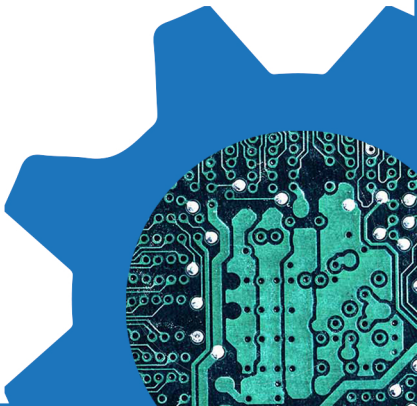


GAZI
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EDİTÖR / EDITOR - IN - CHIEF

İsmail ŞAHİN

Gazi University, Ankara, Turkey

e-mail: editorgjes@gmail.com

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Harun GÖKÇE

Gazi University

e-mail: harungokce@yahoo.ca**Murat DÖRTERLER**

Gazi University

e-mail: dorterler@gazi.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Abdullah AKDOĞAN

Pamukkale University

Adem TEKEREK

Gazi University

Alper BÜYÜKKARAGÖZ

Gazi University

Amin MIRZAPOUR

Zanjan Islami Azad University

Ayhan AYTAÇ

National Defense University

Bülent ÖZKAN

Gazi University

Erdem CÜCE

Recep Tayyip Erdoğan University

Fecir DURAN

Gazi University

Fatih ŞAHİN

Gazi University

G. Serdar TOMBUL

ASELSAN

Halil KARAKOÇ

Hacettepe University

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University

M. Hanefi CALP

Ankara Hacı Bayram Veli University

Mustafa BOZ

Karabük University

Mustafa GÜNAY

Karabük University

Neslihan TOP

Gazi University

Serhat KARAP

TUBİTAK-SAGE

Tayfun MENLİK

Gazi University

Umit ATİLA

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Adnan SÖZEN

Gazi University, Turkey

Andrew PINKERTON

Lancaster University, England

Bekir Sami YILBAŞ

King Fahd University, Sudia Arabia

Farzollah MIRZAPOUR

University of Zanjan, Iran

Majid MEGHDADI

University of Zanjan, Iran

Mustafa KURT

Gazi University, Turkey

Nowruz ALLAHVERDİ

Karatay University, Turkey

Reza Negarastani

RIETEX, England

GAZİ**JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES****Herbert M. REYNOLDS**

Michigan State University, USA

Jamal KHATIB

University of Wolverhampton, England

John KINUTHIA

University of South Wales, England

Jonathan C. BORG

University of Malta, Malta

Hossam KISHAWY

University of Ontario Technology, Canada

H. Kürşad SEZER

Gazi University, Turkey

Salman NISAR

National University of Sci. and Tech., Pakistan

Shahin JALILI

Tebriz University, Iran

Şakir TAŞDEMİR

Selçuk University, Turkey

Tahsin Tecelli ÖPÖZ

John Moores University, England

Yasir JOYA

GIK Institute, Pakistan

DİL EDİTORLERİ / LANGUAGE EDITORS**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi University)**TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR****Neslihan TOP**

Gazi University

Nurullah YÜKSEL

Gazi University

e-mail: editorgjes@gmail.com**MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR****Mert Efe CEYLAN**

Gazi University

editorgjes@gmail.com**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Ahmet Emre Dinçer

Ahmet Serdar Güldibi

Ata Hunlar

Burçin Atılğan Türkmen

Cem Gök

Efendi Nasiboğlu

Emine Uçar

Emrah Yılmaz

Fatih Emre Boran

Gökhan Kaplan

Gözde Altuntaş

Gürcan Çetin

Hacer Akhan

Kamil Şirin

Kemal Adem

Kemal Aydın

Mehmet Ali Biberici

Muhammed Yusuf Onay

Murat Uçar

Mustafa Teke

Mustafa Bozdemir

Mustafa Aktaş

Mustafa Yeniad

Onur Altuntaş

Oğulcan Eren

Ramazan Dalmış

Rukiye Karakış

Semih Özden

Serkan Subaşı

Seyfi Şevik

Uğur Caligulu

Veysel Alcan ü

Yusuf Ayan

Çağrı Suiçmez



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Mehmet Kenan Döşođlu
Muhammed Elitaş

İsmail Serkan Üncü

Gazi Journal of Engineering Sciences has been published three issues per year

CORRESPONDENCE ADDRESS :

Gazi Akademik Yayıncılık
Mustafa Kemal Mah. 2118 Cad. No:4C/140 Çankaya/Ankara
e-mail: editorgjes@gmail.com

