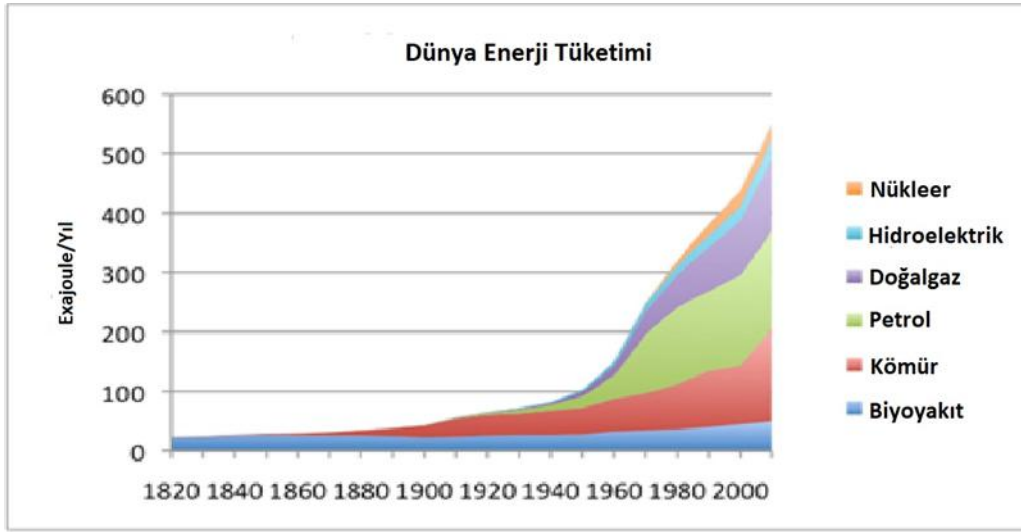
Another key advantage of pB fusion is the potential for direct conversion of the high-energy alpha particles produced by the reaction to electricity. This capability could minimize energy conversion losses common in traditional power generation processes, thereby increasing overall efficiency. With its huge boron reserves, Türkiye could play a leading role in this field, utilizing this technology not only to secure its own energy future but also to become a key player in the global clean energy market. Therefore, it is of great importance for Türkiye to invest in research on this technology and to develop strategic policies.

Keywords: Clean energy, proton-boron fusion, boron, fusion technologies.

Giriş

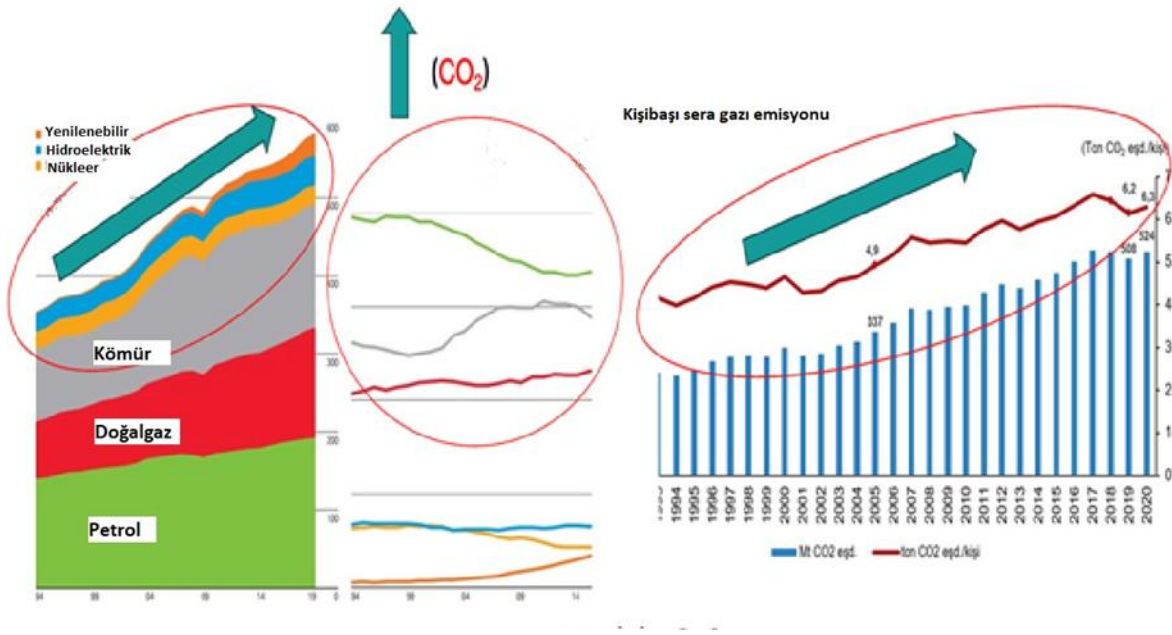
Teknolojik gelişmelerin hız kazanması, kentleşme ve sanayileşmedeki artışla birlikte küresel enerji tüketimi her yıl istikrarlı bir şekilde yükselmektedir. Yapılan hesaplamalara göre 2024 yılı itibarıyla dünya toplam enerji tüketimi yaklaşık 648 exajoule (EJ) düzeyine ulaşmıştır (IEA, 2025). Yıllara göre artış trendi incelendiğinde, enerji tüketimindeki artışın exponansiyel bir karakter sergilediği açıkça görülmektedir (Şekil 1). Küresel enerji tüketiminde en büyük pay sahibi kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardır. Nükleer enerji ve hidroelektrik sistemler orta düzeyde katkı sağlarken,

yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş ve rüzgâr, son yıllarda büyüme göstermelerine rağmen halen sınırlı bir paya sahiptir.



Şekil 1. Yıllara Göre Dünya Enerji Tüketimi (Gail Tverberg, 2012).

Enerji tüketiminde kullanılan kömür, petrol ve doğalgaz sera gazı emisyonuna sebep olan CO₂ açığa çıkaran kaynaklar arasında en ön sırada gelmektedir (Şekil 2). Sera gazı emisyonu ise iklim değişikliğine yol açan sebeplerin başında gelmekte olup dünya ülkeleri tarafından üzerinde durulan önemli bir husustur. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında Paris İklim Antlaşması kabul edilmiş ve taraf ülkeler bu doğrultuda 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını belirli bir değere azaltmayı hedeflemektedirler. Türkiye ise 9 Temmuz 2025 yılında çıkardığı İklim Kanunu kapsamında “2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi ve Yeşil Büyüme” politikasını ortaya koymuştur. Şekil 2’den görüldüğü üzere en çok karbon emisyonuna sahip olan kömür, petrol ve doğalgaz enerji kaynaklarının yerine kullanılabilecek alternatif enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.



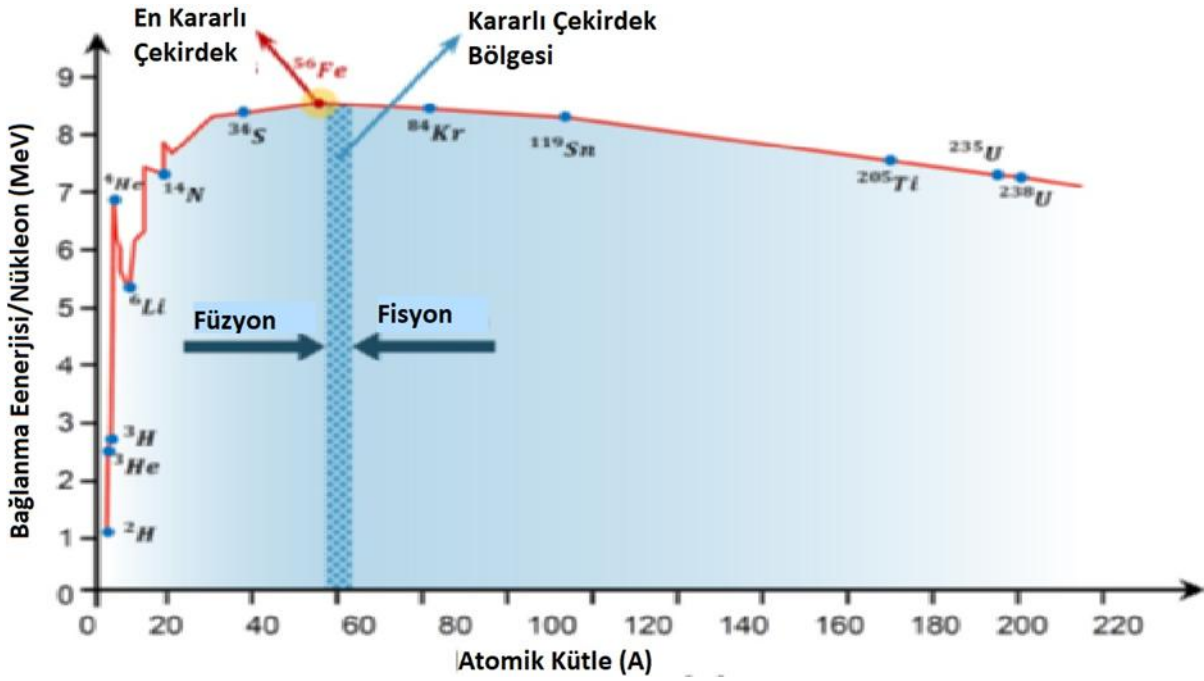
Şekil 2. Dünya'nın Enerji Kaynaklarına bağlı CO₂ emisyon oranı (TUİK, 2022; BP, 2023)

Alternatif enerji kaynakları arasında rüzgâr, güneş, hidrojen ve füzyon enerji kaynakları yer almaktadır. Ayrıca, mevcut enerji kaynakları içerisinde yer alan ve karbon emisyonu düşük olan hidroelektrik ve nükleer (filyon) enerji kaynaklarının kullanım oranlarının artırılması yönünde çalışmalar mevcuttur. Alternatif enerji kaynakları arasında potansiyele sahip olan füzyon teknolojileri, uygulamaya geçilmesine bağlı olarak enerji arz güvenliği açısından emre amadelik ve enerji-yoğun özelliklere sahip olabileceği öngörülmektedir. Ancak, füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için gerekli olan zorlu koşullar bu teknolojinin uygulanabilir hale gelmesinin önündeki engelleri oluşturmaktadır. Son dönemde füzyon teknolojilerinin uygulamaya geçmesine yönelik yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

Materyal ve Yöntem

Füzyon Teknolojileri

Füzyon reaksiyonu genellikle küçük atom kütleli elementlerin uygun koşullar altında birleşerek daha büyük atom kütleli elementler oluşturması ve bunun neticesinde enerji açığa çıkması olayı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3'te atom kütlelerine göre füzyon ve filyon bölgeleri verilmiştir.



Şekil 3. Atom kütesine bağlı olarak enerji üreten fisyon ve füzyon bölgeleri (Nouhi vd., 2022)

Literatürde yer alan temel füzyon reaksiyonları Şekil 4'te de verilmiştir. Bu reaksiyonlar içerisinde üzerinde en çok odaklanılan reaksiyonlar Döteryum-Trityum (DT) füzyonu ve Döteryum-Döteryum (DD) füzyonu olmakla birlikte DT füzyonu dünya genelinde daha yaygın ve ilgi odağı durumundadır.

1.	D + T	→	⁴ He (3.5 MeV) + n (14.1 MeV)
2.	D + D	→	T (1.01 MeV) + p (3.02 MeV) (50%)
		→	³ He (0.82 MeV) + n (2.45 MeV) (50%)
3.	D + ³ He	→	⁴ He (3.6 MeV) + p (14.7 MeV)
4.	T + T	→	⁴ He + 2 n + 11.3 MeV
5.	³ He + ³ He	→	⁴ He + 2 p
6.	³ He + T	→	⁴ He + p + n + 12.1 MeV (51%)
		→	⁴ He (4.8 MeV) + D (9.5 MeV) (43%)
		→	⁴ He (0.5 MeV) + n (1.9 MeV) + p (11.9 MeV) (6%)
7.	D + ⁶ Li	→	2 ⁴ He + 22.4 MeV
8.	p + ⁶ Li	→	⁴ He (1.7 MeV) + ³ He (2.3 MeV)
9.	³ He + ⁶ Li	→	2 ⁴ He + p + 16.9 MeV
10.	p + ¹¹ B	→	3 ⁴ He + 8.7 MeV

Şekil 4. Bazı temel füzyon reaksiyonları (Kikuchi vd., 2012)

DT füzyonunda Döteryum ve Trityum izotoplarının plazma koşullarında bir araya gelerek Alfa parçacığı ve nötron oluşturması ve neticesinde 17.6 MeV değerinde enerjinin açığa çıkmaktadır. Bu enerji seviyesi fosil yakıtlardan elde edilen enerji seviyesinin yaklaşık dört milyon katı, fisyon reaksiyonunda açığa çıkan enerjinin yaklaşık dört katı kadar olup enerji-yoğun uygulama olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gerekli plazma sıcaklığının yaklaşık

150 Milyon derece olması, girdilerden (yakıt) Trityumun doğada sınırlı miktarda olması ve açığa çıkan enerjinin önemli bir kısmının (%80) üretilen nötronlar üzerinde olması DT füzyonundan sürdürülebilir enerji eldesi için aşılması gereken başlıca hususlar arasındadır (Katoch vd., 2025). Ayrıca her ne kadar fisyon reaksiyonundaki kadar olmasa da, üretilen nötronların oluşturacağı radyoaktivite üzerinde durulması gereken bir başka husustur. Son dönemde özellikle lazer teknolojilerindeki ilerlemeler neticesinde bir diğer füzyon reaksiyonu olan proton-bor (pB) füzyonunu ilgi odağı haline gelmeye başlamıştır (Turcu vd., 2024; Nissim vd., 2025; Picciotto vd., 2024). Proton-bor füzyonu konularında yapılan çalışmalar bu teknolojinin gelecekte umut vadeden önemli bir temiz enerji kaynağı olma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Bulgular ve Tartışma

Proton-Bor Füzyonu

Proton-Bor (pB) füzyon reaksiyonunda proton ve Bor-11 (^{11}B) izotopu plazma ortamında birleşerek kararsız ^{12}C izotopu oluşturmakta ve akabinde ^{12}C izotopu 3 adet Alfa ($^4\text{He}^{+2}$) parçacığına bölünmekte ve 8.7 MeV enerji açığa çıkmaktadır (Batani vd., 2025). pB füzyonu reaksiyonu Eşitlik 1'de verilmiştir.



pB füzyon reaksiyonunda açığa çıkan birim kütle başına enerji DT füzyonuna göre bir miktar daha düşük olmakla birlikte fisyon (^{235}U) reaksiyonu ile yaklaşık aynı seviyede olup diğer enerji türlerine (fosil, hidrojen vb.) oldukça yüksek seviyededir. Bu nedenle pB füzyonu enerji-yoğun enerji kaynağı olarak tanımlanabilmektedir. Tablo 1'de DT, pB ve fisyon (^{235}U) reaksiyonlarının yaklaşık birim kütle başına enerjileri verilmiştir.

Tablo 1. Bazı nükleer reaksiyonlarda açığa çıkan birim kütle başına enerji miktarı

Reaksiyon	Reaksiyonda açığa çıkan enerji (MeV)	Birim kütle başına açığa çıkan enerji (MeV/nükleon)
DT	17.6	3.52
Fisyon	200	0.847
pB	8.7	0.725

pB füzyonu için en önemli dezavantaj reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gerekli olan plazma sıcaklığıdır. DT reaksiyonu için gerekli olan plazma sıcaklığı 150 Milyon derece iken pB füzyonu için gerekli olan plazma sıcaklığı 1.5 Milyar derece mertebesinde olup DT füzyonunun yaklaşık 10 katı kadardır. Bu açıdan değerlendirildiğinde sürdürülebilir pB füzyonu koşullarının DT füzyonuna göre daha zor olduğu söylenebilmektedir. Ancak son dönemde Lazer teknolojilerindeki önemli ilerlemeler (Chirped Pulse Amplification, CPA uygulaması gibi) ve bu gelişmelere bağlı olarak çok daha güçlü (Terawatt, Petawatt seviyesi) lazer sistemlerinin geliştirilmesi (Jeong ve Lee, 2014), bu sistemlerin pB füzyonu reaksiyonunu tetiklemek için gerekli olan enerjiyi sağlama potansiyelini ortaya koymuştur. Özellikle Lazer Tetikleyici Füzyon (Laser Driven Fusion) konusunda son dönemde artan ilgi ve yayın söz konusudur (Molloy vd., 2025; Aladi vd., 2025); Tosca vd., 2025). Ayrıca, pB füzyon ana reaksiyonunda Fisyon ve DT füzyonunda olduğu gibi nötron açığa çıkmamaktadır. Bu

nedenle pB füzyon reaksiyonu aynı zamanda anötronik (nötron üretmeyen) reaksiyon olarak tanımlanmaktadır. pB reaksiyonunda nötron açığa çıkmaması reaksiyonun radyoaktif atık oluşturmaması yönünden önemli özelliği olarak ön plana çıkmaktadır (Zhang vd., 2024). Fisyona ve hatta DT füzyonuna göre daha da temiz enerji eldesi mümkün hale gelebilmektedir. Fisyon reaksiyonunda radyoaktivite oldukça önemli husustur. DT füzyonu ise fisyona göre oldukça az nötron içerdiğinden daha temiz enerji olarak kabul edilmekle birlikte hala radyoaktivite konusu değerlendirilmesi gereken husus durumundadır. pB füzyonu ise bu noktada diğerlerine göre en temiz enerji sınıfında yer almaktadır. Ayrıca pB füzyonu barındırdığı bazı diğer özellikler nedeniyle medikal uygulamalar ve uzay teknolojilerinde kullanım potansiyele sahip durumdadır. pB füzyonunda açığa çıkan alfa parçacıkları hasta tedavisinde (PBCT) kullanılabilir (Jakobsen vd., 2025). Ek olarak pB füzyonunda açığa çıkan alfa parçacıkları yapısı itibarıyla doğrudan elektrik enerjisine çevrilebilme potansiyeline sahiptir. Böylelikle hem enerji dönüşüm işlemleri (pB-Elektrik) azaltılarak verimlilik yükseltilebilecek hem de ısı enerjisi devre dışı bırakılarak enerji dönüşümlerindeki sorunların önüne geçilebilecektir (Mckenzie vd., 2023). Bu da pB füzyonunun enerji üretiminde ve uzay teknolojilerinde kullanılma potansiyelini artırmaktadır. Sürdürülebilir enerji eldesi hedefinde pB füzyon reaksiyonunun sahip olduğu zorluklar özetle üç ana başlık altında toplanabilmektedir (Mckenzie vd., 2023). Bunlar;

- Yüksek Plazma Sıcaklığının eldesi ve sürdürülebilir olması (1.5 Milyar derece)
- Yeterli iyon yoğunluğunun eldesi ve yeterli hapsedme süresi (Bor hedef malzemesi, proton kaynağı vb.)
- Sistemin koşullarını muhafaza edebilecek malzeme eldesi (malzeme teknolojisi, ısı transferi vb.)

olarak ifade edilebilir. Bu zorlukların bazıları DT füzyon reaksiyonu ile benzer olduğundan çözüm yaklaşımları da benzer niteliktedir. Diğer taraftan bazı zorluklar pB füzyonuna has olduğundan farklı çözüm yaklaşımları değerlendirilmektedir. Bu bağlamda pB füzyonu ile ilgili tasarımları ve çalışmaları üç alt başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar;

- Manyetik Hapsedme Füzyonu (Magnetic Confinement Fusion, MCF)
- Eylemsiz Hapsedme Füzyonu (Inertial Confinement Fusion, ICF)
- Lazer Tetikleme Füzyonu (Laser Driven Fusion, LDF)

MCF klasik DT füzyonu ile benzer şekilde plazma ortamının manyetik koşullar (yüksek manyetik alan gibi) altında muhafaza etmeyi hedeflemektedir. MCF uygulamasında klasik DT füzyonunda genel olarak simit şeklindeki Tokamak sistemi üzerinde çalışılırken pB füzyonunda bunun yanında: Liu vd. (2024) Küresel Torus, Liu vd. (2024) ve Ogawa vd. (2024) Helisel sistem ile Lerner ve Hassan (2024) plazmoid gibi yapılar üzerinde durulan tasarımlar arasındadır. ICF sistemi de benzer şekilde hem klasik DT füzyonu hem de pB füzyonu için önerilen bir yöntemdir. Burada MCF'ye göre çok daha yoğun olan hedef malzemenin dış kısmına enerji aktararak plazma ortamının oluşturulması hedeflenmektedir. En dışta başlayan füzyon reaksiyonu neticesinde ortaya çıkan enerji ve yüksek basınç hem malzemenin dışına hem de içine etki edebilmektedir. İçeride doğru etki eden enerji ve basınç iç kısımdaki hedef malzemenin de zincir şeklinde füzyona uğramasına neden olmaktadır. LDF ise genelde ICF ile benzerlik göstermektedir. Ancak LDF'de iki yaklaşım söz konusudur. Bunlar Pitcher-Catcher ve in-target modelleridir (Batani, 2023). Pitcher-Catcher metodunda lazer bir proton üretici malzemeye (Pitcher) gönderilerek yüksek enerjili proton üretilmesine sebep olur. Yüksek enerjiye sahip bir şekilde Pitcher'den ayrılan protonlar bor asali malzemeye (Catcher) çarparak pB füzyonunu gerçekleştirmektedir. In-target modelinde ise lazer ışınları doğrudan hem bor hem de hidrojen (proton için) hedef malzemeye gönderilir ve malzemenin plazmaya dönüşmesi ve bu plazma içinde pB füzyonu reaksiyonunun gerçekleştirilmesi amaçlanır (Batani, 2023). Literatürde pB füzyonu uygulamalarında MCF, ICF ve LDF tek olarak önerildiği gibi bazı çalışmalarda hibrit olarak önerilmektedir (Khalemdo vd., 2024).

Proton-Bor Füzyonu ve TÜRKİYE

pB füzyonu reaksiyonunda girdiler (yakıt) hidrojenin çekirdeği olan proton ve Bor-11 izotopudur. Hidrojen doğada en çok bulunan elementlerden biri olup bu bağlamda proton eldesi reaksiyon açısından sorun teşkil etmemektedir. Diğer girdi olan Bor-11 izotopu doğal bor içinde %80 oranında bulunmaktadır. Türkiye dünya bor rezervlerinin yaklaşık %73'üne sahip olup bu konuda açık ara ile öndedir. Türkiye'nin bor rezervleri yaklaşık 3.3 milyar ton seviyesinde kabul edilmekle birlikte bunun eşdeğeri yaklaşık 960 milyon ton boroksit (B_2O_3)'tir (Bulut vd., 2025; Mckenzie vd., 2023). Buradan hareketle bunun yaklaşık 240 milyon tonu B-11 izotopu olarak değerlendirilebilir. Bu Bor-11 miktarı teorik olarak ve tam verim kabulü ile günümüz enerji ihtiyacını binlerce yıl (yaklaşık 28 bin yıl) karşılayabilecek seviyededir. Bu nedenle proton-bor füzyonu konularında dünyadaki gelişmelerin takip edilmesi, ortak çalışmalar yürütülmesi ve bu konularda gerekli altyapının oluşturularak planlamaların yapılması Türkiye'nin gelecek vizyonu açısından oldukça büyük öneme sahiptir.

Sonuç ve Öneriler

Enerji ihtiyacı giderek artmakla birlikte iklim değişikliği ile mücadele kapsamında temiz enerji üretimi önemli hale gelmektedir. Emre-amadelik, karbon emisyonu, radyoaktivite ve enerji-yoğun hususlar değerlendirildiğinde pB füzyon uygulaması oldukça yüksek potansiyele sahip gelecek vadeden sürdürülebilir enerji kaynağı durumdadır. Bu nedenle dünyanın teknolojiye önde olan ülkelerinin neredeyse tamamı pB füzyonu konusunda temiz, sürdürülebilir ve yoğun enerji eldesi amacıyla çalışmalar yürütmektedir. Bu bağlamda ülkemizin de pB füzyonu konusunda planlı çalışmalar yürütmesi önem arz etmektedir.

Diğer taraftan pB füzyonunun en kritik girdisi olan bor-11 izotopu, bu reaksiyonun ana yakıtı durumunda olup doğal borun yaklaşık %80'i bor-11 izotopudur. Türkiye, dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olmasıyla bu alanda yalnızca enerji üretebilecek bir ülke değil, aynı zamanda küresel ölçekte yakıt sağlayıcısı potansiyeline sahiptir. Bu eşsiz kaynak üstünlüğü sayesinde, pB füzyonunun ticarileşmesi durumunda Türkiye:

- Dünya enerji arz zincirinde merkezi bir rol üstlenebilecek,
- Jeostratejik konumunu enerji diplomasisine entegre edebilecek,
- Uzun vadeli enerji güvenliğini yerli kaynaklarla sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Bor rezervlerimizin mevcut dünya enerji tüketim düzeyi göz önüne alındığında, binlerce yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde olması, bu teknolojinin ülkemiz açısından ne denli kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

pB füzyonunun dünya genelinde hızla artan araştırma ve yatırım ilgisine konu olması, bu teknolojinin önümüzdeki birkaç on yıl içinde uygulanabilir hâle gelmesi ihtimalini güçlendirmektedir. Türkiye açısından bu gelişmelerin anlamı büyüktür. Türkiye'nin pB füzyonu planlaması bağlamında ortaya çıkan öneriler;

- **FUSION TÜRKİYE (FUTURE)** Araştırma Merkezi/Enstitüsü kurularak pB füzyonu konularında faaliyetler yürütmelidir.
- İlk 10 yıl içinde, altyapı oluşturulmalı, Ar-Ge desteklenmeli ve insan kaynağı yetiştirilmelidir. 20 yıl içinde ise Türkiye, bor bazlı füzyon yakıtının stratejik üreticisi ve ihracatçısı olarak konumlanmalıdır.
- Küresel gelişmeler yakından izlenmeli,
- Uluslararası iş birlikleri kurulmalı,
- Bor politikaları pB füzyon perspektifi de dikkate alınarak yeniden yapılandırılmalı ve
- Uzun vadeli bir devlet politikası ile bu alan desteklenmelidir.

Türkiye'nin sahip olduğu doğal kaynak gücü, bilimsel kapasitesi ve vizyoner yaklaşımı birleştirildiğinde, pB füzyonu Türkiye'nin 21. yüzyıldaki enerji geleceğinde anahtar rol oynayacak potansiyele sahiptir. Bu teknoloji, yalnızca bir enerji çözümü değil, aynı zamanda 2053 hedefleri

doğrultusunda ulusal kalkınma, enerji bağımsızlığı ve stratejik üstünlük sağlayabilecek bir fırsat olarak değerlendirilmelidir. Bu hususta GELECEK (FUTURE) ifadesinden esinlenerek önerdiğimiz FUSion TÜRKİYE (FUTURE) Araştırma Merkezi'nin oluşturulması ve "TÜRKİYE YÜZYILI" vizyonuna 2053 hedefli olmak üzere "TÜRKİYE FÜZYILI" adı altında katkı sunulması amaçlanmıştır.

Teşekkür ve Bilgi Notu

CA21128 Numaralı Cost Aksiyonu "Proton Boron Nuclear Fusion: From Energy Production To Medical Applications-PROBONO" yönetimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Aladi, M., Benabdelghani, I., & Kedves, M. Á. (2025). Alpha particle yield in femtosecond laser-driven proton–boron fusion. *The European Physical Journal Special Topics*, 1-7. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-025-01674-0>
- Batani, K. L., Rodrigues, M. R., Bonasera, A., Cipriani, M., Consoli, F., Filippi, F., ... & Batani, D. (2025). Generation of radioisotopes for medical applications using high-repetition, high-intensity lasers. *High Power Laser Science and Engineering*, 13, e11. <https://doi.org/10.1017/hpl.2024.92>
- BP, (2023). BP Statistical Review of World Energy, 2022. British Petroleum. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- Bulut, G., Aydın, Ş. B., Perek, K. T., & Arslan, F. (2025). Enrichment of Boron Using Physical and Chemical Methods: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/08827508.2025.2502360>
- Gail Tverberg, (2012). World Energy Consumption Since 1820 in Charts. *Our Finite World*. <https://ourfinitemworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>
- IEA, (2025). Global Energy Review 2025. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/>
- Jacobsen, V., Pan, V. A., Tran, L. T., Vohradsky, J., Bønnelykke, J., Herø, C. S., ... & Bassler, N. (2025). In-vitro and microdosimetric study of proton boron capture therapy and neutron capture enhanced proton therapy. *Physics in Medicine & Biology*, 70(5), 055008. DOI 10.1088/1361-6560/adb199
- Jeong, T. M., & Lee, J. (2014). Femtosecond petawatt laser. *Annalen der Physik*, 526(3-4), 157-172. <https://doi.org/10.1002/andp.201300192>
- Katoch, G., Sharma, G., Alaghbari, M., Ved, A., Kaur, J., Rajiv, A., ... & Khairandish, M. I. (2025). Fusion energy: a sustainable pathway to meeting future global energy demands. *Discover Sustainability*, 6(1), 221. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-025-00906-6>
- Khademloo, E., Mahdavi, M., & Azadboni, F. K. (2024). Investigation of Proton-Boron-11 degenerate fuel pellet ignition in the magneto-inertial fusion process: E Khademloo et al. *Indian Journal of Physics*, 98(13), 4543-4553. <https://doi.org/10.1007/s12648-024-03193-5>
- Kikuchi, M., Lackner, K., & Tran, M. Q. *Fusion Physics. International Atomic Energy Agency. P. 22. ISBN 9789201304100. Pp.22. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1562_web.pdf*
- Li, Z., Wang, Z., Zhao, G., Liu, B., Xie, H., Tan, M., ... & Luo, D. (2024). Proton–boron fusion in a hydrogen-doped-boron target. *Laser and Particle Beams*, 42, e5. <https://doi.org/10.1017/lpb.2024.2>

- Liu, M. S., Xie, H. S., Wang, Y. M., Dong, J. Q., Feng, K. M., Gu, X., ... & Zhao, H. Y. (2024). ENN's roadmap for proton-boron fusion based on spherical torus. *Physics of plasmas*, 31(6). <https://doi.org/10.1063/5.0199112>
- McKenzie, W., Batani, D., Mehlhorn, T. A., Margarone, D., Belloni, F., Campbell, E. M., ... & Hora, H. (2023). HB11—understanding hydrogen-boron fusion as a new clean energy source. *Journal of Fusion Energy*, 42(1), 17. [https://doi.org/10.1007/s10894-023-00349-9\(0123456789\(\).-volV\)\(0123456789,-\(\).volV\)](https://doi.org/10.1007/s10894-023-00349-9(0123456789().-volV)(0123456789,-().volV))
- Molloy, D. P., Orecchia, D., Tosca, M., Milani, A., Valt, M., McNamee, A., ... & Margarone, D. (2025). Alpha particle production from novel targets via laser-driven proton-boron fusion. *Physical Review Research*, 7(1), 013230. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.013230>
- Nissim, N., Batani, K. L., Giuffrida, L., & Eliezer, S. (2025). Proton boron nuclear fusion: from energy production to medical applications. *Frontiers in Physics*, 13, 1555688. <https://doi.org/10.3389/fphy.2025.1555688>
- Nouhi, B., Darabi, N., Sareh, P. et al. The fusion–fission optimization (FuFiO) algorithm. *Sci Rep* 12, 12396 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16498-4>
- Ogawa, K., Magee, R. M., Tajima, T., Gota, H., McCarroll, P., Allfrey, I., ... & Osakabe, M. (2024). Demonstration of aneutronic p-11B reaction in a magnetic confinement device. *Nuclear Fusion*, 64(9), 096028. DOI 10.1088/1741-4326/ad6615
- Picciotto, A., Valt, M., Molloy, D. P., Gaiardo, A., Milani, A., Kantarelou, V., ... & Margarone, D. (2024). Ammonia borane-based targets for new developments in laser-driven proton boron fusion. *Applied Surface Science*, 672, 160797. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160797>
- Tosca, M., Protsak, M., Nikitin, D., Škorvánková, K., Katuta, R., Pleskunov, P., ... & Choukourov, A. (2025). Boron/hydrocarbon plasma polymer nanofuels for green energy generation via laser-driven proton-boron fusion. *Materials Today Sustainability*, 30, 101118. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101118>
- TÜİK, (2022). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2020. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>
- Turcu, I. C. E., Margarone, D., Giuffrida, L., Picciotto, A., Spindloe, C., Robinson, A. P. L., & Batani, D. (2024). Borane (B m H n), Hydrogen rich, Proton Boron fusion fuel materials for high yield laser-driven Alpha sources. *Journal of Instrumentation*, 19(03), C03065. DOI 10.1088/1748-0221/19/03/C03065
- Zhang, Y., Zhang, Z., Dong, Y., Fang, K., Gu, H., Dai, Y., ... & Li, Y. (2024). Enhanced $\{\alpha\}$ particle generation via proton-boron fusion reactions in laser-modulated plasma. *arXiv preprint arXiv:2401.07253*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.07253>



PROTON-BOR FÜZYON ÇALIŞMALARINDA BOR BAZLI HEDEF MALZEMELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

CANAN CAN

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Alternatif Enerji Kaynakları, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye (Sorumlu Yazar) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5982-9759>

MİRAC KAMIŞLIOĞLU

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Bor Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0666-8832>

BÜLENT BÜYÜK

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye

Bor Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5967-6855>

Özet

Günümüzde enerji üretimi büyük ölçüde fosil yakıtlara dayalı olup, bu durum yılda yaklaşık 20 milyar ton karbondioksit salımına yol açmakta ve iklim değişikliğini hızlandırmaktadır. Güneş, rüzgâr ve biyoyakıt gibi yenilenebilir kaynaklar ise henüz bu açığı kapatacak kapasitede değildir. Geleneksel döteryum-trityum (DT), gelecekteki nükleer füzyon reaktörleri için bilinen en iyi aday yakıttır. DT yakıtı önerilen diğer yakıtlara kıyasla daha düşük enerjilerde daha büyük füzyon kesiti sağlar. Ancak, radyoaktif trityumun tedarik ve yönetimi, gelecekteki reaktörler için önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu nedenle günümüzde farklı yakıtlarla çalışan ileri füzyon projeleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Proton-Bor-11 (pB) füzyonu, yakıtlarının kararlı (radyoaktif olmayan) olması ve ortaya çıkan füzyon ürünlerinin anötronik, yani nötron üretmeyen yüklü parçacıklardan oluşması nedeniyle cazip bir alternatiftir. pB füzyon denklemi Eşitlik (1) ile verilmiştir.



Ayrıca bu durum, daha verimli doğrudan enerji dönüşümüne imkân tanımaktadır. Ancak pB füzyonunun, döteryum-trityum (DT) füzyonuyla karşılaştırılabilir tepkime kesitlerine ulaşabilmesi için çok daha yüksek enerjiler gerekmektedir. 2005 yılından bu yana Rusya, Fransa, Çek Cumhuriyeti, Japonya ve ABD'de yapılan bir dizi "pitcher-catcher" deneyi, kısa darbeleri lazerlerle yönlendirilen pB reaksiyonundan önemli alfa verimleri elde etmişlerdir. Optimal pB yakıtının belirlenmesine yönelik araştırmalar henüz başlangıç aşamasında olmakla birlikte, bu süreç faydalı pB füzyonunun nihai başarısı için kritik bir rol oynamaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, bor bazlı malzemeler arasında bor nitrür (BN), elementel bor (B), bor karbür (B₄C), amonyum boran (NH₃BH₃), çeşitli boran türevleri, nano-bor yapıları ve son olarak bor katkılı köpükler öne çıkmaktadır. Mevcut araştırmalar, bor yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmayı ve malzeme saflığını artırmayı hedefleyerek alfa parçacığı verimini yükseltmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, pB füzyonu için hedef malzeme olarak seçilen bor bazlı yapıların kullanılabilirliği ve potansiyeli tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Döteryum-trityum (DT), proton-Bor füzyonu (pB), alfa verimi, bor tabanlı malzemeler

DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF BORON BASED TARGET MATERIALS IN PROTON-BORON FUSION STUDIES

Abstract

Today, global energy production relies predominantly on fossil fuels, resulting in approximately 20 billion tons of carbon dioxide emissions annually and thereby accelerating climate change. Renewable sources such as solar, wind, and biofuels currently lack the capacity to fully compensate for this deficit. Conventional deuterium–tritium (DT) fusion remains the most promising candidate fuel for future nuclear fusion reactors, as it provides relatively high fusion cross-sections at lower energies compared to alternative fuels. However, the supply and management of radioactive tritium pose significant challenges for prospective reactor operations. Consequently, increasing attention has been directed toward advanced fusion projects utilizing alternative fuels. Proton–Boron-11 (pB) fusion emerges as an attractive option due to the stability (non-radioactivity) of its fuel components and the aneutronic nature of its fusion products charged particles without neutron emission. The pB fusion reaction is expressed by Equation (1):



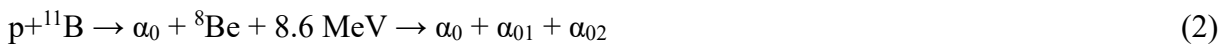
This feature also enables the prospect of more efficient direct energy conversion. Nevertheless, achieving fusion cross-sections comparable to D–T fusion requires considerably higher energies. Since 2005, a series of “pitcher–catcher” experiments conducted in Russia, France, the Czech Republic, Japan, and the United States have reported significant alpha yields from p–B reactions driven by short-pulse lasers. Research on identifying the optimal pB fuel is still in its early stages but remains a crucial factor for the eventual success of practical pB fusion. In recent years, various boron-based materials have been investigated, including boron nitride (BN), elemental boron (B), boron carbide (B₄C), ammonium borane (NH₃BH₃), other borane derivatives, nanostructured boron materials, and most recently, boron-doped foams. Current efforts aim to maximize boron density and enhance material purity to increase alpha particle yield. In this study, the applicability and potential of selected boron-based structures as target materials for pB fusion are discussed.

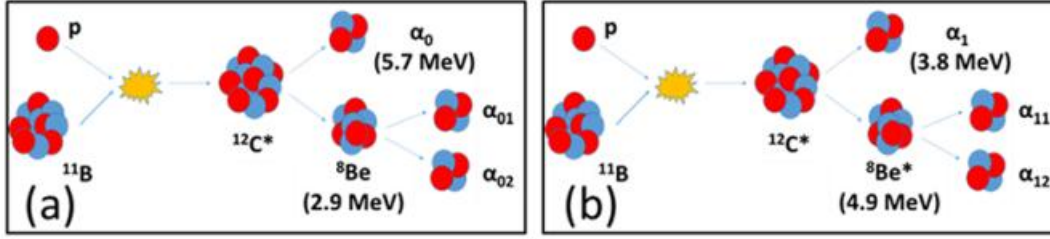
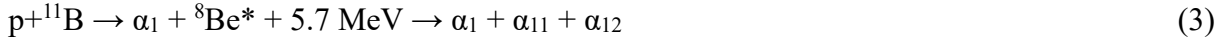
Keywords: Deuterium-tritium (DT), proton-Boron fusion (pB), alpha yield, boron-based materials

Giriş

Kontrollü füzyon enerjisi arayışı, 1950'lerden beri insanlığın uzun süredir hayalini kurduğu bir konu olmuştur; bu hayalin temel nedeni, karbonsuz yapısı, yüksek birim enerjisi ve bol miktarda kaynak içermesidir. Ancak, bu hedefe ulaşmada karşılaşılan zorluklar hem bilimsel hem de mühendislikle ilgilidir (Liu vd., 2024). Araştırma ve teknolojik geliştirmenin ana akımı füzyon enerjisi için döteryum-trityum reaksiyonuna yönelik olsa da, ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)2\alpha$ süreci yeniden ilgi gördü (Liu vd., 2024).

Proton-bor olarak da bilinen hidrojen-bor 11 (HB11) füzyon reaksiyonu, iklimi etkileyen fosil yakıtların gelecekteki kullanımını azaltma çabaları kapsamında büyük ölçekli enerji üretimi için en umut verici adaydır. Nükleer bir süreç olarak, kimyasal reaksiyonlardan yaklaşık yedi kat daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir ve anötronik birincil reaksiyonla, malzemelerde aktivasyona neden olmaz ve bu da ihmal edilebilir düzeyde radyoaktif atığa yol açar. Bu reaksiyonda üç alfa parçacığı ve yaklaşık 8,7 MeV enerji üretilir (McKenzie vd., 2023). Proton-bor (pB) füzyon reaksiyonun üç ana şeması şunlardır (Tosca vd., 2023):





Şekil 1. Proton-bor füzyonu (pB) ardışık süreçlerinin şematik diyagramı (Li vd., 2024)

Yüksek enerjili nötronlar yerine yalnızca yüklü alfa parçacıkları ürettiği için özellikle ilgi çekicidir. Bu, uzun ömürlü radyoaktif atık sorununu ortadan kaldırır ve yüklü parçacıklardan doğrudan elektriğe enerji dönüşümü olasılığını mümkün kılar (Picciotto vd., 2024). Dahası, bor bol miktarda bulunur, ucuzdur ve radyoaktif değildir, bu da onu gelecekteki enerji sistemleri için cazip bir yakıt haline getirir (Mohammadian, 2025; Aladi vd., 2025). Güç üretiminin ötesinde, pB füzyonunun tıbbi izotop üretimi, ileri kanser tedavileri ve uzay itki sistemlerinde potansiyel uygulamaları vardır (Meschini vd., 2023).

Proton-bor füzyonunun birçok avantajı olmasına rağmen pB füzyonunu gerçekleştirmek zordur. Geleneksel döteryum-trityum (D-T) yakıtıyla karşılaştırıldığında, pB'nin füzyon kesiti daha düşüktür ve daha yüksek proton enerjilerinde zirveye ulaşır; bu da 200 keV'nin üzerinde iyon sıcaklıklarına sahip aşırı plazma koşulları gerektirir (Mehlhorn vd., 2022). Termal plazmalarda, bu koşullar borun yüksek yük durumundan kaynaklanan önemli bremsstrahlung radyasyon kayıpları nedeniyle daha da karmaşıklaşır. Sonuç olarak, iyonların tüm plazmayı ısıtmadan füzyonla ilgili enerjilere hızlandırıldığı denge dışı yaklaşımlar giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle, ultra kısa, yüksek yoğunluklu lazer sistemlerinin ortaya çıkışı, termal olmayan füzyon rejimlerini keşfetmek için yeni fırsatlar yaratmıştır.

Son yirmi yılda, çeşitli deneysel kampanyalar lazerle çalışan pB füzyonundan ölçülebilir alfa parçacığı verimleri bildirdi. İlk deneyler, pikosaniye lazerlerin bor açısından zengin hedeflerle etkileşime girmesiyle reaksiyonun tetiklenmesinin uygulanabilirliğini gösterdi. Daha yakın zamanlarda, PALS (Prag Asterix Lazer Sistemi) ve ELI Beamlines gibi tesislerdeki deneyler, darbe başına 10¹¹ alfa parçacığına kadar rekor verimlere ulaşarak, lazerle çalışan düzeneklerin reaktiviteyi artırma potansiyelini doğruladı (Giuffrida vd., 2020; Mehlhorn vd., 2022; Tosca vd., 2025a).

Proton Bor füzyon deneyleri genellikle iki ana ışınlama düzenine, yani "in-target" ve "pitcher-catcher" düzene göre sınıflandırılır. "In-target" (hedef içi) konfigürasyonlar (protonların doğrudan bor açısından zengin hedeflere hızlandırıldığı) ve "pitcher-catcher" (atıcı-yakalayıcı) düzenekler (ayrı bir proton kaynağının bir bor hedefini ışınladığı) gibi farklı deneysel geometriler araştırıldı ve her biri kendine özgü avantajlar sundu (Batani, 2023). Buna paralel olarak, hidrojen açısından zengin köpükler, bor-hidrokarbon kompozitleri ve amonyum boran malzemeleri içeren yeni hedef tasarımları, reaksiyona giren iyonların bulunabilirliğini artırarak füzyon verimini önemli ölçüde artırmada umut vaat etmektedir.

Yapılan çalışmalardaki sonuçlar, pB füzyonunun ilerlemesindeki hem ilerlemeyi hem de zorlukları vurgulamaktadır. Tepkime deneysel olarak gösterilmiş olsa da net enerji kazanımına ölçeklendirme zorlu bir görev olmaya devam etmektedir. Bu nedenle, mevcut çalışmalar hedef tasarımını, lazer-plazma etkileşim fiziğini ve proton hızlandırma mekanizmalarını optimize etmeye ve alfa parçacıklarının reaktiviteyi daha da artırdığı olası çıkış etkilerini araştırmaya odaklanmaktadır. Bu

gelişmeler bir araya geldiğinde, lazerle çalışan pB füzyonunun henüz bir güç kaynağı olarak pratik olmasa da hem füzyon enerjisi hem de uygulamalı bilimler için önemli çıkarımlara sahip verimli bir araştırma alanı olarak hızla ortaya çıktığını göstermektedir.

Bu çalışmada bor bazlı hedef materyal seçiminin alfa verim artışı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla 2005-2025 yılları arasındaki güncel literatür çalışmaları incelenmiştir. Hedef malzemelerin yapısal özellikleri ve hedef geometrisi türünün füzyon verimine katkısı çalışmalarda açıkça görülmektedir. Hedef içi geometri konfigürasyonunun son yıllarda verimdeki artıştan dolayı daha çok tercih edildiği gözlenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bor Hedefleriyle Gerçekleştirilen Lazer Deneylerinde Alfa Parçacığı Üretim Verimleri

Oliphant ve Rutherford (1933) tarafından yapılan çalışmadaki teorik öngörülerden ilham alınarak lazerle çalışan pB füzyonu üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Belyaev vd. (2005) tarafından başlatılmış ve son birkaç yılda bu çalışmalara yoğunlaşmıştır. Genellikle polimerler ve bor nitrür (daha nadiren B ve diğer B bileşikleri), hidrojen ve bor için katı kaynaklar olarak hizmet eder ve bunların yığın halindeki malzemeler halindeki kombinasyonları, lazer ışınımı için hedef olarak kullanılır. Bugüne kadar, bu çabalar düzlemsel hedef yüzeylerin düşük enerji soğurma kapasitesinin kritik bir sınırlamasıyla karşı karşıya kalmıştır: α -parçacıklarının verimi, proton verimiyle güçlü bir şekilde ilişkilidir ve bu da düzlemsel yüzeylerden gelen güçlü bir lazer yansımasıyla sınırlıdır. Teorik hesaplamalar Margarone vd. (2015) ve Giuffrida vd. (2017) tarafından yapılan çalışmalarda bu zorluğun nanoyapılı ve gözenekli malzemeler kullanılarak hafifletilebileceğini göstermiştir çünkü gelen lazerin dalga boyundan ($\sim 1 \mu\text{m}$) daha küçük yapılar, çoklu foton saçılmasını kolaylaştırarak lazer darbesinin hacimsel emilmesini arttırabilir ve iyon enerjisi kesintisini, verimini ve ivmesini iyileştirebilir. Ne yazık ki, bor ve hidrokarbonları aynı anda birleştiren uygun nanomalzemeler kolayca bulunamamaktadır, çünkü bu termodinamik olarak karışmayan malzemelerin geleneksel kimyasal denge koşulları altında nasıl karıştırılacağı konusunda bir bilgi boşluğu bulunmaktadır (Tosca vd., 2025b).

Belyaev vd. (2005) bor açısından zengin bir polimer hedefle etkileşime giren yoğun bir pikosaniye lazer darbesi ($2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$) kullanarak proton-Bor (pB) füzyonunu başlatma olasılığını ilk kez gösterdiler. Bu düzenekte, lazer-hedef etkileşimiyle üretilen protonlar bor çekirdekleriyle çarpışarak nükleer reaksiyonları tetikler. Başlangıçtaki alfa parçacık verimi $\sim 10^3$ alfa/sr/atış olarak tahmin edilmiş, daha sonra Kimura ve ark. tarafından 10^5 alfa/sr/atış olarak güncellenmiştir (Kimura vd., 2009).

Labaune vd. (2013) Fransa'daki LULI lazer tesisinde iki lazerli bir şema kullanarak deneyler yürüttüler: katı bir bor hedefini iyonlaştırmak için nanosaniye süreli bir lazer ve protonları hızlandırmak için yüksek yoğunluklu bir pikosaniye lazer ($6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$). Bu yaklaşım, önceki raporları önemli ölçüde aşan, yaklaşık 9×10^6 alfa/sr/atışlık maksimum α -parçacık verimi elde etti.

Picciotto vd., tarafından yürütülen deneyde Belyaev vd. (2005) tarafından daha önce kullanılan deney düzeneklerini, Prag Asterix Lazer Sistemi'nde (PALS, Çek Cumhuriyeti) nanosaniyenin altında orta yoğunluklu bir lazer (10^{16} W/cm^2) ile uygulayarak, önemli ölçüde daha yüksek α -parçacık verimleri ($\sim 10^9$ alfa/sr/atış) elde ettiler. Hedefleri, iyon aşılama yoluyla borla katkılanmış ve tavlama yoluyla hidrojenle zenginleştirilmiş hidrojene silikondan oluşuyordu. Sonraki deneyler, bu sonuçları farklı hedef tipleri ve kalınlıklarında doğruladı (Picciotto vd., 2014).

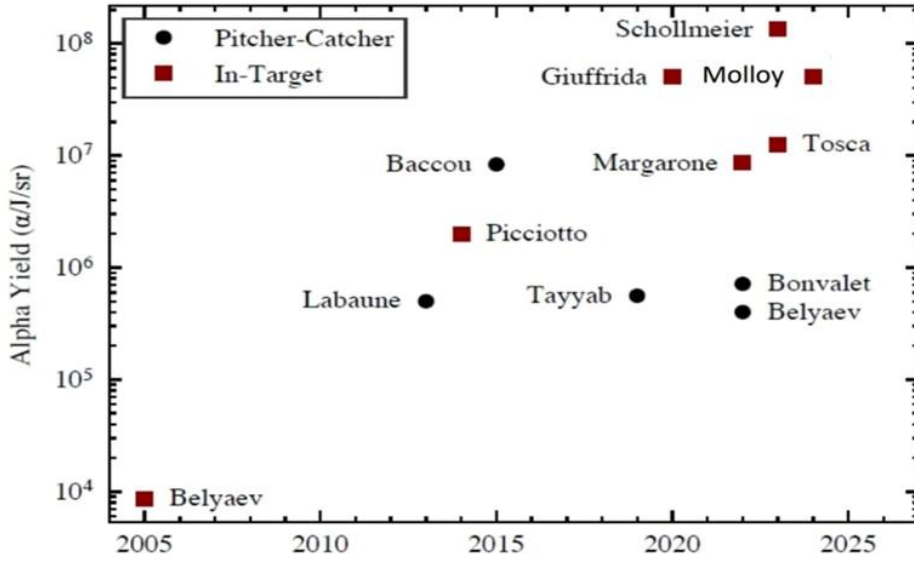
Giuffrida vd. (2020) lazerle yönlendirilmiş proton-Bor (pB) füzyon reaksiyonunu kullanarak o zamana kadar elde edilmiş en yüksek alfa parçacığı üretimini gerçekleştirmiştir. Çalışmada 0.3 ns süreli ve $3 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ yoğunlukta lazer darbesi ile yarım mm kalınlığındaki Bor Nitrür (BN) hedef

üzerine yapılan ışınlama sonucunda yaklaşık 1.3×10^{11} tane alfa parçacığı elde etmiştir. Deneyde elde edilen alfa parçacıkları 10 MeV'ye kadar kinetik enerjiye, 10 ns darbe süresine ve 1 metre mesafede yaklaşık 2 A tepe akımına sahiptir. Termonükleer reaksiyonlarla açıklanamayan bu yüksek verim ileri yönde hızlandırılan protonların hedefteki ^{11}B atomlarıyla etkileşerek füzyon oluşturduğu ışın temelli bir modelle açıklanmıştır. Ayrıca alfa parçacıklarının geri yönde hızlanarak beklenenden daha yüksek enerjiye sahip oldukları gözlenmiş ve bu durum lazer kaynaklı elektrostatik alanlara bağlanmıştır. Bu sonuçlar anötronik füzyon uygulamalar için umut vaat eden bir gelişme olarak değerlendirilmektedir.

Picciotto vd. (2024) lazerle çalışan proton-Bor (pB) füzyonu için bor açısından zengin yeni bir hedef malzeme olarak amonyum boranı (NH_3BH_3) tanıtmıştır. Ayrıntılı kimyasal, morfolojik ve plazma tanılama yöntemleriyle, amonyum borandaki yüksek atom yoğunluklu hidrojen ve borun, atış başına $10^8 \alpha/\text{sr}$ 'a varan verimlerle verimli alfa parçacık üretimine olanak sağladığını gösterdiler. Radyasyon-hidrokinamik ve hücre içi parçacık simülasyonlarıyla desteklenen çalışma, amonyum boranı, anötronik füzyon ve kompakt alfa parçacık kaynakları için kararlı, ölçeklenebilir ve umut verici bir hedef olarak ön planda tutmaktadır.

Krüs vd. (2024) katı halde bulunan bor hidrürlerinden biri olan oktadekaboran ($\text{B}_{18}\text{H}_{22}$) kullanarak lazerle çalışan proton-Bor (pB) füzyonunu deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. PALS tesisinde gerçekleştiren çalışmada 550 J enerjili ve 350 ps süreli lazer darbeleriyle hedef ışınlanmış ve $1.7 \times 10^9 \alpha/\text{sr}/\text{shot}$ düzeyinde alfa parçacığı üretimi elde edilmiştir. Alfa parçacıklarının üretimi CR39 nükleer iz dedektörleriyle doğrulanmış, parçacık enerjileri ise zaman-uçuş (TOF) spektrometresiyle 38 MeV civarında ölçülmüştür. Elde edilen veriler, füzyon kaynaklı α parçacıkların açık bir şekilde üretildiğini ve bor hidrürlerin "hedef içi" füzyon şemaları için güçlü bir aday yakıt türü olduğunu ortaya koymaktadır.

Tosca vd. (2025) LFEX petawatt tesisinde hedef içi (doğrudan ışınlama) konfigürasyonları kullanarak lazerle çalıştırılan proton-bor füzyonunu araştırdılar. Petawatt sınıfı, 2,7 ps lazer darbeleri ($\approx 2-3 \times 10^{19} \text{ W cm}^{-2}$) farklı geometrilere sahip bor içeren hedeflere odaklandı; bu hedefler düz folyolar, kama, silindirler ve bor oksit katkılı polimerler ve bor nitrürden yapılmış tamamen kapalı küresel kapsüllerdir. CR-39 dedektörleri ve bir Thomson parabol spektrometresi kullanan ekip, küresel olarak sınırlandırılmış hedeflerin düzlemsel folyolara ($\approx 10^7-10^8 \alpha/\text{sr}$) kıyasla iki büyüklük sırasına kadar daha yüksek alfa parçacık verimi ($\approx 10^9-10^{11} \alpha/\text{sr}$) ürettiğini buldu. Bu gelişme, lazerle hızlandırılmış protonların bor çekirdekleriyle etkileşim süresini artıran geometrik hapsedmeye atfedildi. Kama hedefler ara sonuçlar verirken, BN silindirler daha az etkili performans gösterdi. Çalışma, kapalı hedef geometrilerin pB deneylerinde α -parçacık üretimini ve genel füzyon verimliliğini önemli ölçüde arttırabileceğini göstermiştir.



Şekil 2. Lazer enerjisiyle normalize edilen ve hedef geometriyle ayrılan lazer güdümlü pB füzyon reaksiyonları yoluyla üretilen 2005-2025 yılları arasındaki alfa parçacığı verimleri (Soldaki ölçek hedefe iletilen lazer enerjisine (parçacık/J/sr) göre normalleştirilmiştir.) (Molloy vd., 2025)

Bulgular ve Tartışma

2005 yılından bu yana, çeşitli araştırma tesislerinde çok sayıda lazerle çalışan proton-bor-11 (pB) füzyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin ortak amacı, lazerle çalışan yüklü parçacık hızlandırma (CPA) yoluyla yüksek enerjili proton üretimini optimize etmek ve bu protonları bor içeren hedeflerde pB füzyon reaksiyonu yoluyla alfa parçacığı üretimini başlatmak için kullanmaktır.

Tablo 1. 2005-2025 yılları arasında lazer güdümlü pB füzyon çalışmalarına ait veriler (Mehlhorn vd., 2022; Schollmeier vd., 2023; Wei vd., 2023; Tosca vd., 2023; Picciotto vd., 2024; Krus vd., 2024; Tosca vd., 2025b; Molloy vd., 2025; Tosca vd., 2025a; Wang vd., 2025)

Yıl	Araştırmacı	Tesis	Lazer	Geometri Türü	Alfa Parçacığı (α/sr/shot)
2005	Belyaev	NLF, Rusya	Neodim TW	Hedef içi	1.3×10^5
2013	Bonasera	ENEA, İtalya	ABC	Hedef içi	$\leq 10^5$
2013	Labaune	LULI, Fransa	Pico2000	Pitcher-Catcher	1×10^7
2014	Margarone	Prag	PALS	Hedef İçi	1×10^9
2014	Picciotto	Prag	PALS	Hedef İçi	1×10^9
2015	Baccou	LULI, Fransa	ELFIE	Pitcher-Catcher	1×10^8
2019	Tayyab	Hindistan	150 TW Ti:Sa	Pitcher-Catcher	$\sim 1.4 \times 10^6$
2020	Bonvalet	Japonya	LFEX	Pitcher-Catcher	$\sim 10^8 - 10^9$
2020	Giuffrida	Prag	PALS	Hedef İçi	3×10^{10}

2020	Margarone	Japonya	LFEX	Pitcher–Catcher	5×10^9
2022	Heglich	Teksas	TPW	Pitcher–Catcher	4×10^9
2022	Margarone	ILE	LFEX	Hedef İçi	1.2×10^{10}
2023	Schollmeier	ALEPH, ABD	Ti:Sa	Hedef İçi	1.3×10^8
2023	Wei	Lazer Füzyon Araştırma Merkezi, Çin	XG-III	Pitcher–Catcher	1.5×10^{10}
2023	Tosca	Queen's University Belfast, UK	TARANIS	Hedef İçi	1×10^8
		Prag	Perla B	Hedef İçi	6×10^3
2024	Picciotto	Queen's University Belfast, UK	TARANIS	Hedef İçi	1×10^8
2024	Krüs	Prag	PALS	Hedef İçi	1.7×10^9
2025	Tosca	Queen's University Belfast, UK	TARANIS	Hedef İçi	5.6×10^8
2025	Molloy	Queen's University Belfast, UK	TARANIS	Hedef İçi	5×10^8
2025	Tosca	ILE, Japonya	LFEX	Hedef İçi	$\sim 10^9 - 10^{11}$
2025	Wang	SIOM, Çin	Ti:Sa PW	Hedef İçi	$\sim 10^7$

Şekil 2 ve Tablo 1'de görüldüğü üzere, alfa verimleri 2005 ve 2015 yılları arasında 10^5 ile 10^8 arasında değişerek nispeten sabit kalmıştır. 2020'yi takiben üretim seviyeleri belirgin bir artış göstermiş, sıklıkla 10^9 ve hatta 10^{10} mertebesinde değerlere ulaşmıştır. 2023 ve 2025 yılları arasında toplanan veriler, alfa üretiminin bu dönemde maksimuma ulaştığını göstermektedir. Alfa verimindeki bu belirgin iyileşme, özellikle lazer teknolojisi ve hedef tasarımı, üretim verimliliğini topluca optimize eden deneysel metodolojilerdeki son gelişmelerin önemli etkisini yansıtmaktadır. Lazerle çalışan proton-Bor (pB) füzyonunun son deneysel araştırmaları ve sayısal simülasyonları, bor bazlı hedeflerin yükseltilmiş hidrojen ve bor içeriği, nanometre ölçeğinde yapılandırma veya optimize edilmiş geometrik konfigürasyonlarla tasarlandığında önemli ölçüde iyileştirilmiş performans gösterdiğini göstermektedir. Bu gözlemler, maksimum füzyon verimine ulaşmada malzeme optimizasyonunun ve teknolojik yeniliğin önemli rolünü vurgulamaktadır.

Son yirmi yılda bor bazlı malzemelerin geliştirilmesi, proton-Bor (pB) füzyonunun daha yüksek reaktivite ve enerji verimine doğru ilerlemesinde merkezi bir faktör olarak ortaya çıkmıştır. Bor nitrür kompozitlerinden ve sınırlandırılmış küresel geometrilerden nanotel ve nano gözenekli yapılara kadar uzanan tasarlanmış bor yapılarını kullanan son deneysel araştırmalar, malzeme morfolojisinin plazma-hedef kuplajını (etkileşim verimliliği) ve füzyon dinamiklerini kritik bir şekilde yönettiğini göstermiştir. Küresel ve silindirik bor nitrür hedefler gibi sınırlandırılmış konfigürasyonlarda, $\sim 10^{10} - 10^{11}$ α/sr 'a kadar arttırılmış α -parçacık emisyonu bildirilmiştir. Bu artış, protonların hedef içinde daha uzun süre kalması, birden fazla çarpışma yolu izlemesi ve plazmanın kendi kendine oluşturduğu elektromanyetik alanların iyonları belirli bölgelerde hapsederek füzyon reaksiyonlarını yoğunlaştırması gibi etkenlere bağlanmaktadır (Tosca vd., 2025a).

Ultra yoğun femtosaniye lazer darbeleriyle ısınlanan nano yapı ve nanotel dizili bor hedeflerini kullanan paralel çalışmalar, nano boyutta alan iyileştirmesinin ve artan yüzey alanının termal olmayan pB füzyon süreçlerini yönlendirmedeki rolünü daha da doğrulamıştır. Genellikle bor karbür veya borla zenginleştirilmiş polimerlerden oluşan bu nanotel sistemleri, üstün lazer emilimi ve proton

hızlandırma verimliliği sergileyerek, teorik tahminler ve hücre içi parçacık simülasyonlarıyla tutarlı α -parçacık çıktıları sağlar (Wang vd., 2025).

Bu bulgular topluca, pB füzyon araştırmalarında basit düzlemsel folyoların kullanımından, daha verimli reaksiyon ortamlarını destekleyebilen karmaşık, nanoyapılı ve geometrik olarak sınırlandırılmış bor malzemelerine doğru bir paradigma değişiminin altını çizmektedir. Malzeme bilimi, hedef mühendisliği ve yüksek yoğunluklu lazer teknolojisinin bir araya gelmesi, anötronik füzyon çalışmalarında yeni bir rejim tanımlamaktadır; burada bor bazlı ortamların optimizasyonu yalnızca yardımcı olmakla kalmayıp, önemli alfa parçacık üretimi elde etmek ve net enerjili lazerle çalışan füzyon için ilgili koşullara yaklaşmak için temel teşkil etmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Proton-bor (pB) füzyonunda yüksek alfa verimine giden yolda bazı sınırlamalar ve belirsizlikler hala devam etmektedir. Yüksek hidrojen ve bor içeriğine sahip bor bazlı malzemelerin (örneğin boranlar, amonyum boran), nanoyapılı yüzeylerin (köpükler, nanoteller, nanotüpler) ve hacimsel emilimi veya proton tutulumunu destekleyen geometrilerin (örneğin nanotel dizileri, optimum kalınlıktaki köpükler, sınırlı geometriler) en yüksek alfa verimine yol açtığını göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar için, hidrojen-bor (H/B) oranının, hedef yoğunluğunun, gözenekliliğin ve lazer kontrastının füzyon verimleri üzerindeki etkisini belirlemek için sistematik parametre çalışmalarına ihtiyaç vardır. Ayrıca yüksek tekrarlıma oranlı lazerlerin iyi karakterize edilmiş bor-hidrojen kompozitleriyle entegre edilmesi, temel alfa parçacığı üretiminden, uygulamalar için uygulanabilir ölçekte yüksek verimlere ulaşma yolunda köprü oluşturabilir.

Kaynaklar

- Aladi, M., Benabdelghani, I., & Kedves, M. Á. (2025). Alpha particle yield in femtosecond laser-driven proton–boron fusion. *The European Physical Journal Special Topics*, 1-7.
- Batani, K. (2023). Perspectives on research on laser driven proton-boron fusion and applications. *Journal of Instrumentation*, 18(09), C09012.
- Belyaev, V. S., Matafonov, A. P., Vinogradov, V. I., Krainov, V. P., Lisitsa, V. S., Roussetski, A. S., ... & Andrianov, V. P. (2005). Observation of neutronless fusion reactions in picosecond laser plasmas. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 72(2), 026406.
- Giuffrida, L., Svensson, K., Psikal, J., Dalui, M., Ekerfelt, H., Gallardo Gonzalez, I., ... & Margarone, D. (2017). Manipulation of laser-accelerated proton beam profiles by nanostructured and microstructured targets. *Physical Review Accelerators and Beams*, 20(8), 081301.
- Giuffrida, L., Belloni, F., Margarone, D., Petringa, G., Milluzzo, G., Scuderi, V., ... & Cirrone, G. A. P. (2020). High-current stream of energetic α particles from laser-driven proton-boron fusion. *Physical Review E*, 101(1), 013204.
- Kimura, S., Anzalone, A., & Bonasera, A. (2009). Comment on “Observation of neutronless fusion reactions in picosecond laser plasmas”. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 79(3), 038401.
- Krůs, M., Ehn, M., Kozlová, M., Bould, J., Pokorný, P., Gajdoš, P., ... & Londesborough, M. G. S. (2024). High Yield of Alpha Particles Generated in Proton-Boron Nuclear Fusion Reactions Induced in Solid Boron Hydride B $\{ \{ 18 \} \}$ H $\{ \{ 22 \} \}$. arXiv preprint arXiv:2407.06729.

- Labaune, C., Baccou, C., Depierreux, S., Goyon, C., Loisel, G., Yahia, V., & Rafelski, J. (2013). Fusion reactions initiated by laser-accelerated particle beams in a laser-produced plasma. *Nature Communications*, 4(1), 2506.
- Li, Z., Wang, Z., Zhao, G., Liu, B., Xie, H., Tan, M., ... & Luo, D. (2024). Proton–boron fusion in a hydrogen-doped-boron target. *Laser and Particle Beams*, 42, e5.
- Liu, M. S., Xie, H. S., Wang, Y. M., Dong, J. Q., Feng, K. M., Gu, X., ... & Zhao, H. Y. (2024). ENN's roadmap for proton-boron fusion based on spherical torus. *Physics of plasmas*, 31(6).
- Liu, S. J., Wu, D., Hu, T. X., Liang, T. Y., Ning, X. C., Liang, J. H., ... & Zhang, J. (2024). Proton-boron fusion scheme taking into account the effects of target degeneracy. *Physical Review Research*, 6(1), 013323.
- Margarone, D., Kim, I. J., Psikal, J., Kaufman, J., Mocek, T., Choi, I. W., ... & Jeong, T. M. (2015). Laser-driven high-energy proton beam with homogeneous spatial profile from a nanosphere target. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 18(7), 071304.
- McKenzie, W., Batani, D., Mehlhorn, T. A., Margarone, D., Belloni, F., Campbell, E. M., ... & Hora, H. (2023). HB11—understanding hydrogen-boron fusion as a new clean energy source. *Journal of Fusion Energy*, 42(1), 17.
- Mehlhorn, T. A., Labun, L., Hegelich, B. M., Margarone, D., Gu, M. F., Batani, D., ... & Ramakrishna, B. (2022). Path to increasing p-B11 reactivity via ps and ns lasers. *Laser and Particle Beams*, 2022, e1.
- Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., & Panella, B. (2023). Review of commercial nuclear fusion projects. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1157394.
- Mohammadian Pourtalari, A. (2025). Nuclear Fusion of Hydrogen-Boron: A Clean Energy for the Future.
- Molloy, D. P., Orecchia, D., Tosca, M., Milani, A., Valt, M., McNamee, A., ... & Margarone, D. (2025). Alpha particle production from novel targets via laser-driven proton-boron fusion. *Physical Review Research*, 7(1), 013230.
- Oliphant, M. L. E., & Rutherford, E. (1933). Experiments on the transmutation of elements by protons. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 141(843), 259-281.
- Picciotto, A., Margarone, D., Velyhan, A., Bellutti, P., Krasa, J., Szydlowsky, A., ... & Korn, G. (2014). Boron-proton nuclear-fusion enhancement induced in boron-doped silicon targets by low-contrast pulsed laser. *Physical Review X*, 4(3), 031030.
- Picciotto, A., Valt, M., Molloy, D. P., Gaiardo, A., Milani, A., Kantarelou, V., ... & Margarone, D. (2024). Ammonia borane-based targets for new developments in laser-driven proton boron fusion. *Applied Surface Science*, 672, 160797.
- Schollmeier, M. S., Bekx, J. J., Hartmann, J., Schork, E., Speicher, M., Brodersen, A. F., ... & Korn, G. (2023). Differentiating multi-MeV, multi-ion spectra with CR-39 solid-state nuclear track detectors. *Scientific Reports*, 13(1), 18155.
- Tosca, M., Molloy, D., McNamee, A., Pleskunov, P., Protsak, M., Biliak, K., ... & Choukourov, A. (2023). Plasma polymers as targets for laser-driven proton-boron fusion. *Frontiers in Physics*, 11, 1227140.
- Tosca, M., Protsak, M., Nikitin, D., Škorvánková, K., Katuta, R., Pleskunov, P., ... & Choukourov, A. (2025). Boron/hydrocarbon plasma polymer nanofuels for green energy generation via laser-driven proton-boron fusion. *Materials Today Sustainability*, 30, 101118.

Tosca, M., Batani, D., Giuffrida, L., Nicolai, P., Caizergues, C., Margarone, D., ... & Morace, A. (2025). Hydrogen boron fusion in confined geometries. *High Power Laser Science and Engineering*, 1-19.

Wang, P., Xu, J., Zhang, G., Deng, X., Wang, Y., Ma, Z., ... & Ma, Y. G. (2025). Proton–boron fusion in femtosecond-laser-irradiated nanowire array target. *Physics of Plasmas*, 32(10).

Wei, W. Q., Zhang, S. Z., Deng, Z. G., Qi, W., Xu, H., Liu, L. R., ... & Zhao, Y. T. (2023). Proton-boron fusion yield increased by orders of magnitude with foam targets. *arXiv preprint arXiv:2308.10878*.

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF CdS/CdTe SOLAR CELLS BASED ON CdTe PRODUCED BY THE COLD SUBSTRATE METHOD

Vagif NEVRUZOGLU

Prof. Dr., Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Energy Systems Engineering, Rize-Türkiye, ORCID: 0000-0002-8758-4760

Büşra TOPCU (ILIK)

Student, Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Energy Systems Engineering, Rize-Türkiye, ORCID: 0000-0003-0635-4275

Melih MANIR

Dr., Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Energy Systems Engineering, Rize-Türkiye, (Responsible Author) ORCID: 0000-0001-5791-8937

Abstract

As is known, semiconductors belonging to the A₂B₆ semiconductor group (CdTe, CdS, CdSe, ZnSe, ZnS, etc.) contain elements with high vapor pressures and develop numerous structural defects during their production. This restricts the use of these materials in device fabrication. In this study, CdTe films used as absorber layers in solar cells (CdS/CdTe) were grown for the first time on the surface of cooled glass/Au+Cu layers at wide substrate temperatures (300 K-100 K) with 50 K intervals. It was observed that the CdTe films produced at all substrate temperatures grew in the direction of (111) planes in a cubic structure. However, as the substrate temperature approached 100 K, the X-ray diffraction patterns (XRD) spectra of the CdTe films exhibited broad 2 θ angle spectra similar to a Gaussian distribution. FESEM images showed that the CdTe film produced at a substrate temperature of 200 K consisted of grains of equal size (30-40 nm), and this occurred via the soliton growth mechanism expected from the cold substrate method. In the second stage of the study, CdTe (2.5-3 μ m) was evaporated onto the surface of the Glass/Au+Cu binary structures at a substrate temperature of 200 K. This ternary structure was heated at a substrate temperature of 230 °C, and the CdS optical window layer (100-150 nm) was evaporated. The photovoltaic parameters of the resulting In/n-CdS/p-CdTe/Cu+Au/Cam solar cell were investigated in dark and bright conditions (100 mW/cm²), and the obtained photovoltaic parameters were compared with solar cells produced using standard methods. It was understood that the solar cell obtained with the new application exhibited higher photovoltaic parameters (I_{SC} = 11.53 mA, V_{OC} = 0.43 V, FF = 0.56 and η (%) = 5.60) due to the fact that the CdTe photoactive layer with high vapor pressure was produced by the cold substrate method and thus has a high stoichiometric crystal structure. The photovoltaic parameters of the CdS/CdTe solar cells of the CdS layers produced at 200 K substrate temperatures were calculated as, respectively.

Keywords: Cold Substrate, Soliton Model, Nanoparticle, Solar Cell, Photovoltaic Parameter.

Introduction

The biggest obstacle to the widespread use of solar cells is their high cost (De Vos et al., 1994; Nykyruy et al., 2019). On the other hand, semiconductors belonging to the A₂B₆ group (such as CdS, CdSe, CdTe, ZnTe, and ZnSe), known to be low-cost, are not preferred for device production because they contain elements with high vapor pressures (S, Te, and Se). These semiconductors are generally produced by vacuum evaporation, and uncontrolled defects and defect complexes form in their crystal

structures. These uncontrolled defects in the crystal structure mainly consist of cadmium interstitials with donor properties and sulfur and tellurium (Cdi, Vs, VTe) vacancies (Chou et al., 1996). This negatively affects the characteristics of devices built on the produced films. A review of studies conducted on the A2B6 semiconductor in the literature reveals the importance of developing innovative methods for the widespread use of these structures. In this study, we planned to produce a CdTe film, used as the photoactive layer in a CdS/CdTe solar cell, on cooled substrates using a new method. This method will allow us to produce CdTe films with highly stoichiometric crystal structures and investigate their effects on solar cell efficiency.

Studies have shown that the film formation mechanism on cooled substrates is mediated by soliton waves (Manir et al., 2025, Nevruzoglu et al., 2020, Belyaev and Rubets, 2001, Polat et al. 2011). Thanks to the soliton waves generated on the substrate surface, films generally consist of equally sized grains. This allows the produced film to exhibit properties close to single crystal properties. In the literature, the minimum thickness of the CdTe film used as the photoactive layer is 350 nm, while the minimum thickness of the CdS film used as the optical window is 100-150 nm (Das vd., 2020). In this study, we will first determine the soliton temperature for the formation of the CdTe layer and the evaporation time required to achieve the desired thickness. Photovoltaic parameters of solar cells with the same structural content produced by two different technological methods (classical and cold substrate method) will be examined in dark and light (100 mW/cm^2) environments and the obtained results will be compared and interpreted.

Materials and Methods

The fabricated In/n-CdS/p-CdTe/Au+Au solar cell model is shown in Figure 1. In this design, a metallic In-CdTe structure will be applied as an ohmic contact to the CdS layer, and a Cu+Au binary structure will be applied to the CdS and CdTe surfaces. In this application, the In and Cu+Au binary structures will be evaporated onto the CdS and CdTe surfaces, respectively, by vacuum evaporation (Bazner et al., 2000). First, CdTe films grown on glass surfaces using the cold-substrate method will be obtained at different substrate temperatures (300-100 K) at 50 K intervals, and their characteristic properties will be investigated. The results obtained from structural experiments (XRD, FESEM, EDS) and optical measurements will be analyzed, and the production regime in which the soliton growth mechanism occurs will be determined. Then, in the specified regime, a CdTe film of the desired thickness will be evaporated using the cold-substrate method, and the CdS film will be evaporated to a 100-150 nm thickness onto a CdTe surface heated at 200°C . Ohmic contacts will be applied to this sandwich structure and the formation of the heterojunction will be achieved by annealing it at 350°C for 15 minutes in air.

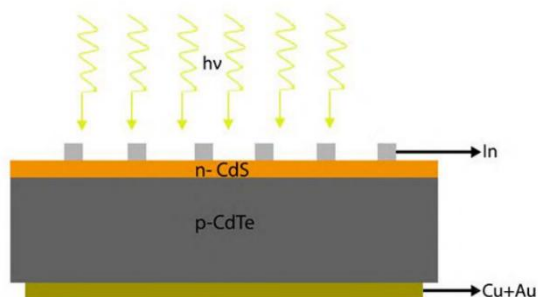


Figure 1. Fabricated In/n-CdS/p-CdTe/Au+Au solar cell model

Sigma Aldrich CdS powder with 99.99% purity was used in the production of CdS films, and Sigma Aldrich CdTe powder with 99.99% purity was used in the production of CdTe films. Chempur brand 99.9% pure molybdenum was used as the ohmic contact for p-CdTe, and metallic indium was used as the ohmic contact for n-CdS. Figure 2 shows a schematic view of the cryogenic substrate impact method used in the study.

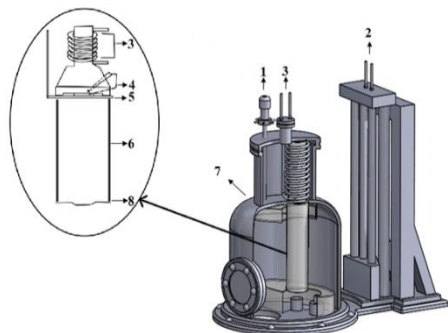


Figure 2. Schematic drawing of the vacuum chamber and evaporation apparatus (1. Window adjustment lever, 2. Vacuum chamber height adjustment lever, 3. Liquid nitrogen inlet, 4. Thermocouple, 5. Adjustable window, 6. Quartz reactor, 7. Vacuum chamber, 8. Evaporator source).

XRD analysis of CdS and CdTe films was carried out using a Rigaku brand SmartLab x-ray diffractometer. CuK α ($\lambda = 1.5408 \text{ \AA}$) was used as the X-ray source. Analysis was carried out at room temperature, in the range of $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ and in 0.02° steps. Electrical measurements of n-CdS/p-CdTe solar cells were carried out at room temperature (300 K) using an Ivium CompactStat.h10800 electrical measuring device. For photovoltaic measurements, a Sciencetech SF150C solar simulator with a power of 100 mW/cm^2 was used. A Zeiss Sigma 300 instrument was used for field emission scanning electron microscope (FESEM) analysis. A SpektraMax M5 UV-VIS spectrophotometer was used for optical measurements of the produced films.

Findings and Discussion

Figure 3 shows the XRD spectra of CdTe thin films produced at 300-100 K temperatures with 50 K intervals, measured in the range of $2\theta = 10-80^\circ$. When the XRD spectra of the CdTe films are examined, it is understood that the reflection peak occurring at $2\theta = 23.510$ is in the (111) plane of the cubic structure. Furthermore, the reflections occurring at $2\theta = 39.200$ and $2\theta = 46.180$ angles of the spectrum originated from the (220) and (311) planes, respectively, and this feature was determined to be the characteristic peaks of CdTe. It was observed that the CdTe films produced at all substrate temperatures had a cubic crystal structure.

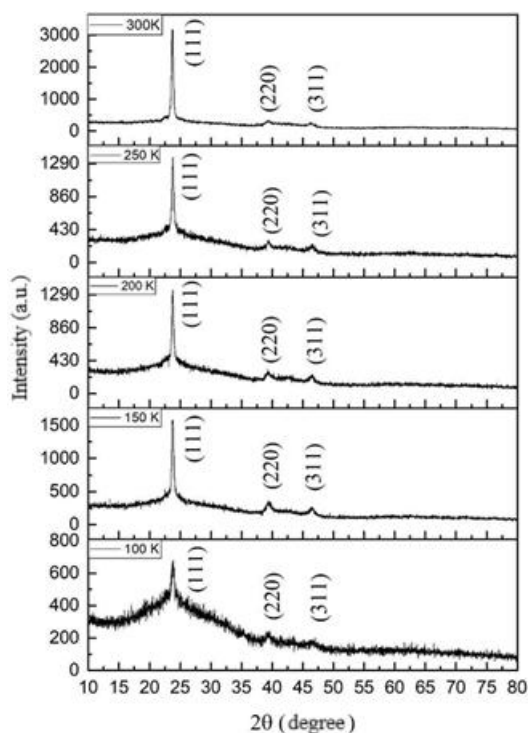


Figure 3. X-ray diffraction of CdTe thin films produced by the cold substrate method

Figure 4 shows the XRD pattern of a CdS film produced at a substrate temperature of 200°C. As can be seen from the figure, the film has a hexagonal structure and grew predominantly in the (002) plane. However, it was observed that the low intensity reflection peaks in the spectrum belong to the (101), (103) and (201) hexagonal structures.

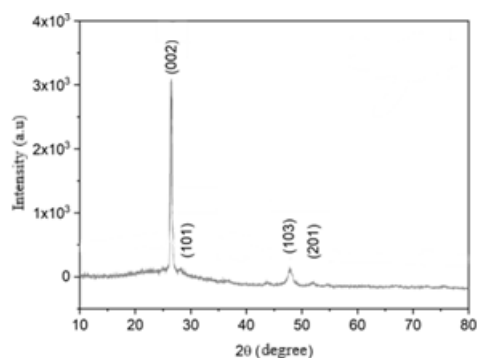


Figure 4. X-ray diffraction pattern of CdS film produced at 200 °C substrate temperature

Figure 5 shows the changes in thickness values for CdTe films produced at all substrate temperatures. As can be seen, the thickness values decrease with temperature. This is understood to be due to changes in grain size depending on the substrate temperature, as seen in the FESEM images.

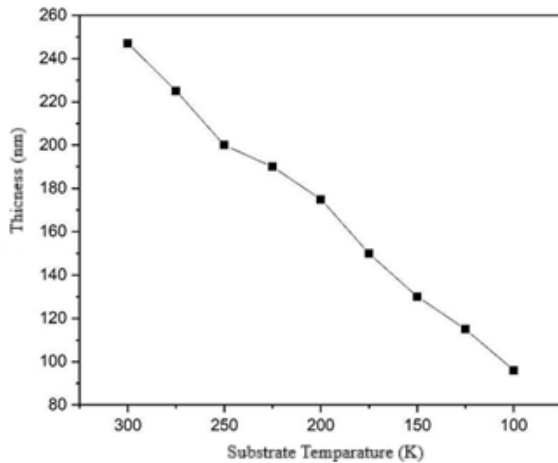
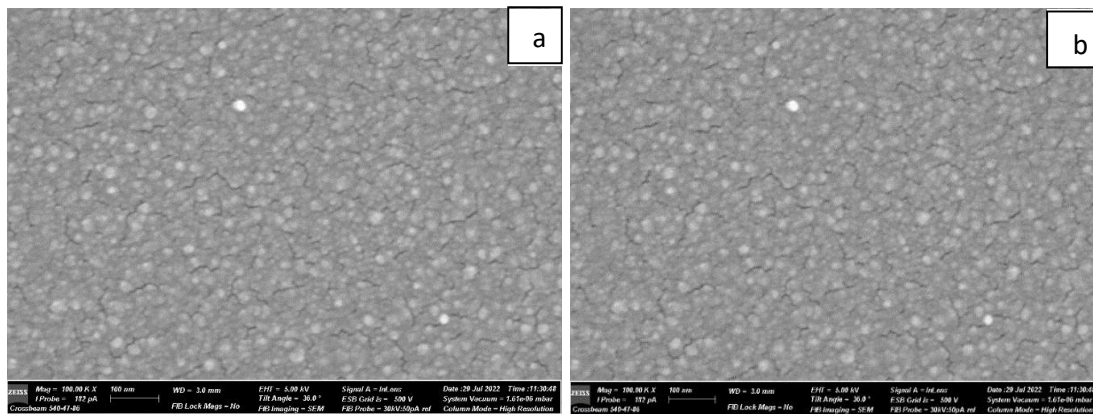


Figure 5. Thickness values of CdTe films produced at different substrate temperatures.

Figure 6 shows FESEM images of CdTe thin films grown at temperatures between 300 and 100 K. When the images are examined, structural changes in the surface appearance of the films are observed depending on the substrate temperature. As the substrate temperature increases from 300 K to 100 K, the grain sizes of the produced films decrease. This causes the films to grow in a tighter packing pattern and gradually decreases the intergrain spacing. In particular, when the FESEM images of the CdTe film grown at a substrate temperature of 200 K are examined, it is observed that the crystal structure consists of equally sized clusters. This indicates that CdTe films grown at a substrate temperature of 200 K are formed by a soliton growth mechanism (Tomakin et al., 2012).



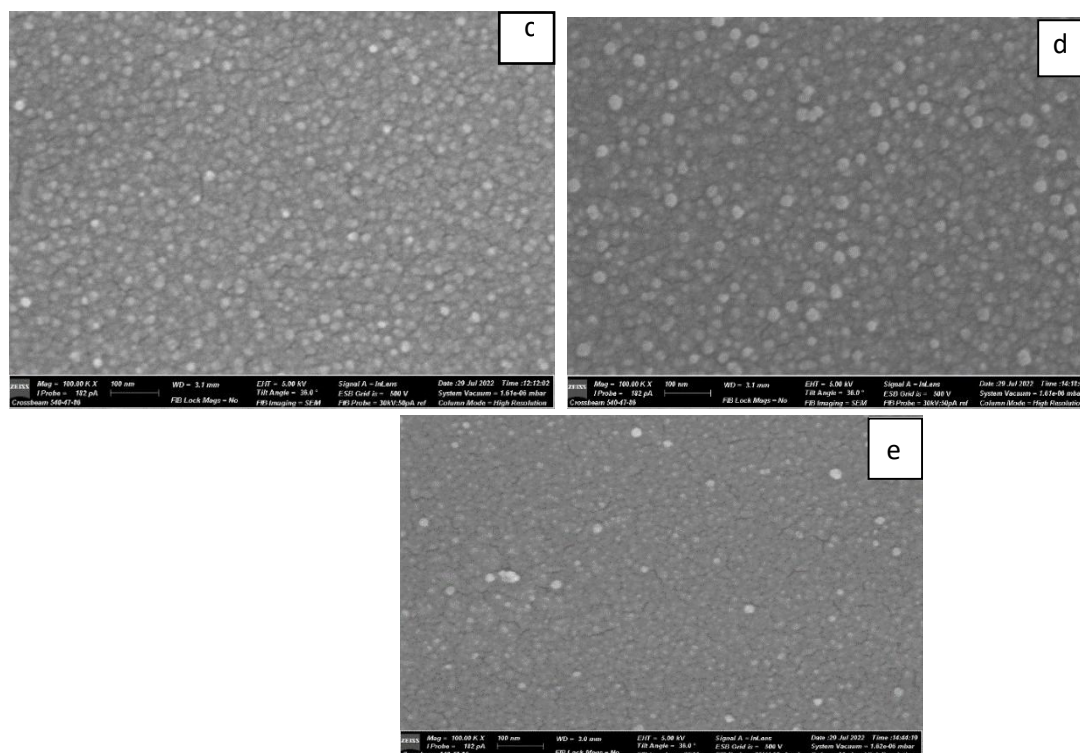


Figure 6. FESEM images of CdTe films produced at different substrate temperatures a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K and e) 100 K

Figure 7 shows that the CdS film produced at a substrate temperature of 200 °C exhibits an appearance similar to an amorphous structure.

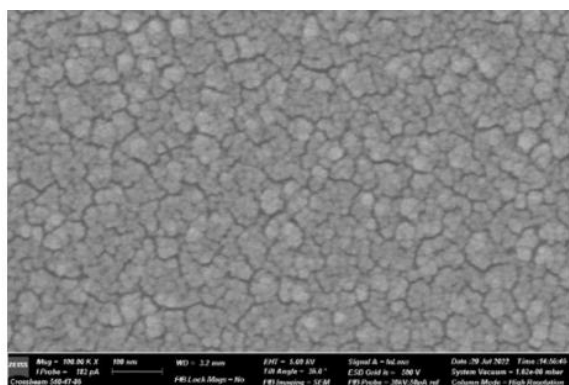


Figure 7. FESEM image of CdS thin film produced at 200 °C substrate temperature

The grain sizes of CdTe films produced at substrate temperatures of 300 K and 200 K were calculated using the ImageJ program. It was determined that the grain sizes at 300 K substrate temperature varied between 140 and 180 nm, while at 200 K substrate temperature, the grain sizes varied predominantly between 100 and 125 nm. The CdS film was determined to have a grain size of 32 nm.

Figure 8 shows the optical transmittance spectra of CdTe films produced at substrate temperatures of 300 K and 200 K, examined at visible wavelengths (350-750 nm). The optical transmittance spectra

show that the film produced at 300 K has an optical transparency of 40%, while the film produced at 200 K has an optical transparency of ~70%. The reason for this high transparency is the more homogeneous surface and uniformly sized clusters of the film produced at 200 K.

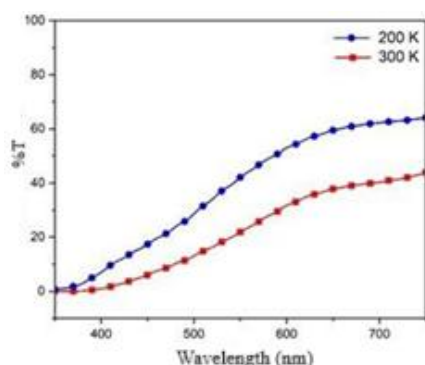


Figure 8. Optical transmittance graph of CdTe thin films

Figure 9 shows the absorption spectra of CdTe films produced at substrate temperatures of 300 K and 200 K. When the absorption spectra are examined, it is seen that the spectrum of the CdTe film produced at 300 K absorbs at wavelengths of approximately 855 nm and 910 nm. The absorption at 855 nm corresponds to the band gap value of the CdTe film (1.45 eV). However, it is understood that the absorption peak occurring at 910 nm originates from point defects. Studies have reported that this defect phase, in particular, originates from the formation of V_{Te} . When the absorption spectrum of the CdTe film produced at 200 K is examined, only an absorption peak occurring at a wavelength of 820 nm is observed. This absorption peak corresponds to the band gap value of CdTe (1.51 eV). When the obtained results are examined, it is seen that the CdTe film grown on the cooled substrate surface is significantly free of point defects.

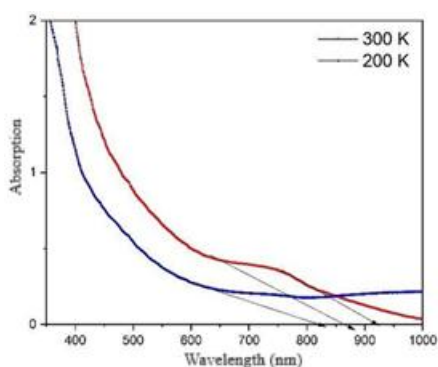


Figure 9. Optical absorption spectra of CdTe thin films produced at 300 K and 200 K substrate temperatures.

Table 1. Band gap values of CdTe films produced at different substrate temperatures.

Substrate Temperature (K)	300	250	200	150	100
E _g (eV)	1.43	1.48	1.53	1.55	1.45

The carrier charge densities of CdTe thin films produced at different substrate temperatures were determined by Hall measurement at a magnetic field value of 0.47 Tesla and the results are given in Table 2.

Table 2. Carrier charge density and resistivity values of CdTe thin films

Temperature (K)	Charge Density (cm^{-3})	Resistance ($\text{Ohm.cm } 10^3$)
300	$1,3 \times 10^{18}$	6,63
250	$6,71 \times 10^{16}$	6,85
200	$5,68 \times 10^{14}$	7,04
150	$1,51 \times 10^{15}$	7,07
100	$8,63 \times 10^{15}$	7,25

An examination of Table 2 reveals that the changes in carrier density values follow a Gaussian distribution, with the lowest carrier density occurring in the sample grown at soliton temperatures. This indicates that the crystal structure of the sample grown in the soliton regime is more stoichiometric. Indeed, these results are also confirmed by electrical measurements. The Van der Pauw method was used to determine the resistivity values of the samples. The results showed that the resistivity values varied with temperature, with the highest resistivity value occurring in the film grown at 100 K. This is due to the amorphous structure of the film grown at 100 K, as seen in the XRD spectrum.

Figure 10 shows the semi-logarithmic I-V plots obtained under the correct feeding regime for solar cells with a photoactive layer (CdTe) produced at substrate temperatures of 200 K and 300 K.

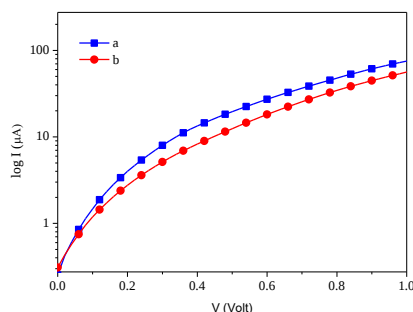


Figure 10. Semi-logarithmic I-V graph of solar cells a) 200 K and b) 300 K

Short circuit current (V_{oc}), fill factor (FF), maximum power (P_{max}), cell efficiency (η) and current density (I_{sc}) values were calculated from the I-V measurements of solar cells in a light environment (100 mWcm^{-2}).

Table 3 shows the numerical values of photovoltaic parameters obtained in a light environment at substrate temperatures of 200 K and 300 K. As can be seen from the table, the short-circuit current (I_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), fill factor (FF), and cell conversion efficiency are highest for solar cells with photoactive layers produced at a substrate temperature of 200 K. This suggests that the cryogenic method would be beneficial in producing photodevices with high vapor pressure.

Table 3. Photovoltaic values of solar cells produced at different substrate temperatures

Substrate Temperature	I _{SC} (mA)	V _{OC} (V)	FF	η (%)	N _d (cm ⁻³)	n	I ₀ (μA)
200 K	11.53	0.43	0.49	5,60	2.25x10 ¹²	3.13	0.33
300 K	5.41	0.35	0.40	1,73	1,12x10 ¹³	4.35	0.47

Conclusion and Recommendations

X-ray diffraction patterns (XRD) showed that CdTe films produced at all substrate temperatures grew in a cubic structure, while CdS films grew in a hexagonal crystal structure. FESEM images revealed that the soliton growth mechanism occurred at a substrate temperature of 200 K. Optical measurements determined that the CdTe film produced at 200 K had higher optical transparency. However, it was understood that the characteristic properties of CdTe films produced at all substrate temperatures varied depending on the substrate temperature. The characteristic properties of solar cells (In/n-CdS/p-CdTe/Au+Cu) based on CdTe optical absorption layers obtained via island (300 K) and soliton (200 K) growth mechanisms were investigated. The results showed that the photoactive CdTe layer-based solar cell obtained at 200 K substrate temperature exhibited higher photovoltaic parameters compared to the other solar cells.

Thanks and Information Note

This study was carried out within the scope of Recep Tayyip Erdogan University, Scientific Research Projects Unit Project No. FYL-2021-1250, Project ID: 1250 and “Production of CdTe Thin Films by Cold Substrate Method and Investigation of Their Characteristic Properties”.

References

- De Vos, A., Parrott, J., Baruch, P., Landsberg, P. 1994. “Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells”, Proceeding 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Amsterdam, 1315-1319.
- Nykyruy, L. I., Yavorskyi, R. S., Zapukhlyak, Z. R., Wisz, G., Potera, P. 2019. “Evaluation of CdS/CdTe thin film solar cells: SCAPS thickness simulation and analysis of optical properties”, Opt. Mater. (Amst), 92, 319-329.
- Nevruzoğlu, V., Altuntaş, D. B., Tomakin, M. 2020. “Cold substrate method to prepare plasmonic Ag nanoparticle: deposition, characterization, application in solar cell”, Applied Physics, 126:255.
- Chou, H. C., Rohatgi, A., Jokerst, N. M., Thomas, E. W., Kamra, S. 1996. “Copper migration in CdTe heterojunction solar cells”, J. Electr. Mater., 25 (7), 1093-1098.
- Manir, M., Nevruzoglu, V., Tomakin, M. 2021. “The investigation of stability of n-CdS/p-Cu₂S solar cells prepared by cold substrate method”, Semiconductor Science And Technology, 36 (3), 1-9.
- Bazner, D. L., Wendt, R., Romeo, A., Zogg, H., Tiwari, A. N. 2000. “A study of the back contacts on CdTe/CdS solar cells”, Thin Solid Films, 361, 463-467.
- Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksiz, E., Çelik, Ş. 2012. “Current transport mechanism in CdS thin films prepared by vacuum evaporation method at substrate temperatures below room temperature”, Thin Solid Films, 520, 2532-2536.
- Belyaev, A. P., Rubets, V. P. 2001. “Heteroepitaxy of II–VI compound semiconductors on cooled substrates”, Semiconductors, 35 (3), 294-297.

Bacaksiz, E., Altunbaş, M., Yılmaz, S., Tomakin, M., Parlak, M. 2007. “Effects of CdCl₂ treatment on properties of CdTe thin films grown by evaporation at low substrate temperatures”, Cryst. Res. Technol., 42 (9), 890-894

Polat, I., Yılmaz, S., Bacaksız, E., Altunbaş, M., Tomakin, M. 2011. “Effect of CdCl₂/annealing on the crystalline transformation of CdTe thin films grown by evaporation at a low substrate temperature”, Turk J Phys, 35, 197-202.

Das, N.K., Chakrabartty, J., Farhad, S.F.U., Sen Gupta, A.K., Ikball Ahamed, E.M.K., Rahman, K.S., Wafi, A., Alkahtani, A.A., Matin, M.A., Amin, N. “Effect of substrate temperature on the properties of RF sputtered CdS thin films for solar cell applications”, Res. Physics 17, 103132 (2020).

DETERMINING THE OPTIMAL POWER RATIO BETWEEN WIND ENERGY AND PEM ELECTROLYSIS SYSTEMS FOR ECONOMIC GREEN HYDROGEN PRODUCTION: A CASE STUDY FOR SAMSUN PROVINCE, TÜRKİYE

Alisan AYVAZ

Asst. Prof., Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, Amasya-Türkiye (Responsible Author), ORCID: 0000-0001-6449-6541

ABSTRACT

Hydrogen, which is widely used in key sectors such as heavy industry and transportation, should be produced from renewable energy sources in order to effectively address climate challenges. Among renewable sources, onshore wind energy has been identified in the literature as one of the most economical options for green hydrogen production. However, for a hydrogen production system that integrates a renewable energy source and an electrolyzer, it is essential to consider both technical and economic criteria in order to achieve a cost-effective investment. In this context, Samsun Province, with its high wind energy potential and its access to the Black Sea for water supply required in hydrogen production, stands out as a promising location for green hydrogen generation. Accordingly, this study aims to determine the optimal PEM electrolyzer power-to-wind power ratio that ensures the most economical long-term hydrogen production for this region, taking into account technical and economic considerations. Based on a 25-year investment plan, the results indicate that for a wind power capacity of 6 MW, the optimal PEM electrolyzer capacity is 2.3 MW, corresponding to a PEM electrolyzer-to-wind power ratio of approximately 38.3%. At this ratio, the cost of green hydrogen is calculated as 8.19 USD per kilogram. The cost obtained for Samsun province remains higher compared to hydrogen production costs calculated for different regions in the literature. In this context, although the current technical and economic criteria indicate that the green hydrogen cost is relatively high for Samsun, more comprehensive analyses will be required in the future, considering the decreasing investment costs and increasing electrolyzer efficiencies brought about by technological advancements.

Keywords: pem electrolyzer, wind energy, green hydrogen production, Samsun, Türkiye

EKONOMİK YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN RÜZGÂR ENERJİSİ VE PEM ELEKTROLİZÖR SİSTEMLERİ ARASINDAKİ OPTİMUM GÜÇ ORANININ BELİRLENMESİ: SAMSUN İLİ ÖRNEĞİ

ÖZET

Ağır sanayi ve ulaşım gibi kritik sektörlerde kullanılan hidrojenin, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi iklim sorunlarıyla mücadele açısından son derece kritiktir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında özellikle karasal rüzgâr enerjisi, literatürdeki çalışmalarda yeşil hidrojen üretimi için en ekonomik kaynak olarak öne çıkmaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynağı ve elektrolizör içeren bir hidrojen üretim sisteminin teknik ve mali kriterler dikkate alınarak tasarlanması ve kurulması, ekonomik bir yatırım için gereklidir. Bu kapsamda, yüksek rüzgâr enerjisi potansiyelinin varlığı ve hidrojen üretimi için gerekli suya Karadeniz kıyısı sayesinde erişim kolaylığı, Samsun ilini potansiyel bir yeşil hidrojen üretim merkezi haline getirmektedir. Bu çalışmada da söz konusu bölge için uzun vadede en ekonomik hidrojen üretimini sağlayacak optimum PEM elektrolizör gücü/rüzgâr

enerjisi gücü oranının, teknik ve mali kriterler göz önünde bulundurularak belirlenmesi amaçlanmıştır. Yirmi beş yıllık yatırım planı kapsamında elde edilen sonuçlara göre, 6 MW'lık bir rüzgâr enerjisi işletme gücü için PEM elektrolizör gücü optimum olarak 2.3 MW bulunmuş; bu da yaklaşık %38,3'lük bir PEM elektrolizör gücü/rüzgâr enerjisi gücü oranına karşılık gelmektedir. Bu oran için kilogram başına yeşil hidrojen maliyeti 8.19 ABD doları olarak hesaplanmıştır. Samsun ili özelinde elde edilen bu maliyet, literatürde farklı bölgeler için hesaplanan hidrojen maliyetlerine kıyasla yüksek kalmaktadır. Bu kapsamda, Samsun ili için her ne kadar günümüz teknik ve ekonomik kriterleri ile yeşil hidrojen maliyeti yüksek bulunsada da gelecek yıllarda teknolojik gelişmelerin getirdiği düşen yatırım maliyetleri ve yükselen elektrolizör verimleri ile bu bölge için daha kapsamlı analizlere ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: PEM elektrolizörü, rüzgâr enerjisi, yeşil hidrojen üretimi, Samsun, Türkiye

GİRİŞ

Dünya genelinde fosil kaynaklardan yenilenebilir enerjiye geçiş adımları ile enerji kaynaklarının kullanımında önemli değişimler meydana gelmekte ve bu değişim gün geçtikçe hızlanmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları günümüz dünyası için bu değişimin öncülüğünü yapmaktadırlar. Ülkemiz de bu enerji kaynaklarından faydalanma noktasında önemli bir potansiyeli barındırmaktadır. Bu bağlamda dünyadan ve ülkemizden araştırmacılar farklı branşlar ve çalışma alanları altında ülkemizdeki bu potansiyele yönelik çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar [1]. Bu çalışma alanlarından biri de yeşil hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kaynağı-elektrolizör sisteminin tasarlanması ve analiz edilmesine yönelik araştırmalardır [2]. Nitekim, fosil-bazlı enerji kaynaklarından yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişe benzer şekilde gri hidrojen üretiminden yeşil hidrojen üretimine geçiş de temiz bir çevre için önem arz etmektedir.

Günümüz teknik ve ekonomik şartları altında şu an için yeşil hidrojen üretim maliyeti gri hidrojen üretim maliyetine kıyasla henüz tam anlamıyla istenen ekonomik değerlere ulaşmış değildir. Bunda, yenilenebilir enerji santrali ve elektrolizör kurulum maliyetlerinin yüksekliği, elektrolizör veriminin düşüklüğü ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken güç çıkışı kaynaklı elektrolizör ömrünün kısalması gibi çeşitli etkenler rol oynamaktadır. Bu noktada, yenilenebilir enerji kaynakları yüksek potansiyelli bölgelerin seçimi, uygun elektrolizör tipinin seçimi, uygun yenilenebilir enerji kaynağı ve elektrolizör işletme güçlerinin seçimi gibi faktörler ekonomik bir yeşil hidrojen üretimi için son derece önemlidir [3].

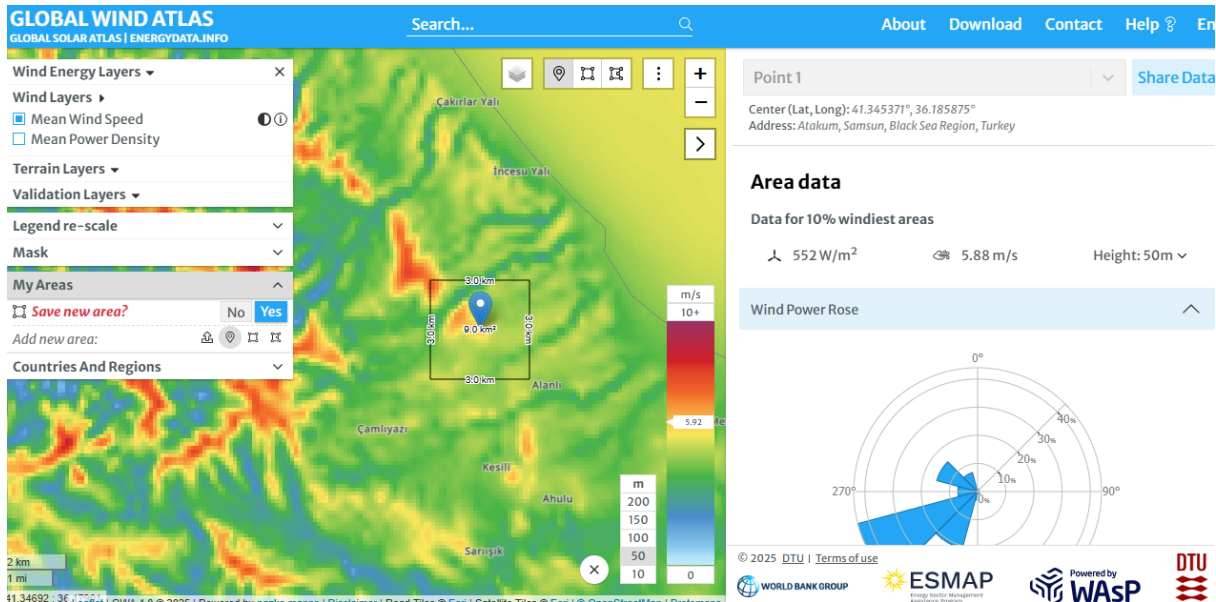
Bu çalışmada, ülkemiz yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip bölgelerinden biri olan Samsun ili, rüzgâr enerjisinden yeşil hidrojen üretiminin sağlanmasında rüzgâr enerji santrali-elektrolizör sisteminin kurulumu için seçilen bölge olmuştur [4]. Yüksek rüzgâr enerjisi potansiyelinin yanında Samsun'un Karadeniz'e olan kıyısı dolayısıyla hidrojen üretiminde kullanılan suyun sağlanması noktasında da seçilen bu bölge oldukça elverişlidir. Bu şekilde tatlı su yerine deniz suyu kullanımı ile su tasarrufu açısından da olabilecek olumsuz etkilerin de önüne geçilmektedir. Diğer yandan, bu çalışmada, yüksek akım yoğunluğu, düşük çalışma sıcaklığı ve hızlı başlama gibi avantajları dolayısıyla proton değişim membranlı (proton exchange membrane, PEM) elektrolizörünün seçimi uygun bulunmuştur [5]. Özellikle PEM elektrolizörün hızlı başlama özelliği, bu elektrolizörü yenilenebilir enerji kaynaklarının güç çıkışı dalgalanmaları açısından bu kaynaklar ile birlikte kullanımı noktasında uygun kılmaktadır. PEM elektrolizörü ile deniz suyundan hidrojen eldesinde bazı literatür çalışmalarında deniz suyu direkt olarak elektrolizöre verilmektedir [6]. Fakat bu durum elektrolizör ömrünü oldukça kısaltmaktadır. Bu çalışmada, uzun vadeli bir plan dikkate alındığı için ters osmoz biriminin de sisteme dahil edilmesi uygun görülmüştür. Bunun yanında üretilen hidrojenin günlük olarak depolandığı ve ertesi gün için tekrardan dolum yapılacak şekilde hidrojen tankının

tamamen boş olduğu varsayılmıştır. Bu kapsamda, PEM elektrolizörü ve rüzgâr enerji santrali için işletme güçleri oranının en ekonomik değeri bulunmaya çalışılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Yeşil Hidrojen Üretimi İçin Uygun Rüzgâr Enerjisi Potansiyelli Bölgenin Belirlenmesi

Samsun ilinde yeşil hidrojen üretimi için kurulacak olan rüzgâr enerji santrali için uygun bölgenin seçimi iki kriter doğrultusunda verilmiştir. Bunlar; yüksek rüzgâr enerjisi potansiyelinin olması, ormanlık alan olmaması ve denize yakınlık olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda seçilen bölge ve bu bölge için rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü yoğunluğu Şekil 1’de görülmektedir. Global Wind Atlas sitesinden elde edilen görselde 50 m yükseklikte seçilen bölgenin %10’luk en potansiyelli kısmında rüzgâr hızı ortalamasının 5.88 m/s ve rüzgâr gücü yoğunluğunun 552 W/m² olduğu, rüzgâr yönünün ise güney batı yönünde hemen hemen tek tarafta yoğunlaştığı görülmektedir [7].



Şekil 1. Seçilen bölge için rüzgâr potansiyeli görseli ve bilgileri

Diğer yandan Google Maps aracılığı ile elde edilen görsel üzerinde rüzgâr enerji santrali ve PEM elektrolizörü için kurulum bölgeleri ve bu bölgeler arası uzaklık Şekil 2’de görülmektedir. İki bölge arası uzaklığın 5 km olduğu görülmektedir. Bu noktada rüzgâr enerjisinin PEM elektrolizörüne ulaştırılması için bu iki mesafe arasına iletim hattının çekilmesi de yatırım modeli kapsamında dikkate alınmıştır.

Rüzgâr Türbini Özellikleri

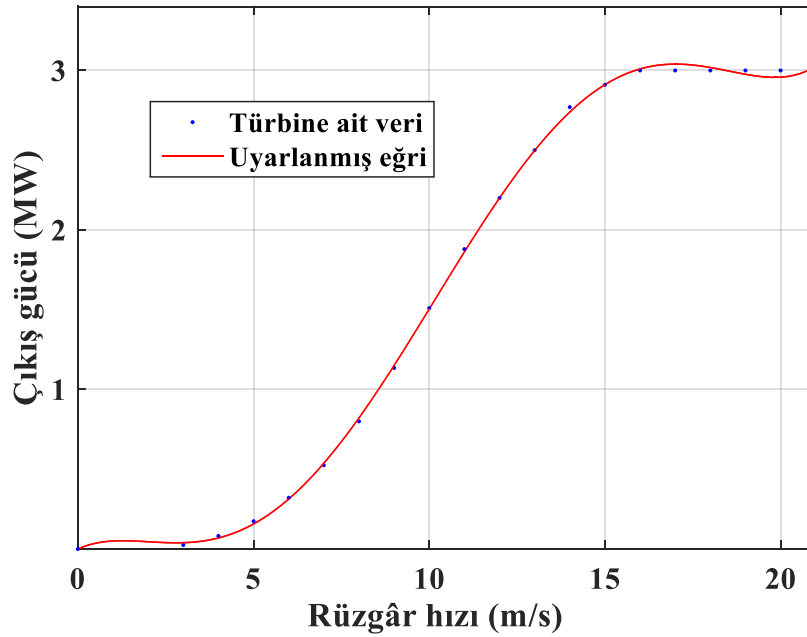
Rüzgâr enerji santrali için seçilen bölgeye ait güç yoğunluğu verisi ile uyumlu olarak 2 adet Enercon firmasının E-82 E4 model 3 MW işletme gücündeki rüzgâr türbini kullanılmıştır. Rüzgâr türbinine ait bilgiler Tablo 1’de verilmiştir [8].

Tablo 1. Rüzgâr türbini bilgileri [8]

Üretici	Model	Nominal güç	Başlangıç rüzgâr hızı	Nominal rüzgâr hızı	Kesilme rüzgâr hızı	Güç yoğunluğu
Enercon	E-82 E4	3 MW	2.5 m/s	16 m/s	34 m/s	568.1 W/m ²

**Şekil 2.** Rüzgâr enerji santrali ve PEM elektrolizörü kurulum bölgeleri

Türbine ait güç-rüzgâr hızı verisi ve bu veri doğrultusunda MATLAB kullanılarak elde edilen uyarlanmış eğri Şekil 3'te görülmektedir. Bu çalışmada, bu eğri ile bölge için elde edilen rüzgâr hızı verisi kullanılarak rüzgâr enerji santrali çıkış gücü hesaplanmıştır.

**Şekil 3.** Türbin güç-rüzgâr hızı verisi ve uyarlanmış eğrisi

Uyarlanmış eğriye ait fonksiyon ise Eşitlik (1)'deki gibi elde edilmiştir.

$$P_{RES} = 0.01657v^5 - 0.8477v^4 + 13.56v^3 - 62.38v^2 + 99.84v - 0.224 \quad (1)$$

burada P_{RES} ve v sırasıyla rüzgâr türbini çıkış gücünü ve rüzgâr hızını ifade etmektedir.

Optimum Güç Oranı Hesabı

Güç oranına göre yapılacak olan yatırımın maliyeti ve üretilecek olan hidrojenin miktarı değişmektedir. Bu doğrultuda en uygun fiyatlı şekilde en fazla hidrojenin üretimi en doğru seçim olacaktır. Bu kapsamda ekonomik bir hidrojen üretimi için en uygun olan rüzgâr enerji santrali gücü-elektrolizör gücü oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen yatırım planlaması kapsamında hidrojen maliyeti aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilmektedir:

$$C_{H_2} = \frac{\left[CAPEX_{RES} \times P_{RES}^K + CAPEX_{PE} \times P_{PE}^K + CAPEX_{H_2T} \times m_{g,H_2}^{maks} + CAPEX_{IH} \times d \right] + CAPEX_{TOB} + OPEX_{RES} \times P_{RES}^K \times N_l + OPEX_{PE} \times P_{PE}^K \times N_l}{N_l \times \sum_{2024} m_{H_2}} \quad (2)$$

burada $CAPEX_{RES}$, $CAPEX_{PE}$, $CAPEX_{H_2T}$, $CAPEX_{IH}$ ve $CAPEX_{TOB}$ sırasıyla rüzgâr enerji santrali, PEM elektrolizörü, hidrojen tankı, iletim hattı kurulumu ve ters osmoz birimi için gerekli sermaye harcamasını ifade etmektedir. $OPEX_{RES}$ ve $OPEX_{PE}$ ise sırasıyla rüzgâr enerji santrali ve PEM elektrolizörü için yıllık bakım işletim maliyetini ifade etmektedir. P_{RES}^K ve P_{PE}^K sırasıyla rüzgâr enerji santrali ve PEM elektrolizörü işletme güçlerini, m_{g,H_2}^{maks} günlük bazda elde edilebilen maksimum hidrojen miktarını, d rüzgâr enerji santrali ile PEM elektrolizörü kurulum bölgeleri arasındaki mesafeyi, N_l yatırım için öngörülen proje ömrünü ve m_{H_2} ise üretilen hidrojen miktarını göstermektedir.

Bu çalışmada, seçilen bölge için 2024 yılı rüzgâr hızı verisinin kullanılarak yıllık hidrojen eldesi değerinin bulunması ve bunun proje ömrü boyunca yıllık sabit kaldığı varsayılmıştır. Hidrojen eldesinin hesaplanması ise aşağıdaki eşitlik ile yapılmaktadır [9]:

$$m_{H_2} = \frac{\eta_{PE} \times E_{RES}}{HHV_{H_2}} \quad (3)$$

burada HHV_{H_2} hidrojenin üst ısı değeri ifade etmektedir ve değeri 39.4 kWh/kg'dır. η_{PE} ise elektrolizör verimini ifade etmekte ve bu çalışmada aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi dikkate alınmıştır [3]:

$$\eta_{PE} = \begin{cases} 5e-5 \times O^5 - 6.1e-3 \times O^4 + 0.237 \times O^3 - 4.201 \times O^2 + 36.675 \times O - 62.87, & O \leq \%15 \\ -0.149 \times O + 74.977, & O > \%15 \end{cases} \quad (4)$$

burada O elektrolizör giriş gücünün elektrolizör işletme gücüne oranıdır. Eşitlik (4) kullanılarak PEM elektrolizörü verim eğrisi Şekil 4'teki gibi çizdirilebilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere PEM elektrolizörü en yüksek verimi %20 civarı işletme gücünde vermektedir.

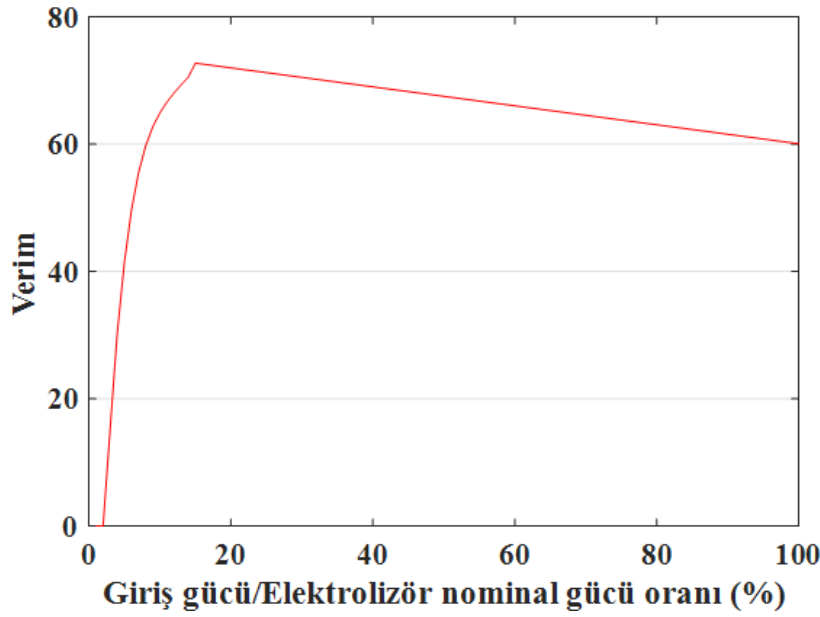
Bu eşitlikler doğrultusunda 6 MW bir rüzgâr enerjisi santrali için en uygun PEM elektrolizörü gücünü Eşitlik (2)'deki C_{H_2} 'nin minimum değeri vermiş olacaktır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

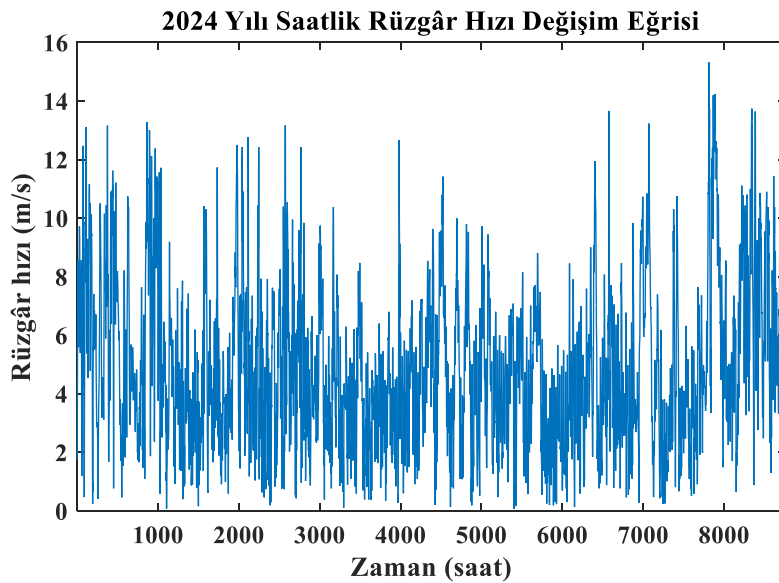
Rüzgâr Hızı ve Maliyet Verileri

Bu çalışmada, seçilen bölge için NASA POWER'ın Data Access Viewer platformu üzerinden 2024 yılına ait rüzgâr hızı verisi 50 m yükseklik için saatlik bazda alınmıştır [10]. Şekil 5'te bu veriye bağlı rüzgâr hızı değişimi saatlik bazda görülmektedir. Bu veri doğrultusunda saatlik rüzgâr hızı bilgisi kullanılarak Eşitlik (1) ile saatlik üretilen rüzgâr enerjisi değerleri de bulunmaktadır.

Diğer yandan önerilen yatırım modeli için literatürdeki çalışmalardan edinilen maliyet bilgileri Tablo 2'de verilmiştir. Burada farklı çalışmalarda değişebilen maliyet bilgileri için bu çalışmada bu değerlerin ortalaması alınarak önerilen yatırım modeli için kullanılmıştır.



Şekil 4. PEM elektrolizörü verim eğrisi



Şekil 5. Seçilen bölge için 2024 yılı rüzgâr hızı değişim grafiği

Optimum Güç Oranının Bulunması

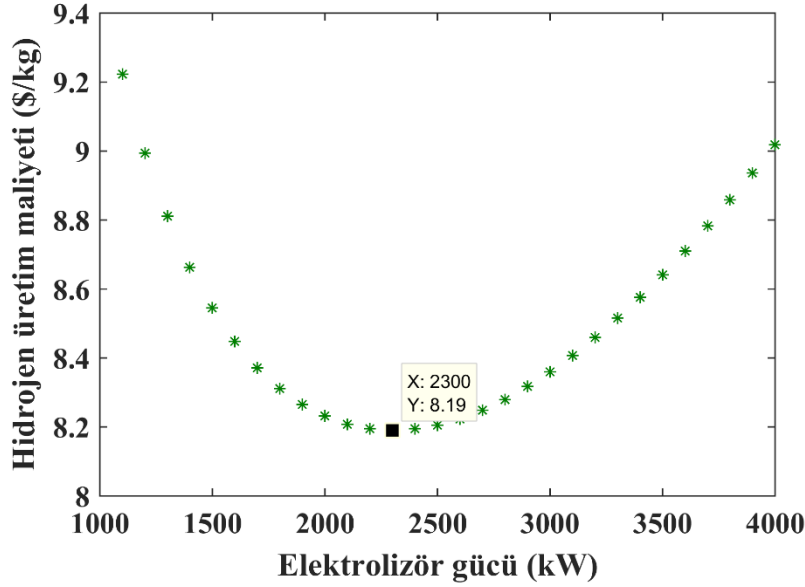
Optimum güç oranı, Eşitlik (2) ile verilen hidrojen maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ile bulunmaktadır. Bu fonksiyon üzerinden PEM elektrolizörünün işletme gücünün değişimi ile elektrolizör kurulum maliyeti ve buna bağlı elektrolizör işletme maliyeti de değişecektir. Diğer yandan günlük olarak üretilen hidrojen miktarı değişeceği için hidrojen tankı maliyeti de değişecektir. Yine benzer şekilde payda kısmındaki üretilen toplam hidrojen miktarı da değişecektir. Bu noktada değişen bu koşullar altında ekonomik bir yatırım için hidrojen üretim maliyetinin en düşük olduğu elektrolizör gücünün bulunması bir gerekliliktir. Bu çalışmada, PEM elektrolizörü işletme gücü değeri 1 MW değerinden başlatılmak üzere 100 kW'lık artışlarla 4 MW değerine kadar analiz edilmiştir. Bu kapsamda değişen PEM elektrolizörü işletme gücüne karşılık kg başına elde edilen hidrojen maliyeti eğrisi Şekil 6'daki gibidir.

Tablo 2. Yeşil hidrojen sistemi maliyet parametreleri ve değerleri

Komponent	Parametre	Maliyet	Ortalama Maliyet
Rüzgâr Enerji Santrali	CAPEX _{RES}	1208 €/kW [11] ve 1300 US\$/kW [9]	1374 US\$/kW
	OPEX _{RES}	16 US\$/kW [9] ve 16.7 US\$/kW [12]	16.4 US\$/kW-yıl
PEM Elektrolizörü	CAPEX _{PE}	1000 €/kW [11] ve 1280 US\$/kW [9]	1240 US\$/kW
	OPEX _{PE}	Yıllık olarak CAPEX’in %4’ü [11] ve %3.1’i [9]	Yıllık olarak CAPEX’in %3.6’sı
Hidrojen Tankı	CAPEX _{H2T}	210 US\$/kg [9] ve 355 AUD/kg [13]	222 US\$/kg
Ters Osmoz Birimi	CAPEX _{TOB}	271.200 US\$ [14]	
İletim Hattı	CAPEX _{İH}	5118 US\$/km [15]	
Proje Ömrü	25 yıl		

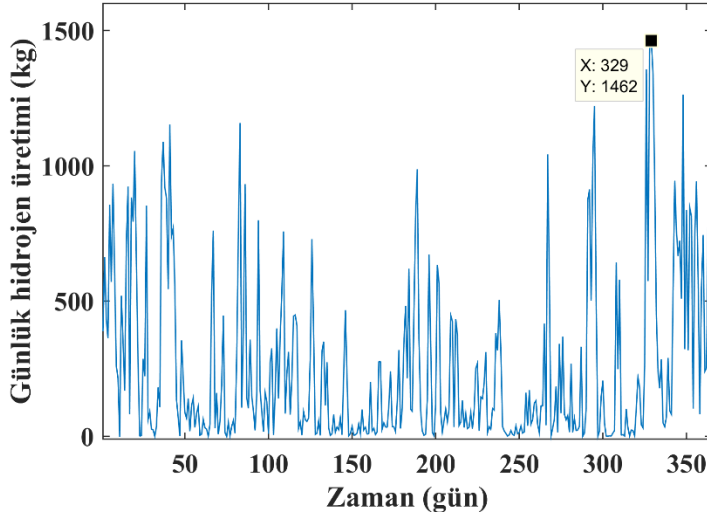
*€/US\$ ve US\$/AUD kur dönüşümü sırasıyla 1.2 ve 1.5 alınmıştır.

Şekil 6 incelendiğinde PEM elektrolizörü gücünün 2 MW ile 2.5 MW arasında ekonomik değer ürettiği, en ekonomik durumun ise 2.3 MW değerinde elde edildiği görülmektedir. Bu güç değeri, rüzgâr enerji santrali güç değerinin (6 MW) yaklaşık %38.3'ne karşılık gelmektedir. Bu oran için elde edilen hidrojen maliyetinin ise 8.19 US\$/kg olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Elektrolizör gücüne karşılık hidrojen maliyeti değişim eğrisi

Şekil 7’de ise PEM elektrolizörü gücünün 2.3 MW olması durumunda günlük olarak elde edilen hidrojen üretimi miktarları değişimi görülmektedir. En yüksek hidrojen miktarı 329. günde 1462 kg olarak elde edilmiştir. Bu değer Eşitlik (2)’de hidrojen tankı kurulum maliyetini direkt olarak belirlemektedir.



Şekil 7. PEM elektrolizörü gücünün 2.3 MW olduğu durumda günlük elde edilen hidrojen miktarı değişimi

Diğer yandan bu çalışmada elde edilen maliyet ile literatürdeki diğer çalışmalarda rüzgâr enerjisi ile yeşil hidrojen üretim maliyeti değerleri Tablo 3’te görülmektedir. Farklı lokasyonlar için elde edilen minimum maliyet değerlerinin bu çalışmada Samsun ili için elde edilen değere kıyasla düşük kaldığı görülmektedir. Kanada için yapılan çalışmada elde edilen maliyetin bu çalışmada Samsun için elde edilene yakın olduğu fakat özellikle Almanya için elde edilen gibi diğer maliyetlere kıyasla Samsun özelinde yapılacak bir yatırım oldukça yüksek maliyetli kalmaktadır.

Tablo 3. Yeşil hidrojen sistemi maliyet parametreleri ve değerleri

Lokasyon	Hidrojen maliyeti (US\$/kg)	Referans
Heide, Almanya	3.06*	[3]
Chuja Adası, Güney Kore	5.7-14.8* (Ort. 10.3)	[16]
Alberta, Kanada	7.55-10.15 (Ort. 8.85)	[17]
Samsun, Türkiye	8.19	Sunulan Çalışma

*€/US\$ kur dönüşümü 1.2 alınmıştır.

Bu sonucun yanında literatür çalışmaları üzerinden daha adil bir karşılaştırma için daha kapsamlı analizlere ve değerlendirmelere ihtiyacın olduğu da vurgulamak gerekmektedir. Örneğin, değişken yatırım maliyetleri ve değişken elektrolizör verimi değerleri, maliyet hesaplamalarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun yanında rüzgâr enerjisi ve elektrolizör kurulumunda yüksek kapasitelere çıktıkça maliyette de ciddi düşüşler olmaktadır [11]. Bunun yanında gelişen teknoloji ile birlikte yatırım maliyetleri düşerken elektrolizör verimi de gittikçe artmaktadır. Bu gibi etkenler altında Samsun ili için daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Samsun ili özelinde yapılacak bir rüzgâr enerjisi bazlı yeşil hidrojen üretim sistemi için en ekonomik hidrojen maliyetini veren rüzgâr enerji santrali gücü-elektrolizör gücü oranının belirlenmesine ve bu kapsamda Samsun ili için yeşil hidrojen üretim maliyetinin hesaplanmasına yönelik tekno-ekonomik bir analiz sunulmaktadır. Çalışmada, rüzgâr enerji santrali, PEM elektrolizörü ve hidrojen tankından oluşan bir sistem için maliyet hesabı yapılmaktadır. Elde edilen sonuçlar Samsun ili özelinde 6 MW'lık bir rüzgâr enerji santrali için 2.3 MW'lık PEM elektrolizör kapasitesinin kurulumu durumunda en ekonomik yeşil hidrojen üretimi 8.19 US\$/kg olarak bulunmaktadır. Bu sonuç, literatür çalışmalarında farklı lokasyonlar için elde edilen hidrojen maliyetlerine kıyasla yüksek kalsa da Samsun ili özelinde daha kapsamlı analizlere ihtiyaç olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Nikolakakis, T., Broekman, E. B., Chattopadhyay, D. M., & Merino, A. M. (2023). Analysis of long-term variable renewable energy heavy capacity plans including electric vehicle and hydrogen scenarios: Methodology and illustrative case study for Turkey. *IEEE Access*, 11, 27189-27216.
- [2] Karayel, G. K., Javani, N., & Dincer, I. (2023). Green hydrogen production potential in Turkey with wind power. *International Journal of Green Energy*, 20(2), 129-138.
- [3] Hofrichter, A., Rank, D., Heberl, M., & Sterner, M. (2023). Determination of the optimal power ratio between electrolysis and renewable energy to investigate the effects on the hydrogen production costs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(5), 1651-1663.
- [4] Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Haritası. <https://www.enerjiatlasi.com/ruzgar-enerjisi-haritasi/turkiye>
- [5] Ayvaz, A. (2025). An enhanced sparrow search algorithm for model order reduction of proton exchange membrane fuel cell system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 47(10), 2024-2038.
- [6] Drespe, S., Dionigi, F., Klingenhof, M., & Strasser, P. (2019). Direct electrolytic splitting of seawater: opportunities and challenges. *ACS Energy Letters*, 4(4), 933-942.

- [7] Technical University of Denmark (DTU). “Global wind atlas 3.0.”. <https://globalwindatlas.info/>
- [8] Enercon E-82 E4 turbine model. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/833-enercon-e-82-e4-3.000>
- [9] Akyuz, E., & Tezer, T. (2025). Techno-economic feasibility and regression analysis of green hydrogen production from solar and wind energy in Türkiye. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [10] NASA POWER Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [11] Fabianek, P., & Madlener, R. (2024). Techno-economic analysis and optimal sizing of hybrid PV-wind systems for hydrogen production by PEM electrolysis in California and Northern Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 1157-1172.
- [12] Astriani, Y., Tushar, W., & Nadarajah, M. (2024). Optimal planning of renewable energy park for green hydrogen production using detailed cost and efficiency curves of PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 79, 1331-1346.
- [13] Rezaei, M., Akimov, A., & Gray, E. M. (2024). Techno-economics of renewable hydrogen export: a case study for Australia-Japan. *Applied Energy*, 374, 124015.
- [14] Qingdao Changxin Yongda Trading. <https://rowaterplant.en.made-in-china.com/product/pOwaycUVAMRY/China-15m3-Hr-Seawater-Reverse-Osmosis-Desalination-Purifier-Treatment-Equipment.html>.
- [15] Guides for electric cooperative development and rural electrification. <https://www.nrecainternational.coop/wp-content/uploads/2016/11/Module7DistributionLineDesignandCostEstimationforRuralElectrificationProjects.pdf>.
- [16] Park, J., Kang, S., Kim, S., Kim, H., Kim, S. K., & Lee, J. H. (2024). Optimizing green hydrogen systems: Balancing economic viability and reliability in the face of supply-demand volatility. *Applied Energy*, 368, 123492.
- [17] Olateju, B., & Kumar, A. (2011). Hydrogen production from wind energy in Western Canada for upgrading bitumen from oil sands. *Energy*, 36(11), 6326-6339.

ANALYSIS OF THE INCREASE OF ELECTRICITY EFFICIENCY IN PUBLIC SECTOR IN THE MUNICIPALITY OF FERIZAJ, CASE STUDY – FERIZAJ

Dinore HASANI

Ing., University of Applied Sciences in Ferizaj, Faculty of Engineering and Informatics, Department of
Industrial Engineering with Informatics, Ferizaj-Kosovo

Gjelosh VATAJ

Asst. Prof., University of Applied Sciences in Ferizaj, Faculty of Engineering and Informatics, Department
of Industrial Engineering with Informatics, Ferizaj-Kosovo (Responsible Author) ORCID ID:
<https://orcid.org/0009-0008-2685-1352>

Labinot TOPILLA

Asst. Prof., University of Applied Sciences in Ferizaj, Faculty of Engineering and Informatics, Department
of Industrial Engineering with Informatics, Ferizaj-Kosovo ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2760-0834>

ABSTRACT

The purpose of this thesis at the master's level is to describe the energy sector, taking into account all the resources that exist in our country, starting from fossil fuels to renewable sources. As the main factor of a country's economic development, electricity production is the main factor. In Kosovo, the supply of electricity is very problematic and is based mainly on the energy produced by the Kosovo A and Kosovo B Power Plants, which use lignite as a raw material for over 95%. This form of electricity production is almost the only option for ensuring a stable, safe, quality and uninterrupted supply of electricity for our country, as a key condition for the development of the state of Kosovo. Globally, Kosovo does not fare much worse than the countries of the region in terms of annual balance. But Kosovo's problem is covering the peak, especially in the winter season, and meeting the needs and demands for additional capacity for regulation in the electricity system.

Keywords: Efficient energy source, efficient lighting, energy intensity, efficient equipment, public sector.

Introduction

The paper is focused on the field of saving electricity. This paper as a study issue that uses it in various socio-economic activities and for technological development. In view of the gradual increase in demand for electricity and the future possibility of not serving all sectors of consumption, its optimization is necessary.

It is not enough just to manage the implementation of electricity services to be successful, but this issue requires more detailed analysis and research, in which the application of strategies based on the pillars of energy efficiency and environmental education in order to minimize electricity costs in public buildings, which were selected for this master's topic due to the fact that the managers of these buildings show a lack of action to apply this strategy.

Concern about the correct consumption of electricity since the costs are related to the public treasury and are not always perceived by the people as resources that come from the taxes paid by citizens. Among the public buildings that consume the most electricity, the most important in the municipality of Ferizaj are those in the education sector.

Therefore, energy efficiency is necessary, which plays an important role in all sectors of the lives of citizens in our country, and with this undoubtedly also for the municipality of Ferizaj. Energy is one of the largest operating costs for the municipality of Ferizaj. The municipality of Ferizaj uses electricity for daily needs.

1.1 Research purpose (research questions)

The purpose of this study is to investigate the level of efficiency of electricity use in the Municipality of Ferizaj, taking into account the advantages and disadvantages, as well as the level of awareness of the work of efficiency of electricity use.

The research will be oriented towards identifying and analyzing the problems that people most often face in the use of electricity in the Municipality of Ferizaj in the public sector, through the following research questions:

1. How do you evaluate the infrastructure in your facility?
2. How satisfied are you with heating during the winter season?
3. What do you use for heating?
4. Is the electric lighting sufficient?
5. In what condition are the windows and doors in your facility?
6. How much do you think the poor insulation of the facility affects heating?
7. How much investment has there been in the last 5 years in your facility for insulation of walls, windows, doors, central heating and electric lighting?
8. How often do you submit requests and complaints about the conditions of the facility to the responsible officials?
9. Have you ever been forced to interrupt classes due to poor conditions for normal work in your facility?
10. Apart from atmospheric conditions, how much damage is caused by students, what are the measures you take to prevent these damages?

Research methodology

The methodology used was based on environmental education of the research participants, along with the replacement of lamps with LED (Light Emitting Diode) systems in strategic locations in the building, building insulation, replacement of windows with higher efficiency and monitoring of the results. The actions to be carried out include the replacement of inefficient lamps and educational lectures offered to students of different age groups in two or three school tours in partnership with school employees and teachers in the selected municipality on energy efficiency and strategies for reducing electricity consumption. The project directly mobilizes around 200 people belonging to the target audience and indirectly 300 students who would be part of the teaching unit. Therefore, the results relate to the possibility of investing in energy efficiency projects for public buildings, subsidizing actions in the design, renovation and maintenance of public buildings.

The data collected from the questionnaires will be processed using the Microsoft Office program and through the Microsoft Excel program, analysis and presentation of the findings will be carried out by presenting the results in the form of tables and graphs.

In this research on the MASTER topic, the tool that I have used is the questionnaire which contains research questions and hypotheses raised in the research.

We have built and formulated the questionnaire form in a form that contains several questions about the sources of electricity used in the schools of Ferizaj and the role that the source of electricity has. The questions are of the closed type scaled with nominal values, but there are also open-ended questions.

2.1 Objective of the work

This work aims to discuss the energy issues facing the public sector of the municipality of Ferizaj, the steps that municipal public sector personnel in Kosovo, specifically in the municipality of Ferizaj, can take to understand and reduce energy use and reduce the cost of bills, as well as the sources of financing for energy efficiency projects. The focus of this thesis is to identify opportunities for increasing the energy efficiency of public facilities managed by the municipality and recommendations will be given on how to achieve increased energy efficiency in the municipality of Ferizaj, and perhaps this will also be an initiative to use this topic in other municipalities in Kosovo.

The objective of this paper is to provide information and resources to assist the management of municipal public companies and their staff in identifying and implementing opportunities to reduce energy use.

The following are some specific objectives:

1. Recording the current situation in public municipal companies,
2. Discussing and finding the most objective solutions to overcome these problems,
3. Increasing the efficiency of electricity for these facilities that will be considered based on the experiences of countries in the region and the world.

2.2 Research questions and hypotheses

2.2.1 Research questions

To achieve and fulfill the objectives of this paper, I used the following research questions:

1. What are some examples of distributed energy, are there existing models?
2. What are the advantages of electricity?
3. What are the costs of projects in the electricity sector?
4. Is there a reduction in energy consumption due to efficiency measures?
5. Can there be competitors in the creation of electricity?

2.2.2 Hypotheses

A hypothesis is an assumption about the relationships between the elements of the phenomenon being studied or about the connection between that phenomenon and another phenomenon. In this research, I will try to present and prove the following theses:

H1: The efficiency of optimizing the cost of Energy Transition and strengthens the decarbonization effect of renewable energies.

H2: The use of efficient electricity reduces electricity costs by up to 50%.

Energy Efficiency in Kosovo

According to Article 35 of the Treaty, the Energy Community may adopt measures to promote energy efficiency. The Council of Ministers of the EC established a Task Force on Energy Efficiency,

Emissions in December 2007, which became operational in January 2008 and in application of the objectives set out in the TEC, MEM was obliged to draft a National Energy Efficiency Action Plan, entitled the Kosovo Energy Efficiency Action Plan (KEEAP), a long-term document, drafted and implemented at national level and covering the period 2010-2018.

The first KEEAP was approved in principle by the Secretariat of Energy in November 2010. In April 2011, the National Energy Efficiency Action Plan for the period 2010 – 2018, prepared by the former Ministry of Energy and Mining, was adopted by the Assembly of the Government of Kosovo and in June 2011 the new Law on Energy Efficiency was adopted by the Parliament of the Republic of Kosovo.

As well as the adoption of energy labelling, eco-design, energy performance of buildings and energy efficiency for end-use. The law also provided the legal basis for the Agency for Energy Efficiency and for the establishment of a fund for the promotion of energy efficiency and renewable energy projects¹.

Investments in energy efficiency in the public sector can significantly reduce energy costs, creating fiscal space for other development priorities and increasing competitiveness and job creation. International experience has shown that investments in energy efficiency in the public sector can help catalyze efficient energy markets, enabling governments to lead by example and paving the way for similar improvements in the private sector.

The central and municipal governments will benefit from the Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project through reduced energy costs, a renovated building stock, and greater comfort and functionality of interiors. The Ministry of Economic Development, the Ministry of Environment and Spatial Planning, the Kosovo Energy Efficiency Agency, and the Energy Regulatory Office will all develop their capacities to promote sustainable energy investments across the country².

3.1 The Impact of Energy Efficiency in Kosovo

Electricity production in Kosovo relies mainly on energy produced from lignite burned by thermal power plants (TC Kosovo A and B). Lignite is the most important energy resource in Kosovo, which supplies about 95% of total electricity production, while the remaining about 5% of energy production is mainly realized by small hydropower plants built in different periods of time. The demand for electricity in Kosovo exceeds the needs for Kosovo's supply, therefore Kosovo must rely on unreliable and unstable imports of electricity. Regarding the supply of heat in Kosovo, the main energy sources for space and water heating in buildings are biomass (mainly firewood) and electricity, which together cover over 80% of heating consumption. The high consumption of firewood in an uncontrolled and unregulated manner can lead to forest degradation, causing adverse environmental, economic and health impacts. Heating with electricity is very inefficient and exacerbates power outages, especially during the winter season when the population needs heating. Kosovo is particularly constrained during the winter months due to the demand for electricity for heating. Taking into account the above and adding to this the fact of air pollution in recent years in our country, it is clear that energy efficiency (EE) should be one of the essential objectives in Kosovo's energy strategy to support its economic growth as well as meeting global obligations for climate change mitigation and environmental sustainability. Kosovo's energy intensity, in terms of energy use per unit of gross domestic product (GDP), is more than three times higher (0.46 TPES/\$000 GDP) than that of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) countries, indicating

¹ Final Report- National Building Energy Efficiency Study for Kosovo, fq 22

² <https://www.worldbank.org/en/country/kosovo/brief/al-energy-efficiency-kosovo>

considerable potential for improving EE. Furthermore, Kosovo's per capita energy use is about one-third of OECD countries, so its energy intensity is likely to increase further as incomes rise (IEA 2015)³.

3.2 Renewable Energy Sources in Kosovo

Renewable Energy Sources (BER) represent an important source of energy in Kosovo with an untapped potential. The use of these renewable energy sources contributes to the achievement of the country's long-term energy policy goals, such as:

- Supporting Economic Development,
- Increasing Security of Electricity Supply, and
- Environmental Protection.

In function of these resources, support measures for Renewable Sources are increased from a financial and fiscal perspective for all BER, as well as their provision with green certificates. To stimulate Renewable Sources of Energy in Kosovo, feed-in tariffs have been established for sources of water, wind, photovoltaic energy and biomass, including biogas. These measures of the incentive policy towards RES aim to fulfill the requirements of the European Union directives.

3.2.1 Solar Energy

Solar energy is the sunlight that reaches the earth, converted into heat energy and electrical energy. Solar energy is a form of energy radiated by the Sun, which includes light, X-rays and radioactive waves. Concentrated solar collectors require large areas of approximately 1km² for every 20-60 MW, based on the Earth's surface (510.1x10⁶ km²) we can conclude that we are dealing with large amounts of solar energy (about 106 TWh/year). Kosovo Within a year of 365 days, 285 days are covered with sunshine while the solar constant is 1367 W/m².

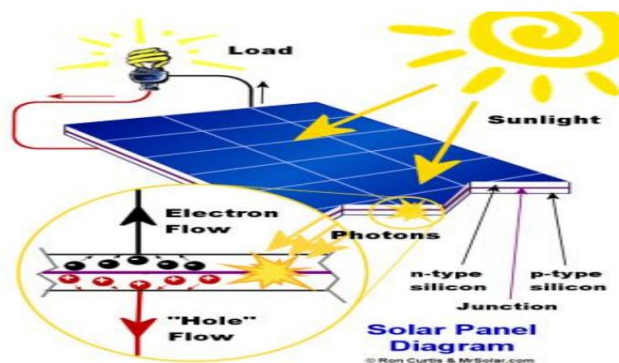


Figure 9 Operation of the photovoltaic system⁴

The material used in photovoltaic cells is crystalline silicon, which is mostly found in sand, because the photovoltaic system does not only need sunlight but can also produce electricity on cloudy days. The types of PV materials are polycrystalline, monocrystalline, hybrid, and all-black.

³ <https://a-a-k.org/wp-content/uploads/2020/07/Udhezuesi-per-komunat.pdf>, fq 14

⁴ <https://knowledgecenter.ubt-uni.net/cgi/viewcontent.cgi?article=2842&context=etd>, pg. 19

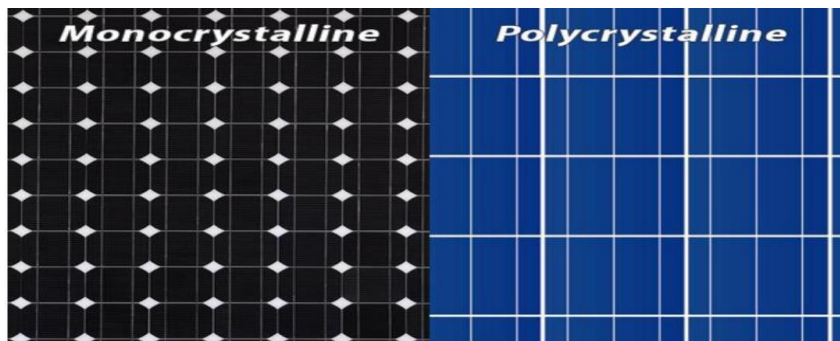


Figure1. Operation of the photovoltaic system⁵

The possibilities of using Solar Energy in Kosovo are good because, as mentioned earlier, it has a solar radiation of 1367 W/m².

Latitude from 41° 52 to 43° 16 (N)

Longitude from 19° 59 to 21° 16 (E)⁶

3.2.2 Wind Energy

Kosovo has a favorable position for the production of wind energy and the prices are favorable.

A wind power plant has been built in Kamenica by the company KITKA, which has an installed capacity of 32.5 MW and will generate 95,600,000 kWh of electricity per year, there will be 9 generating units with 137 turbines with a height of 110m and a diameter of about 137m. This wind power plant was completed on August 31, 2018. Wind turbines are large rotating machines that serve to convert the kinetic energy of the wind into mechanical power, which drives the generator to generate energy⁷.

Types of wind turbines are vertical and horizontal axis, most are horizontal axis, the main components include:

- Low speed rotor, which rotates at 30-60 rpm,
- High speed shaft connected to the low speed rotor through the impeller housing,
- Rotor connection to the propeller,
- Connection to the tower,
- Wind turbine housing,
- Blades 21,
- Chassis,
- Tower,
- Main frame,
- Turbine body⁸.

⁵ <https://knowledgecenter.ubt-uni.net/cgi/viewcontent.cgi?article=2842&context=etd>, pg 20

⁶ Right there., pg. 20

⁷ <https://www.ebrd.com/work-with-us/projects/psd/kitka-wind.html>. 2018

⁸ <http://www.akm.gov.al/assets/energji-te-e-rinovueshme.pdf>

3.3 Transmission System Operator Kostt

Kostt is a public company with 100% shares owned by the Republic of Kosovo according to the Law on Electricity, shareholder rights are exercised in the Assembly of the Republic of Kosovo based on Law No. 05/L-085.

Kostt operates under two licenses issued by the Energy Regulatory Office ERO, as a System and Transmission Operator and as an Electricity Market Operator.

Kostt manages the Transmission System of the Republic of Kosovo that operates on high voltage lines 400 kV, 220 kV, and 110 kV. Kostt's responsibility is to transmit Electricity safely and reliably from generation units to the distributed system, 24 hours a day, 365 days a year⁹.

3.4 Furnizimi me Energji Elekrike (KESCO)

KESCO was established in 2015 by the Limak-Çalik consortium, Kesco has around 500 thousand customers and is spread across all cities in Kosovo, managed by 7 main districts, Kesco's customers are households, commercial and industrial.

- Kesco's tariff structure.
- The tariff structure for each household approved by ERO is divided into three blocks,
- First tariff block - Applies to monthly consumption up to 200 kWh/month,
- Second tariff block - Applies to consumption between 201 kWh/month and 600 kWh/month,
- Third tariff block - Applies to consumption above 600 kWh/month.

The existing tariff structure for household consumers in Kosovo is such that, in addition to being divided into three blocks, it applies different prices for consumption during the night and during the day, in order to reflect the difference in electricity costs at different times.

3.5 Energy audit in buildings

Energy audit in the Law on EE No.06/L-079 is defined as a systematic procedure carried out by an energy auditor, the purpose of which is to provide the necessary information regarding the energy consumption profile of a building or group of buildings, an activity, industrial or commercial installation, or a private or public service, with which cost-effective energy saving opportunities are identified and quantified and the results are reported.

Energy audit consists mainly of the collection and measurement of data by certified auditors, which are valid for the assessment of the energy consumed by a building. Its main purpose is to make an initial energy study and identify the operating and maintenance procedures. Its main task is to describe and evaluate the current energy demand and consumption, to identify possible and most important energy management improvements and, ideally, to provide an energy management plan.

The data collected during the energy audit, such as from building observation/measurement, data collection and also from user interviews, should describe the energy demand of the building, which is mainly influenced by the use of the building and the building envelope, as well as the energy consumption, which is influenced by the equipment and the type of energy used for heating, cooling, ventilation, lighting the building and for heating sanitary hot water. By implementing energy audit processes, assessing the energy use used within a building or a certain area, we can accurately identify opportunities to reduce consumption.

⁹ KOSTT. "Web Kostt."

Energy audits are the first step to improve the energy efficiency of buildings, public lighting and industrial facilities¹⁰.

3.6 Benefits of an energy-efficient building

"Energy efficiency" means the ratio in percentage of the energy output to the energy input, in the same energy system, which in our case is the building. This is the theoretical definition of "Energy Efficiency". More simply, we would say that "Energy Efficiency" is when in an energy process the same results are achieved using less energy. The excess energy in this case is the energy saved by taking measures to reduce the amount used in this process.

What are the benefits of efficient buildings:

- We save energy and pay less on energy bills,
- Better quality of life and comfortable environment,
- Longer lifespan of buildings,
- Environmental protection and reduction of emissions into the environment,
- Increase in the value of the building/apartment.

The purpose of energy saving in buildings is to create conditions for the systematic rehabilitation of existing buildings and improve the required level of thermal protection of buildings. New. Old buildings consume on average in a year $Q=131 - 325 \text{ kWh/m}^2$ of energy used for heating, while buildings insulated in a standard way use less than $Q=120 \text{ kWh/m}^2$.

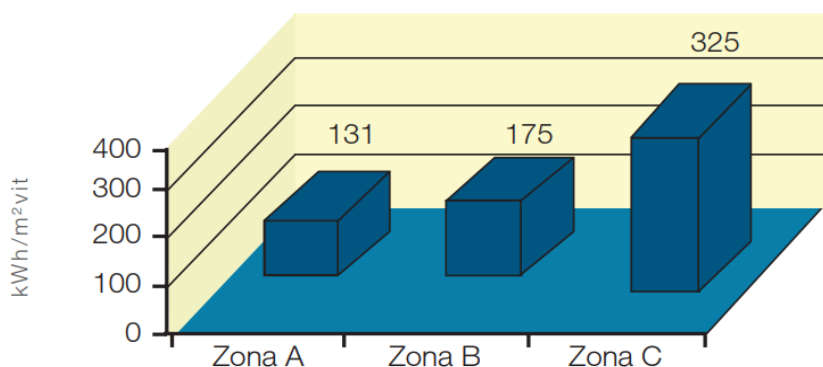


Figure 2 Annual energy consumption in homes in the three climate zones¹¹

The annual heating demand, Q (kWh/year), is the calculated amount of energy that the heating system must supply to the building during the year to maintain the design internal temperature. Such an expression of energy consumption in buildings in m^2 or m^3 provides basic data that allows the presentation of the energy performance of the building as well as to compare the "energy performance" of different buildings.

This annual energy, calculated for heating, should not be higher than that required in the regulations established for this purpose. In this case, it is important to emphasize that in our country too there is a Law and a Regulation that establishes norms for heat conservation in buildings¹².

¹⁰ <https://a-a-k.org/wp-content/uploads/2020/07/Udhezuesi-per-komunat.pdf>, fq 24

¹¹ <https://a-a-k.org/wp-content/uploads/2020/07/Udhezuesi-per-komunat.pdf>, fq 25

¹² <https://a-a-k.org/wp-content/uploads/2020/07/Udhezuesi-per-komunat.pdf>, fq 23

3.7 Comparative analysis of Kosovo's energy efficiency law with countries in the region

To assess the progress that Kosovo has made in terms of approximating its efficiency legislation and policies with those of the EU, INDEP has compared Kosovo's legislation with the countries of the region. The following countries were included in the comparative analysis: Albania, Montenegro, Serbia, Croatia, Turkey. The European Union Directive 2006/32 and the new Energy Efficiency Directive 2011/0172 were also consulted. The comparison with Directive 2011/0172 was made only to see the new challenges that countries are expected to face when this directive enters into force on 1 January 2014. This analysis will present the main findings that mainly relate to the shortcomings of the Kosovo Efficiency Law in comparison to the laws of the above-mentioned countries.

It should be noted that the Kosovo Law on Energy Efficiency is deficient in many areas since a number of measures that will be described below are not defined by law but by the Energy Efficiency Action Plan 2010-2018. On the other hand, the above-mentioned countries list more direct measures in their Energy Efficiency Laws. Thus, great importance has been given to the content of the Action Plan so that the study is as comprehensive as possible. The Energy Efficiency Agency (AKEE), as an implementing institution for Energy Efficiency, is present in Albania, Serbia and Romania, in addition to Kosovo. Meanwhile, in Croatia there is the Energy Regulatory Council, in Bulgaria the State Energy Regulatory Commission, and in Turkey the Energy Efficiency Coordination Board.

The countries of the region also differ from each other in the target of primary energy saving. The European Union Directive 2006/32 requires energy savings of 9%, while the new Directive 2011/0172 will provide for a 17% saving of primary energy consumption by 2020. This figure stands at 9% by 2018 for Kosovo¹³, 26% by 2020 for Albania¹⁴, 20% by 2023, for Turkey¹⁵, 9% by 2016, for Montenegro¹⁶, 20% by 2020, for Croatia¹⁷ and 13.5% by 2016 for Romania¹⁸.

3.8 General recommendations for improving energy efficiency in buildings

Below we are providing some efficient measures that you can implement in your residential buildings.

- Simple measures to improve energy efficiency in existing buildings, which do not require additional costs and bring immediate savings. .
 - Turn off heating or cooling appliances at night and when there are no people at home,
 - Avoid covering heating radiators with covers, etc.,
 - Determine the optimal heating time for preparing hot water,
 - Reduce the heating temperature in the room by 1°C in the heating season,
 - Set the cooling temperature to 26°C as a minimum in the cooling season,
 - Use natural lighting as much as possible,
 - Turn off the lights in the room when they are not needed¹⁹.
- Simple measures to improve energy efficiency in existing buildings, which do not require additional costs and bring immediate savings..

¹³ First Medium-Term Energy Efficiency Action Plan for Kosovo(2010-2012), pg 19

¹⁴ Energy Charter Protocol on Energy Efficiency and Related Environmental Aspects PEEREA (2007), Albania, a regular review of Energy Efficiency policies report.

¹⁵ ABB Group. National energy policies, and energy efficiency and CO2 trends for industries and utilities. Country Report: Turkey. (2011). pg 1.

¹⁶ Ministry of Economy of Montenegro. Energy Efficiency in Montenegro – National Energy Efficiency Plan. (2010).

¹⁷ ABB Group. National energy policies, and energy efficiency and CO2 trends for industries and utilities. Country Report: Croatia. (2011).

¹⁸ ABB Group. National energy policies, and energy efficiency and CO2 trends for industries and utilities. Country Report: Romania. (2011).

¹⁹ <http://akbn.gov.al/images/informacion/Eficienta/brochura%20final.pdf>, pg 32

- Adjustment of joints (connections) of doors and windows with walls,
 - Thermal insulation of terraces and roofs,
 - Installation of thermostatic valves on heating radiators,
 - Installation of shutters and awnings during the hot season,
 - Maintenance and repair of heating/cooling systems,
 - Installation of automatic energy control,
 - Installation of efficient light bulbs,
 - Replacement of household electrical appliances with class A²⁰ equipment.
- Measures to improve energy efficiency with higher costs and with a payback period greater than 3 years..
- Replacing doors and windows with double-glazed or triple-glazed windows/doors with low transmission coefficient,
 - Thermal insulation of the exterior (envelope) of the building such as its surrounding walls, terrace/roof, floor,
 - Closing the stairwell and entrance to the building when they are open,
 - Thermal insulation of hot water pipes and its storage,
 - Use of renewable energy sources, such as installing solar panels for hot water, using biomass, geothermal energy, etc²¹.

Research results

This chapter presents the methodology for carrying out this work, which is based on mainly qualitative methods of data collection and analysis. The three main typologies of scientific research methods are also applied in the field of engineering: quantitative, qualitative, and mixed research methods that combine quantitative and qualitative methods. The quantitative method is a research method that is often used to test theories or hypotheses, to collect descriptive information, or to examine relationships between different variables that are measurable, and the data can be analyzed statistically. I will also supplement my work with photographs, tables, and graphics of other explanatory material.

The results and discussions section will begin with some socio-demographic data of the respondents. This is to present the characteristics of the participants in this study, that is, to know the characteristics of the respondents.

4.1 The current state of schools

The existing building of the "Tefik Çanka" Primary and Secondary School in Ferizaj and the "Dr. Shaban Hashani" Social Gymnasium in Ferizaj and their history are given below.

4.1.1 The current situation of the "Tefik Çanka" primary and secondary school in Ferizaj

Regarding the images of the existing condition of the school that are presented below, some photos show that the school is damaged and has large losses of electricity, the doors and windows are damaged. Saving energy in the public sector helps reduce harmful air and water pollution, as well as greenhouse gas emissions - generally with a negative impact on our pollutant emissions or CO₂, different from those with electricity and wood. It is worth noting that the use of all these heating

²⁰ <http://akbn.gov.al/images/informacion/Eficientia/brochura%20final.pdf>, pg 33

²¹ Right there, pg 34

sources does not positively affect the conservation of electricity, there is no possibility to save electricity because there is cooling throughout the building.



Figure 3. The doors of the building



Figure 4. The lighting is damaged



Figure 5. Damaged floor

4.1.2 The current state of the school Social Gymnasium "Dr. Shaban Hashani" Ferizaj

Regarding the images of the existing condition of the “Dr. Shaban Hashani” Social High School school that are presented below, in some photos the school is damaged and there are no savings (there are large losses) of electricity, the doors and windows are damaged, therefore this school has no insulation of the building. Saving energy in the public sector helps reduce harmful air and water pollution, as well as greenhouse gases, emissions or CO₂ different from those with electricity and

wood. It is worth noting that the use of all these heating sources does not positively affect the conservation of electricity.



Figure 6 School isolation



Figure 7 Damaged lights



Figure 8 The lights and their damage are not the same.

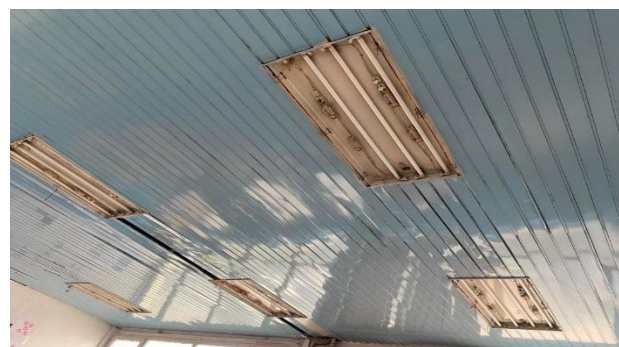


Figure 9 Damaged lights.

4.1.3 Electricity consumers

The table below shows that in the primary and lower secondary school "Tefik Çanka" Ferizaj, the consumers of electrical energy are: electric lights, projector, computers and heating, in the "Dr. Shaban Hashani" Secondary School, the consumers of electrical energy are considered to be "Lighting and computers".

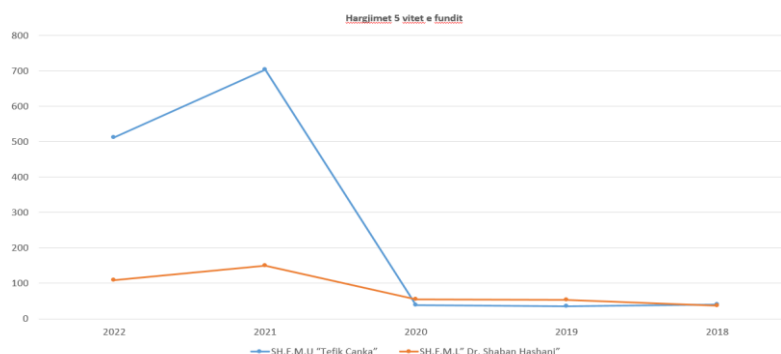
Table 1 Spenders at schools

	PSLSch "Tefik Çanka"	EHSch" Dr. Shaban Hashani"
Who are the consumers of electricity?	Lighting, Projector, Computers and, Heating	Lighting and, Computers

The table below shows school expenditures in the last 5 years in tabular form as well as in the graph presented.

Table 2 Electricity consumption in the last 5 years

Vitet	2022	2021	2020	2019	2018
PSLSch "Tefik Çanka"	512.54 €	703.82 €	38.04 €	35.82 €	39.87 €
EHSch"Dr. Shaban Hashani"	109.47 €	150.48 €	54.69 €	52.75 €	37.48 €



Graphics 1. Electricity consumption in the last 5 years

4.2 Descriptive results

This chapter presents and analyzes the data collected through questionnaires distributed to citizens. From the collected data, we obtained the results, which we analyzed and interpreted through the tables and graphs below.

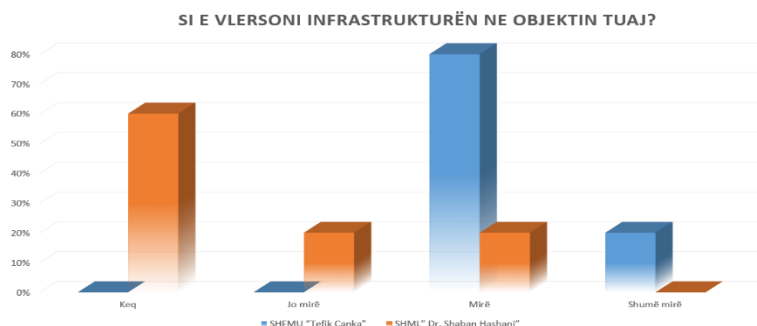
Results from the questionnaire with the staff of the school "Tefik Çanka" and the social gymnasium "Dr Shaban Hashani"

Pyetja e parë:

How do you evaluate the infrastructure in your facility?

I distributed 10 questionnaires on this question and of these, 5 respondents from the primary school "Tefik Çanka" and 5 from the social high school "Dr Shaban Hashani" answered.

The results are presented in the following table:



Graphic 2. How do you rate the infrastructure in your facility?

Analysis of results:

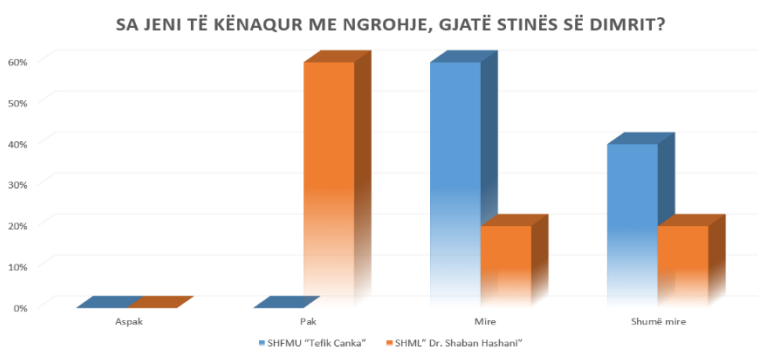
The assessment of the infrastructure in these two facilities according to the surveys shows that the difference is large, in the "Tefik Çanka" school it is assessed by a majority of 80% as Good, while in the "Dr. Shaban Hashani" school the assessment of the respondents is 60% as Bad.

Second question:

How satisfied are you with heating during the winter season?

I distributed 10 questionnaires on this question and 5 respondents from the primary school "Tefik Çanka" and 5 from the social high school "Dr Shaban Hashani" answered.

The results are presented in the following table:



Graph 3 How satisfied are you with heating during the winter season?

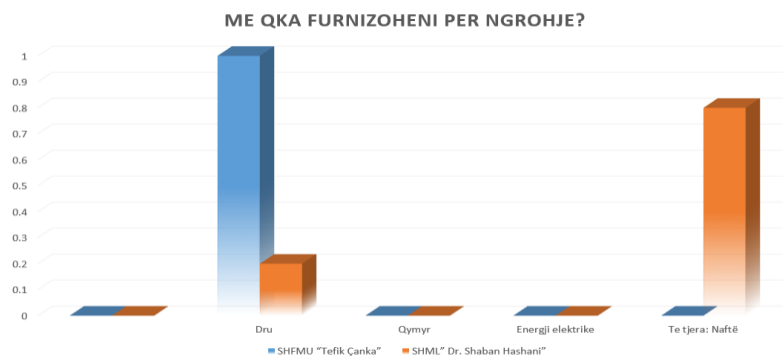
Analysis of the results:

According to the analysis of the results, it can be seen that in these two schools there is a big difference in heating, as can be seen in the graph in the column Poor with 60%, most of the staff of the school "Dr. Shaban Hashani", while the staff of the school "Tefik Çanka" rated the heating in this facility with 60% Good.

Third question:**What do you use for heating?**

I distributed 10 questionnaires for this question and 5 respondents from the “Tefik Çanka” primary school and 5 from the “Dr Shaban Hashani” secondary school answered.

The results are presented in the following table:



Graphic 4. You are supplied with cake for heating

Analysis of the results:

According to the school staff, as seen in the graph above, the “Tefik Çanka” school is supplied with only wood for heating, while in the “Dr. Shaban Hashani” school, heating is done with 80% oil and 20% wood according to the respondents’ analysis.

Question four:**Is electric lighting sufficient?**

This question was open for response, I distributed 10 questionnaires and of these, 5 respondents from the primary school “Tefik Çanka” and 5 from the secondary school “Dr Shaban Hashani”.

The results are presented in the following table:

Is electric lighting sufficient?

PSLSch “Tefik Çanka”	EHSch” Dr. Shaban Hashani”
Yes, since natural lighting is sufficient, there are enough lamps in the classroom.	That's fine.
Yes.	To some extent.
Yes, it is sufficient.	Yes.
No, it is not sufficient, our school needs technical lighting.	Yes.
Yes, it is sufficient.	Not sufficient.

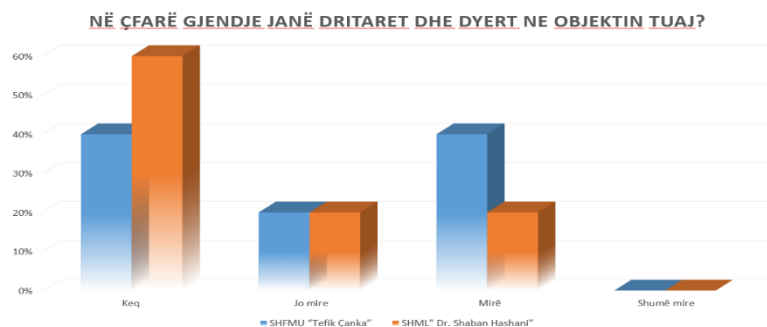
Analysis of the results:

In this question, according to the respondents, as can be seen in the table above, in the “Tefik Çanka” school building, electric lighting is sufficient, while in the “Dr. Shaban Hashani” school, some of the respondents answered positively and some negatively.

Fifth question:**What is the condition of the windows and doors in your building?**

I distributed 10 questionnaires on this question and 5 respondents from the “Tefik Çanka” primary school and 5 from the “Dr Shaban Hashani” secondary school answered.

The results are presented in the following table:



Graphic 5 What condition are the windows and doors in your facility?

Analysis of results:

In these two school buildings, the condition of the doors and windows is assessed as unsatisfactory, with 60% of those in the “Dr. Shaban Hashani” school being satisfied, while only 40% in the “Tefik Çanka” school being satisfied.

Question six:**How much do you think the poor insulation of the building affects heating?**

I distributed 10 questionnaires on this question, and of these, 5 respondents from the “Tefik Çanka” primary school and 5 from the “Dr. Shaban Hashani” secondary school answered.

The results are presented in the following table:



Graph 6. How much do you think poor insulation of a building affects heating?

Analysis of results:

According to the analysis conducted, the respondents of the two schools give convincing answers that poor insulation has a very big impact on heating in their facilities.

Question seven:**How much investment has there been in the last 5 years in your facility for insulation of walls, windows, doors, central heating and electric lighting?**

This question was open for answers, I distributed 10 questionnaires and of these, 5 respondents from the primary school "Tefik Çanka" and 5 from the secondary school "Dr Shaban Hashani".

The results are presented in the following table:

How much investment has there been in the last 5 years in your facility for wall insulation, windows, doors, central heating and electric lighting?

<i>PSLSch "Tefik Çanka"</i>	<i>EHSch "Dr. Shaban Hashani"</i>
Yes, they constantly have investments, renovations of doors, windows, bathrooms, etc.	In heating.
Yes.	A little.
Yes, there have been investments where toilets, digital boards, administrative equipment have been renovated, projects from donors where they have been placed in all classrooms.	For central heating, there has been.
Yes, there has been.	There has never been.
There were none.	There has been none at all because the school building, the former building of the "Gjon Sereç" school, is questionable.

Analysis of results:

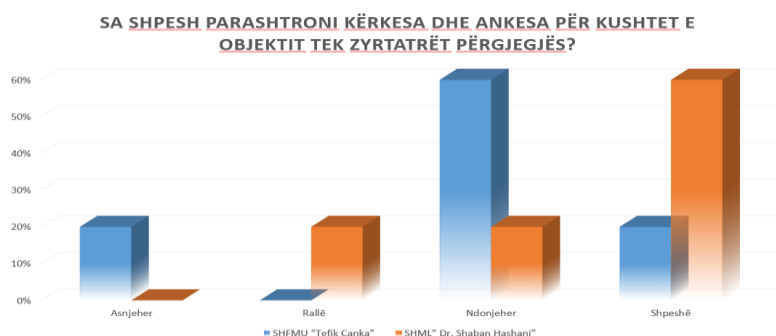
The analysis of this question is that in the school "Tefik Çanka" in the last 5 years of continuation there were investments mostly in renovations, while in the school "Dr. Shaban Hashani" according to the respondents in this school only heating had investments because it was previously the facility of the school "Gjon Sereçi".

Question eight:

How often do you submit requests and complaints about the conditions of the facility to the officials responsible?

I distributed 10 questionnaires for this question and 5 respondents from the "Tefik Çanka" primary school and 5 from the "Dr Shaban Hashani" secondary school answered.

The results are presented in the following table:



Graph 7. How often do you submit requests and complaints about the conditions of the facility to the officials responsible?

Analysis of the results:

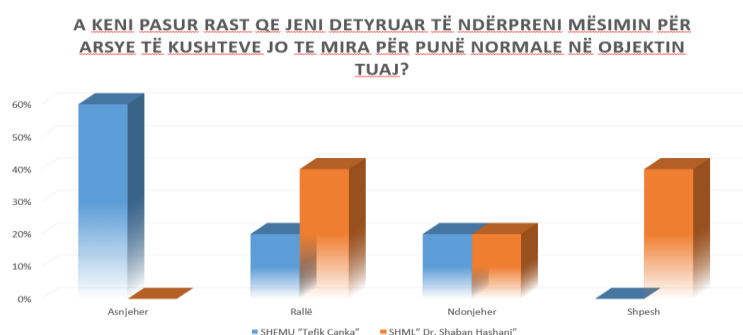
In graph 7 the school “Tefik Çanka” sometimes seems to be dissatisfied with the conditions of its facility, while the school “Dr. Shaban Hashani” often submits requests and complaints to the responsible officials.

Question nine:

Have you ever been forced to interrupt classes due to poor conditions for normal work in your facility?

I distributed 10 questionnaires on this question and of these, 5 respondents from the primary school “Tefik Çanka” and 5 from the secondary school “Dr. Shaban Hashani” answered.

The results are presented in the following table:



Graph 8. Have you ever been forced to interrupt your studies due to poor working conditions in your facility?

Analizë e rezultateve:

In the "Tefik Çanka" school, despite the good school conditions, lessons are rarely interrupted, while in the "Dr. Shaban Hashani" school, lessons are often interrupted, according to respondents.

Question ten:

Apart from the weather conditions, how much damage is caused by students, what are the measures you take to prevent this damage?

This question was open for answers, I distributed 10 questionnaires and of these, 5 respondents from the primary school “Tefik Çanka” and 5 from the social high school “Dr Shaban Hashani”.

The results are presented in the following table:

Apart from weather conditions, how much damage is caused by students, what measures do you take to prevent this damage?

PSLSch “Tefik Çanka”	EHSch” Dr. Shaban Hashani”
Damages from students are more numerous than those from the atmosphere, measures are taken, penalties are given, material compensation are given by parents.	Conversations on raising awareness for the preservation of public spaces in general.
Yes.	Disciplinary measures against students.

Damages are made, even though they are renovated, they are still completed in all the necessary equipment, and we take measures against those who are irresponsible.	There is also damage from students to doors, windows.
There is a lot of damage from the environmental condition of students, punishment occurs by the school body.	Very large, the measures are minimal.
There is damage from students.	The damage is large. Punishments against students are made based on the school regulations.

Analizë e rezultateve:

Analysis of the results:

The analysis shows that in both buildings there is significant damage, mostly on the part of the students, but measures are taken, and punishments are given to all school students who cause damage.

- **Conclusions and Recommendations**
- **5.1 Conclusions**

From the findings of this study, we conclude that schools in the city of Ferizaj use mostly wood for heating schools, while electricity and coal are not used at all. Furthermore, schools spend a high annual amount on electricity, which includes the use of lights for lighting, computers, monitors, individual heating, etc. Based on the research and findings related to the analysis of the Energy Sector, I have come to the conclusion that:

- Construction of new generation capacities,
- Construction of Renewable Resources - their utilization,
- Saving Electricity,
- Reducing Environmental Pollution from Wood Burning,
- Improving the Electricity Network,
- Reducing Losses,
- Creating Conditions for the Importation of Natural Gas,
- Creating an Open and Competitive Electricity Market

- **5.2 Recommendations**

From the above results obtained from the interview of the staff of the two schools, we come to conclusions and recommend that:

- Save as much electricity as possible, which is used in unnecessary circumstances, in order for schools to be able to be equipped with other necessary materials that help make learning as effective as possible,
- Insulate the walls of schools in order to reduce thermal losses as much as possible,
- Replace old model windows with triple-glazed windows - German profiles or similar with 7 ventilation areas and 3 seals with a profile thermal coefficient $U_f - 0.96 \text{ W / m}^2\text{K}$ Color: WHITE, GLASS: Manufacturer GUARDIAN or similar, type A Configuration: 4 Low E x 16 Alu. with argon gas x 4 float x 16 Alu. with argon gas x 4 Clima Solar with thermal coefficient of glass $U_g - 0.6 \text{ W / m}^2\text{K}$

- Adjustment of the roof of schools where intervention is needed and installation of photovoltaic solar panels to produce electricity.
- Etc.



KIRSAL MİMARİ MİRAS YAPILARINDA SIFIR ENERJİLİ BİNALARA DOĞRU: ÇALLI KÖY ODASI ÖRNEĞİ

Hikmet ALİM

Öğr. Gör. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Sivas-Türkiye

(Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0002-5524-0015

Özet

Bu çalışma, Sivas ili merkez ilçeye bağlı Çallı Köyü'nde yer alan köy odasının geleneksel mimari özellikleri bağlamında enerji verimli iyileştirme çalışmaları sonucunda sıfır enerjili bina (SEB) potansiyelini araştırmayı amaçlamaktadır. Kırsal mimari mirasın önemli bir ögesi olan köy odaları, yerel iklim koşullarına uyumlu pasif tasarım stratejileri ve özgün malzeme kullanımlarıyla enerji verimliliği açısından dikkate değer bir potansiyel sunmaktadır. Bu yapıların enerji performansının iyileştirilmesi hem sürdürülebilirlik hem de geleneksel yapıların değerlerinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında, geleneksel yöntemlerle rölövesi alınan köy odası, DesignBuilder yazılımı kullanılarak modellenmiş ve mevcut durumuna ilişkin enerji performansı analizleri gerçekleştirilerek yıllık enerji tüketim verileri elde edilmiştir. Sonraki aşamada farklı iyileştirme senaryoları üzerinden enerji verimli iyileştirme çalışmaları uygulanarak detaylı analizler yapılmıştır. Enerji verimliliği stratejileri, Historic England tarafından belirlenen koruma ilkeleri doğrultusunda geliştirilmiş ve yapı bütünlüğü ile özgün cephe oranlarının korunması esas alınmıştır. Bu kapsamda, enerji verimliliğine yönelik çalışmalar, yapının tarihi niteliğini, dokusunu ve kimliğini korumayı esas alarak opak ve saydam yapı kabuğunda yapılan iyileştirmeler ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ile değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, köy odasının mevcut durumda sahip olduğu enerji performansı ile SEB kriterleri arasındaki farkları ortaya koymakta ve uygulanabilecek iyileştirme senaryolarının etkinliğini göstermektedir. Bulgular, kırsal mimari miras yapılarının hem tarihi değerlerini koruyarak hem de SEB hedeflerine uyum sağlayarak enerji performanslarının artırılabilirliğini ortaya koymaktadır. Çalışma, kırsal yerleşimlerdeki geleneksel yapıların korunması ve enerji verimliliği yönünden iyileştirilmesi için bir model sunmakta ve gelecekte benzer yapıların sürdürülebilirlik bağlamında değerlendirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: SEB, kırsal mimari miras, köy odası, enerji verimliliği, DesignBuilder, Historic England

TOWARDS ZERO-ENERGY BUILDINGS IN RURAL ARCHITECTURAL HERITAGE: THE CASE STUDY OF CALLI VILLAGE ROOM

Abstract

This study aims to investigate the potential of a traditional village room located in Çallı Village, Sivas, Turkey, to achieve zero-energy building (ZEB) standards through energy-efficient retrofit interventions. As a significant element of rural architectural heritage, village rooms present notable potential for energy efficiency owing to their passive design strategies and use of local materials

adapted to climatic conditions. Improving the energy performance of such buildings is of great importance both for sustainability and for the preservation of the cultural values of traditional architecture. Within the scope of the study, the village room was surveyed using traditional methods, modeled in DesignBuilder software, and its existing energy performance was analyzed to obtain annual energy consumption data. In the subsequent stage, energy-efficient retrofit scenarios were applied and subjected to detailed analyses. The energy efficiency strategies were developed in line with the conservation principles defined by Historic England, with particular emphasis on preserving the building's integrity and original façade proportions. Accordingly, energy efficiency improvements were evaluated through enhancements to the opaque and transparent building envelope and the integration of renewable energy systems, while maintaining the historical character, texture, and identity of the structure. The results reveal the differences between the current energy performance of the building and the ZEB criteria, as well as the effectiveness of the proposed retrofit scenarios. Findings demonstrate that rural architectural heritage buildings can be upgraded to improve their energy performance while preserving their historical values and aligning with ZEB targets. This study provides a model for the conservation and energy-efficient enhancement of traditional buildings in rural settlements and aims to contribute to the sustainable evaluation of similar structures in the future.

Keywords: ZEB, rural architectural heritage, village room, energy efficiency, DesignBuilder, Historic England

Giriş

Küresel ölçekte artan enerji talebi, fosil yakıtların neden olduğu çevresel etkiler ve iklim değişikliğinin giderek belirginleşen sonuçları, yapı sektöründe enerji verimliliğini sürdürülebilirlik politikalarının merkezine yerleştirmiştir. Yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan mevcut binaların enerji performanslarının iyileştirilmesi, Avrupa Birliği'nin 'Sıfır Enerjili Binalar (SEB)' hedefleri doğrultusunda öncelikli stratejik alanlardan biri olarak görülmektedir (European Commission, 2010). Bununla birlikte, tarihî ve kültürel miras niteliği taşıyan geleneksel yapıların bu dönüşüm sürecine dâhil edilmesi, yalnızca teknik değil, aynı zamanda koruma ilkeleri açısından da çok boyutlu bir yaklaşım gerektirmektedir (ICOMOS, 2019).

Kırsal yerleşimlerdeki geleneksel yapılar, bulundukları bölgenin iklimsel, coğrafi ve sosyo-kültürel koşullarına uyumlu olarak şekillenmiş, yerel malzeme ve pasif tasarım stratejileriyle enerji verimliliği açısından dikkate değer potansiyeller barındırmaktadır. Bu yapılardan biri olan köy odaları, Anadolu kırsal mimarisinin özgün bir örneğini teşkil eder (Bulut, 2017). Köy odaları, yöre halkının sosyal ve kültürel etkileşim mekânı olmanın yanı sıra, yerel iklim koşullarına uyumlu yapım teknikleri ve doğal malzeme kullanımlarıyla çevresel sürdürülebilirlik açısından da dikkat çekici yapılardır (Tuztaş, 2004). Ancak, zaman içerisinde kullanımdan düşmeleri ve bakım-onarım eksiklikleri nedeniyle bu yapıların büyük kısmı işlevsiz hale gelmiş; enerji verimliliği açısından çağdaş gerekliliklerin gerisinde kalmıştır.

Günümüzde, kırsal mimari mirasın korunması ile enerji verimliliği hedeflerinin bir arada ele alınması gerekliliği, disiplinler arası bir araştırma alanı ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda, uluslararası koruma ilkeleri ve sürdürülebilir enerji politikaları arasındaki dengeyi sağlamak, geleneksel yapıların yaşam döngüsünü uzatmanın ve kültürel kimliğin sürekliliğini korumanın temel yollarından biri olarak görülmektedir. Historic England (2022) tarafından yayımlanan "Energy Efficiency and Historic Buildings" rehberinde, tarihî yapıların enerji performansını artırmaya yönelik müdahalelerin, yapının özgünlüğüne zarar vermeden, geri dönüşümlü ve düşük riskli yöntemlerle gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu yaklaşım, geleneksel yapıların sıfır enerjili bina (SEB) standartlarına uyarlabilirliğini araştırmak için güvenilir bir çerçeve sunmaktadır.

Bu çalışma, Sivas ili merkez ilçeye bağlı Çallı Köyü'nde yer alan köy odasının enerji verimliliği potansiyelini araştırarak, geleneksel kırsal mimari miras yapılarının sıfır enerjili bina standartlarına ulaşılabilirliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, köy odasının mevcut durumu rölöve verileriyle belgelenmiş; Historic England tarafından önerilen enerji verimliliği müdahale stratejileri temel alınarak enerji iyileştirme senaryosu oluşturulmuştur. Her iki senaryo, DesignBuilder simülasyon yazılımı aracılığıyla enerji tüketim performansı açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Araştırma, kırsal mimari miras yapılarında kültürel değerleri koruyarak enerji performansını iyileştirmeye yönelik bütüncül bir yaklaşım sunmakta; benzer nitelikteki geleneksel yapıların sürdürülebilir dönüşüm süreçlerine ışık tutmayı hedeflemektedir.

Kuramsal Çerçeve

Tarihî yapıların enerji performansının artırılmasına yönelik çalışmalar, uluslararası koruma ilkeleriyle enerji politikalarının kesişiminde yer alan önemli bir araştırma alanı olarak giderek önem kazanmaktadır. Geleneksel mimari yapılar, üretildikleri dönemde enerji verimliliği odaklı bir tasarım anlayışıyla inşa edilmemiş olsalar da yerel malzeme seçimi, yönlenme, doğal havalandırma ve kütle-form ilişkisi gibi pasif tasarım özellikleri nedeniyle günümüzün sürdürülebilirlik ölçütleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir (ICOMOS, 2019). Bu özellikler, geleneksel yapıların “doğal enerji etkinlik” potansiyelini göstermekte; bu yapıların uygun müdahalelerle çağdaş enerji standartlarına yaklaştırılabileceğini ortaya koymaktadır.

Uluslararası koruma literatüründe, tarihî yapıların enerji performansının artırılmasında temel ilke, “önce koruma, sonra müdahale” yaklaşımıdır. Bu ilke, yapıların tarihsel özgünlüğünün korunmasını esas alırken, çağdaş kullanım gereksinimlerini de dikkate alan çok katmanlı bir yaklaşım sunmaktadır. ICOMOS (2019) tarafından yayımlanan *Principles for the Conservation of Built Heritage* belgesinde, her müdahalenin geri döndürülebilir, minimum düzeyde ve yapıya zarar vermeyecek nitelikte olması gerektiği belirtilmiştir. Bu anlayış, enerji verimliliği odaklı uygulamaların da aynı etik çerçeve içinde ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, enerji verimliliği politikalarının yapı mirası üzerindeki etkilerini düzenleyen en kapsamlı rehberlerden biri Historic England (2022) tarafından yayımlanan *Energy Efficiency and Historic Buildings* belgesidir. Bu rehberde, tarihî yapıların enerji performansını artırmak için önerilen müdahaleler “pasif”, “aktif” ve “yenilenebilir enerji sistemleri” olarak üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır.

- Pasif sistem iyileştirmeleri, yapının biçimi, yönlenmesi, doğal havalandırması, güneş kontrolü ve yapı kabuğu bileşenlerinin ısı geçirgenlik katsayılarının iyileştirilmesi gibi unsurları içerir.
- Aktif sistem entegrasyonları, ısıtma-soğutma sistemlerinin enerji verimliliği yüksek donanımlarla yenilenmesini ve aydınlatmada düşük enerji tüketimli sistemlerin kullanılmasını kapsar.
- Yenilenebilir enerji uygulamaları ise fotovoltaik paneller, güneş kolektörleri veya düşük karbonlu enerji üretim teknolojilerinin yapıya zarar vermeden entegre edilmesini hedefler (Historic England, 2022).

Türkiye’de tarihî yapıların enerji performansına yönelik düzenlemeler henüz sistematik bir koruma-enerji entegrasyonu oluşturmuş değildir. TS 825 “Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları” (2024) standardı, yeni yapıların enerji etkin tasarımı için gerekli sınır değerleri tanımlamakta; ancak geleneksel veya koruma altındaki yapıların özelliklerini doğrudan kapsayamamaktadır. Bu nedenle, geleneksel yapıların enerji performansı değerlendirilirken, TS 825’in teknik sınırları, Historic England ve ICOMOS ilkeleriyle harmanlanarak yerel koşullara uyarlanmalıdır.

Enerji verimliliği ve kültürel miras arasındaki dengeyi kurmak için son yıllarda geliştirilen modeller, “adaptif yeniden kullanım” (adaptive reuse) ve “enerji odaklı koruma” (energy-conscious conservation) kavramlarını öne çıkarmaktadır. Bu yaklaşımlar, koruma sürecinde hem karbon ayak izinin azaltılmasını hem de yapıların yaşam döngüsünün uzatılmasını amaçlamaktadır (European Commission, 2010).

Bu kuramsal çerçeve doğrultusunda Çallı Köyü odası örneği, geleneksel taş yapının hem koruma ilkeleriyle hem de enerji etkin tasarım kriterleriyle uyumlu biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Böylelikle çalışma, kırsal mimari mirasın sürdürülebilirliğine ilişkin literatürde yer alan boşluğu doldurmayı ve SEB hedeflerine ulaşmada kültürel yapılar için uygulanabilir bir model sunmayı hedeflemektedir.

Materyal ve Yöntem

Çalışma alanı olarak seçilen Çallı Köyü, Sivas ili merkez ilçesine bağlı, deniz seviyesinden yaklaşık 1.300 metre yükseklikte yer alan bir kırsal yerleşimdir. Bölge, TS 825: Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları (Türk Standartları Enstitüsü, 2024) standardına göre 5. derece gün bölgesi (çok soğuk iklim) içinde bulunmaktadır. Kış aylarında uzun süreli don olayları ve düşük sıcaklık değerleri hâkimdir. Araştırma kapsamında incelenen köy odası, 1930–1933 yılları arasında yöresel işçilikle inşa edilmiş olup, moloz taş ile yığma sistemde yapılmıştır. Duvar kalınlıkları ortalama 60–70 cm olup, dış cephede saman katkılı çamur sıva, içte ise tatlı kireç sıva kullanılmıştır. Yapının çatı örtüsü ahşap makas sistemli, üzeri kiremit kaplamadır. Toplam inşaat alanı yaklaşık 76 m²'dir. Yapı tek katlı olup, bir ana oda ve bir aralık mekânından oluşmaktadır.



Resim 1. Çallı köy odasına ait iç ve dış mekân görselleri

Araştırma, belgeleme, modelleme ve simülasyon analizi olmak üzere üç aşamada yürütülmüştür. Belgeleme aşamasında, yerinde yapılan ölçümler, fotoğraflama, rölöve çizimleri ve kullanıcı görüşmeleriyle yapının mimari özellikleri kaydedilmiştir. Modelleme aşamasında, yapının geometrik ve termofiziksel verileri DesignBuilder v7.0.2 yazılımına aktarılmıştır (DesignBuilder Software Ltd., 2023). Yapının kullanım şekli dikkate alınarak iç ortam konfor koşulları belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında enerji performansını değerlendirmek üzere iki senaryo oluşturulmuştur:

İlk senaryoda mevcut durumun analizi yapılmıştır. Yapının özgün malzeme özellikleri, duvar kesiti, pencere tipleri ve mevcut çatı yapısı dikkate alınarak model oluşturulmuştur. Herhangi bir enerji iyileştirmesi yapılmamıştır. İkinci senaryoda ise enerji verimli iyileştirme çalışması yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda, Historic England tarafından geliştirilen Energy Efficiency and Historic Buildings rehberindeki müdahale ölçeği temel alınmıştır. Bu kapsamda:

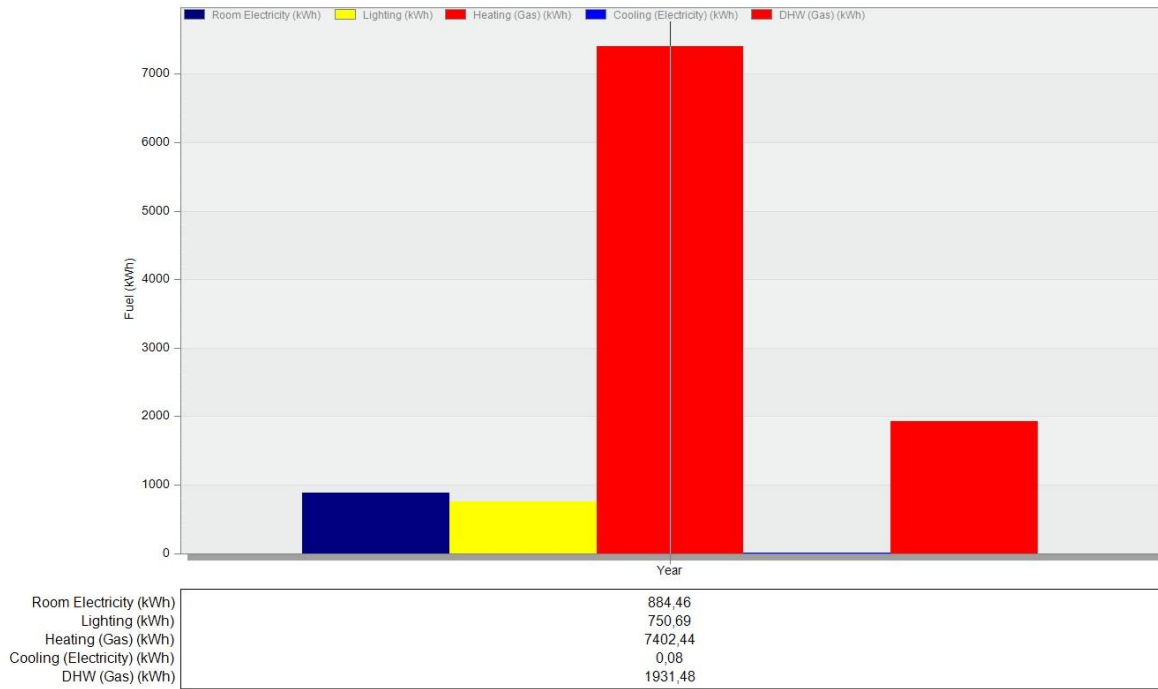
- Duvarlarda içten ek yalıtım (düşük yoğunluklu mineral yün) uygulanmıştır.
- Çatı örtüsünde yalıtım tabakası ısı köprüleri dikkate alınarak uygulanmıştır.
- Pencereelerde ahşap doğramalı ikincil cam uygulaması önerilmiştir.
- Hava sızdırmazlığı güçlendirilmiş, iç mekânda doğal havalandırma stratejisi korunmuştur.
- Çatıya fotovoltaik (PV) panel yerleştirilmiştir.

Bu müdahaleler, Historic England (2022) ilkelerinde belirtildiği üzere, yapının özgünlüğünü koruyacak şekilde “geri döndürülebilir ve düşük riskli” sistemlerden seçilmiştir.

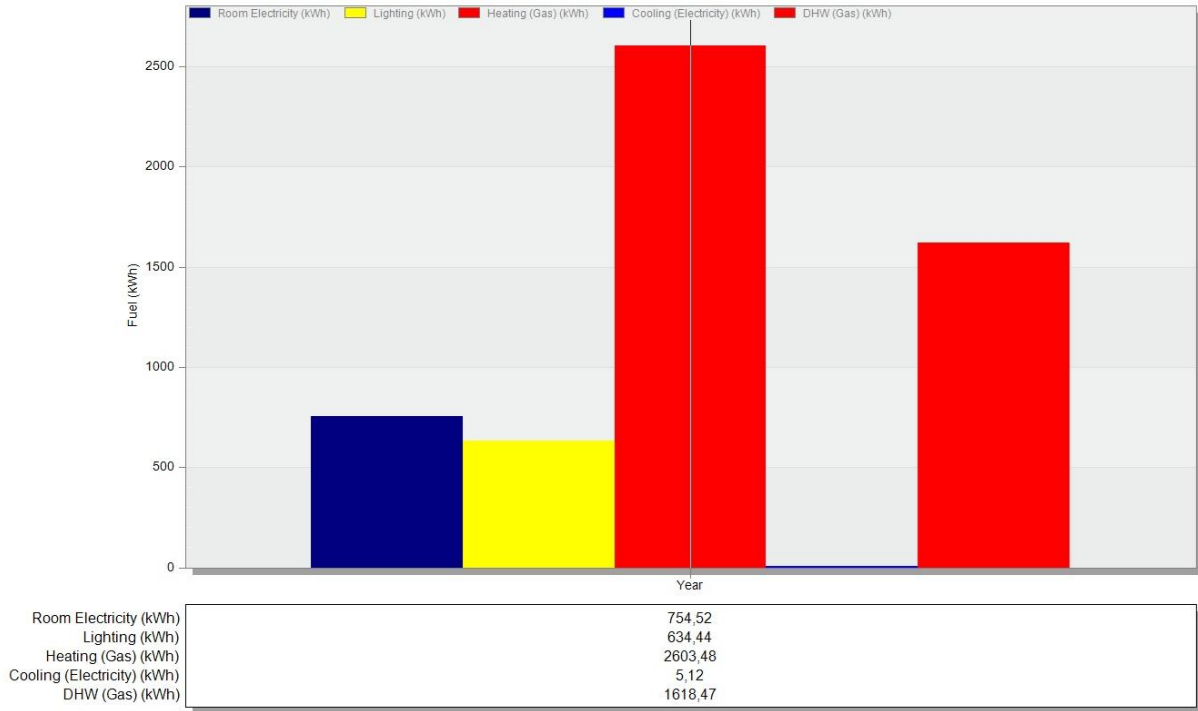
Simülasyonlarda yapı kabuğu bileşenleri için kullanılan ısı geçirgenlik katsayıları (U-değerleri) TS 825 (2024) sınır değerleriyle uyumlu olarak tanımlanmıştır. Her iki senaryo, birim alan başına düşen yıllık toplam enerji tüketimi (kWh/m²·yıl) ve ısıtma yükleri (kWh) açısından karşılaştırılmıştır. Simülasyon çıktıları grafik ve tablo formatında analiz edilerek enerji verimliliği farkı nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntem, Historic England (2022) ve ICOMOS (2019) ilkeleriyle uyumlu olarak, enerji performans analizini kültürel miras koruma bağlamında ele alan nitel-nicel bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Bulgular ve Tartışma

Tarihî yapıların enerji verimliliği bağlamında iyileştirilmesi, teknik çözümler kadar koruma etiği açısından da dikkat gerektiren bir konudur. ICOMOS (2019) ilkelerinde vurgulandığı üzere, tarihî yapılarda uygulanacak enerji iyileştirmeleri “minimum müdahale” ve “geri döndürülebilirlik” ilkelerine dayanmalıdır.



Şekil 1. Çallı köy odası mevcut durum enerji analiz verileri (DesignBuilder Software Ltd., 2023)



Şekil 2. Çallı köy odası enerji verimli iyileştirme sonrası analiz verileri (DesignBuilder Software Ltd., 2023)

Çalışma kapsamında oluşturulan mevcut durum ve enerji verimli iyileştirme senaryolarının analiz sonuçlarına göre yapının mevcut durumda yıllık toplam enerji tüketimi 10.969,15 kWh olarak belirlenmiştir. Önerilen enerji verimli iyileştirmeler uygulandığında bu değer 5.616,03 kWh seviyesine düşmüş; bu da %48,80 oranında enerji tasarrufu anlamına gelmektedir.

Yıllık ısıtma yükü 7.402,44 kWh'tan 2.603,48 kWh'a gerilemiş, %64,83'lük bir düşüş sağlanmıştır. Soğutma yüklerinde ise yaklaşık %22'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yapının dış kabuğunda yapılan yalıtım iyileştirmelerinin, iç mekân sıcaklık dengesini koruma ve enerji kayıplarını azaltma açısından etkili olduğunu göstermektedir.

Yapıya entegre edilen 24 m²'lik fotovoltaik (PV) panel sistemi yıllık 5.699,40 kWh elektrik üretimi sağlamıştır. Böylece yapının toplam enerji ihtiyacı yenilenebilir kaynaklardan karşılanmıştır. Bu durum, yapının net sıfır enerjili bina (NSEB) standardına ulaşabileceğini göstermektedir (European Commission, 2010).

Analiz sonuçları, Historic England (2022) tarafından önerilen düşük riskli müdahalelerin, yapı özgünlüğünü koruyarak enerji performansını ciddi oranda artırdığını ortaya koymaktadır. Özellikle taş duvar sistemine eklenen içten yalıtım tabakası, ısı kaybını azaltmış; pencere doğramalarının iyileştirilmesi ve hava sızdırmazlığının artırılmasıyla birlikte yapı kabuğunun genel ısıl direnci yükselmiştir. Bununla birlikte, yapının bulunduğu çok soğuk iklim bölgesinde (5. derece gün bölgesi) çatı izolasyonunun enerji dengesine katkısının yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, iç mekân konfor sıcaklıklarının yıl boyunca daha stabil olduğu, bu durumun kullanıcı konforu açısından da olumlu sonuçlar doğurduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çatıya entegre edilen PV panellerin taşıyıcı sistemden bağımsız olarak monte edilmesi, sökülebilirlik ilkesine uygun bir çözüm sunmuştur. Bu yaklaşım, uluslararası koruma ilkeleriyle enerji verimliliği hedefleri arasında denge kuran bir uygulama örneği olarak değerlendirilebilir.

Elde edilen bulgular, kırsal mimari miras yapılarının yalnızca estetik veya tarihsel değerleriyle değil, aynı zamanda iklimsel uyum potansiyelleriyle de sürdürülebilir enerji politikalarına katkı sağlayabileceğini göstermektedir (ICOMOS, 2019). Bu tür çalışmalar, yerel malzeme bilgisinin

çağdaş teknolojilerle buluşturulması yoluyla “enerji bilinçli koruma” (energy-conscious conservation) anlayışına katkı sağlamaktadır (Historic England, 2022).

Tablo 1. Mevcut durum ve enerji verimli iyileştirme senaryosu enerji tüketim verileri karşılaştırması

Parametreler	Mevcut durum	Enerji verimli iyileştirme
Yıllık toplam enerji tüketimi	10969,15 kWh	5616,03 kWh
Toplam alan başına elektrik tüketimi	144,33 kWh/m ²	73,89 kWh/m ²
Yıllık toplam ısıtma yükü	7402,44 kWh	2603,48 kWh
Toplam alan başına ısıtma yükü	97,40 kWh/m ²	34,26 kWh/m ²
Isıtma yükünün toplam enerji tüketimine oranı	%67,48	%46,36
Yıllık toplam enerji üretimi		5699,40 kWh
Enerji üretimi sonrası yıllık toplam enerji ihtiyacı	-	-83,37 kWh
Enerji üretimi sonrası toplam alan başına enerji ihtiyacı	-	-1,10 kWh/m ²

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Sivas ili Çallı Köyü’nde yer alan köy odası üzerinden yürütülen enerji simülasyonu sonuçlarına dayanarak, geleneksel kırsal mimari miras yapılarının sıfır enerjili bina (SEB) standartlarına ulaşılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmanın temel amacı, Historic England (2022) tarafından belirlenen enerji verimliliği müdahale ilkelerini, yerel koşullar ve TS 825 (2024) standartları doğrultusunda yeniden yorumlayarak Türkiye’deki kırsal yapı stoğuna uyarlanabilir bir model önermektir.

Simülasyon bulguları, köy odasının mevcut durumda yüksek enerji kayıplarına sahip olduğunu, özellikle duvar ve çatı bileşenlerinde önemli ısıl iyileştirme potansiyelleri bulunduğunu ortaya koymuştur. Uygulanan enerji verimli iyileştirme senaryosu sonucunda:

- Yıllık toplam enerji tüketiminde %48,8 oranında azalma,
- Isıtma yüklerinde %64,8 oranında düşüş,
- PV panel entegrasyonu ile yıllık 5.699,40 kWh yenilenebilir enerji üretimi sağlanmış,
- Yapının toplam enerji ihtiyacı yenilenebilir kaynaklardan karşılanarak net sıfır enerji dengesi elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, geleneksel taş yığma yapılarda doğru yalıtım, hava sızdırmazlık ve yenilenebilir enerji entegrasyonu ile teknik olarak NSEB standardına ulaşılabilirliğini göstermektedir (European Commission, 2010). Ayrıca, önerilen müdahalelerin yapının tarihî özgünlüğüne zarar vermeden gerçekleştirilebilir olduğu belirlenmiştir. Özellikle içten yalıtım, sökülebilir PV sistemler ve geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı, ICOMOS (2019) ve Historic England (2022) ilkeleriyle tam uyum göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, kültürel mirasın korunması ile enerji verimliliği hedeflerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınabileceğini kanıtlamaktadır.

Araştırma, kırsal mimari miras yapılarının enerji verimliliği bağlamında yeniden ele alınmasına yönelik disiplinler arası bir metodoloji geliştirmiştir. Enerji simülasyonu, yapı fiziği, koruma kuramı ve sürdürülebilirlik ilkeleri birlikte değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Historic England (2022) yaklaşımının Anadolu kırsal mimarisi için uyarlanabilir olduğunu göstermekte; ulusal standartlarla

uluslararası koruma politikaları arasında uyumlaştırıcı bir köprü önermektedir. Böylelikle, bu modelin gelecekte “enerji etkin restorasyon” uygulamaları için referans teşkil edebileceği öngörülmektedir.

Türkiye’de kültürel miras niteliğindeki yapıların enerji performansına ilişkin değerlendirmelerin koruma projelerinin ayrılmaz bir parçası haline getirilmesi gerekmektedir. TS 825 standardı, tarihî yapıların özgün koşullarını dikkate alacak biçimde esnek uygulama kılavuzlarıyla güncellenmeli; böylece ulusal standartlar, uluslararası koruma ilkeleriyle uyumlu hale getirilmelidir. Ayrıca, Kültür ve Turizm Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın iş birliğiyle, enerji verimliliği ve miras korumasını bütünleştiren kapsamlı bir “Enerji Verimli Miras Yapılar” stratejisinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Farklı iklim bölgelerinde yer alan geleneksel yapı tiplerinin enerji performanslarının karşılaştırmalı biçimde incelendiği yeni saha araştırmalarının yapılması, Türkiye’nin kırsal yapı stoğuna yönelik sürdürülebilir koruma politikalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Üniversitelerde mimarlık, enerji mühendisliği ve koruma disiplinlerinin ortak yürüttüğü araştırma laboratuvarlarının kurulması; bu tür yapıların hem enerji modelleme hem de yaşam döngüsü analizlerinin yapılabilmesine olanak tanıyacaktır.

Sonuç olarak, Çallı Köy Odası örneği, kırsal mimari miras yapılarında enerji verimliliği hedefleriyle koruma ilkelerinin bir arada uygulanabileceğini kanıtlayan somut bir örnek niteliği taşımaktadır. Geleneksel yapıların yalnızca geçmişin tanıkları değil, aynı zamanda geleceğin sürdürülebilir enerji politikalarına entegre edilebilecek yaşayan miras unsurları olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, çalışma hem teknik hem de kültürel açıdan sürdürülebilir koruma anlayışına katkı sağlamakta ve gelecekteki araştırmalar için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynaklar

Bulut, M. (2017). *Sivas İlbeyli Köyü odaları*. Marmara Türkiyat Araştırmaları Dergisi,4,13-31.

DesignBuilder Software Ltd. (2023). *DesignBuilder user manual* (Version 7.0). Stroud, United Kingdom: DesignBuilder Software Ltd.

European Commission. (2010). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*. Brussels: Official Journal of the European Union.

Historic England. (2022). *Energy efficiency and historic buildings: How to improve energy efficiency*. London: Historic England. <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency>

ICOMOS. (2019). *Principles for the conservation of built heritage*. Paris: International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). <https://www.icomos.org>

Türk Standartları Enstitüsü. (2024). *TS 825: Binalarda ısı yalıtımı kuralları*. Ankara: TSE Yayınları.

Tuztaşı, U. (2004). *Sivas Çallı köyü geleneksel kerpiç konutları*. ICOMOS Türkiye Milli Komitesi, Uluslararası Anıtlar ve Sitler Günü Konferansı Bildiriler Kitabı (pp. 1–12). İstanbul: ICOMOS Türkiye.



T.C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi
Müdürlüğü



Sayı : E-53536373-100-594223
Konu : Eğitim - Öğretim İşleri Genel()

REKTÖRLÜK MAKAMINA

Yenilenebilir Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından 7 Ekim 2025 tarihleri arasında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi adına, <https://www.iksadkongre.com/energy> adresine bilgileri verilen, 100. Yıl Kültür Merkezi ve online olarak hibrit düzenlenecek olan "4. Uluslararası Enerji Kongresi" düzenleme kuruluna aşağıda unvan ve isimleri yazılı olan öğretim elemanlarının üniversite akademisyen temsilcisi olarak görevlendirilmeleri hususunu;

Olurlarınıza arz ederim.

Congress Local Committee Chair

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY, Dean of Engineering Faculty, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye

Congress Organizing Committee

Assist. Prof. Dr. Derya Betül ÜNSAL ÇELİMLİ, Director of Renewable Energy Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye-Düzenleme Kurulu Başkanı

Prof. Dr. Sultan ERKAN, Vice Director of Renewable Energy Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye-Düzenleme Kurulu Üyesi

Prof. Dr. Serkan AKKOYUN, Vice Director of Artificial Intelligence and Data Science Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye-Düzenleme Kurulu Üyesi

Prof. Dr. Hülya DOĞAN, Head of Electrical and Electronics Engineering Department, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye-Düzenleme Kurulu Üyesi

Assoc. Prof. Dr. Ahmet Gürkan YÜKSEK, Head of Artificial Intelligence and Data Science Research Center, Sivas Cumhuriyet University, Türkiye-Düzenleme Kurulu Üyesi

Dr. Atabek MOVLYANOV - İksad Genel Koordinatörü, Türkiye-Düzenleme Kurulu Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Derya Betül ÜNSAL ÇELİMLİ
Müdür

Prof. Dr. Salih Cem İNAN
Rektör Yardımcısı

Ek:7 OCTOBER 2025 (3 Sayfa)

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Belge Doğrulama Kodu :BSU0HFH3M3 Pin Kodu :09152

Belge Takip Adresi : <https://www.turkiye.gov.tr/cumhuriyet-universitesi-ebys>

Adres : Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Uygulama ve
Araştırma Merkezi Müdürlüğü Sivas
Telefon:0 346 219 1010 Faks:0 346 219 1110
e-Posta:ryaziisl@cumhuriyet.edu.tr Web:www.cumhuriyet.edu.tr
Kep Adresi:cumhuriyetuniversitesi@hs01.kep.tr

Bilgi için: Derya Betül ÜNSAL
ÇELİMLİ
Unvanı: Müdür