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Mekanik Bulaşık Yıkama Direncinin ve Hava Şartlarının Kimyasal Olarak Güçlendirilmiş Kristal Camlar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi
Investigation of the Effects of Mechanical Washing Resistance and Weather Conditions on Chemically Strengthened Crystal Glasses
Nurçin Özkaya, Muath Njjar, Ezgi Bicer, Nahide Ozben, Abdullah Akdoğan.....193-205
- Gölgeleme etkisi altında fotovoltaik ve fotovoltaik/termal sistemlerin performans değerlendirilmesi
Performance assessment of photovoltaic and photovoltaic/thermal systems under the impact of shadowing
Erdem Cüce, Pınar Mert Cüce206-224
- Biyo-Esinlenme Tabanlı Yeni Bir Kemik Modeli Oluşturma Metodolojisi
Methodology for Creating a New Bio-Inspired Bone Model
Alkın Yılmaz Akter, Hüdayim Başak.....225-237
- Vinç Tambur-Halat Mekanizmalarında Çekme Kuvvetinin Sıyırılma İşlemi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi
Investigation of the Effects of Tensile Force on the Stripping Process in Crane Drum-Rope Mechanisms
Aydoğan Akça, Ece Karşlı, Engin Tekin, Hasan Öktem.....238-250
- Atık Lityum İyon Pillerden Kobalt Geri Kazanımı Üzerine Bir Değerlendirme
A Review on Cobalt Recovery from Waste Lithium Ion Batteries
Damla Nur Birlik, Aysun Özkan, Zerrin Günkaya, Müfide Banar.....251-263
- Sürdürülebilir Ahşap Plastik Kompozit Malzemeler: Hammaddeler, Yapısal Özellikler, Üretim Süreçleri ve Güncel Eğilimler
Sustainable Wood Plastic Composite Materials: Raw Materials, Structural Properties, Production Processes and Current Trends
Gözde Çolak Bayram, Gamzenur Özsin, Burçin Atılğan Türkmen.....264-280
- Sıvı Lateks Kullanılarak Üretilen Köpük Betonun Özelliklerinin Araştırılması
Investigation of the Properties of Foam Concrete Produced Using Liquid Latex
Murat Gökçe, Kenan Toklu281-292
- Box-Jenkins Yöntemi, Gri Tahminleme ve Yapay Sinir Ağları ile Kayseri İli Doğal Gaz Tüketim Tahmini
Natural Gas Consumption Forecast in Kayseri with Box-Jenkins Methods, Grey Forecasting and Artificial Neural Networks
Betül Yılmaz, Sinem Kulluk.....293-313
- Tarımsal Faaliyetlere Yönelik Arduino Yazılımı ile Otomatik PV ve Akü ile Beslenen Su Sulama Sisteminin Geliştirilmesi
Development of an Automatic PV-Battery Powered Water Irrigation System with Arduino Software for Agricultural Activities
Theodore Azemtsop Manfo, Mustafa Ergin Şahin.....314-328
- Rüzgar Enerjisi Olasılık Yoğunluk Dağılımı Fonksiyonları Parametrelerinin Meta-Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak Tahmini
Estimation of Wind Power Probability Density Distribution Functions Parameters By Using Meta-Heuristic Algorithms

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Tuğba Akman, Hasan Hüseyin Sayan, Yusuf Söyletmez	329-346
Nikel Parçacık Takviyeli AA5083 Matrisli Metal-Metal Kompozitlerinin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması <i>Production and Investigation of Properties of Nickel Particle Reinforced AA5083 Matrix Metal-Metal Composites</i>	
Serdar Özkaya	347-354
Endüstriyel Sıvı Seviye Sisteminin Bulanık Geri Adımlı Kontrolü <i>Fuzzy Backstepping Control of Industrial Liquid Level System</i>	
Nursel Sahina, Meral Ozarslan Yatak	355-367
Malzeme Analizinde Geleneksel Evler; Düzce, Konuralp Örneği <i>Traditional Houses in Materials Analysis; Konuralp, Düzce Example</i>	
Büşra Sabuncu, Özlem Sallı Bideci	368-379
Yapay Zekâ Esaslı Modellenen Doğrusal Akımlı Bir Elektrik Motorunun Kararlılık Bakımından Değerlendirilmesi <i>Evaluation of a Direct Current Electric Motor Modelled Based on the Artificial Intelligence in the Sense of Stability</i>	
Ege Cömert, Salih Karaaslan, Bülent Özkan	380-390
Biyomimetik Tabanlı Toprak Altı Kazma Robotu Tasarımı <i>Biomimetic Based Underground Digging Robot Design</i>	
Ceyda Doğu, Adnan Akkurt	391-404
Sedef Hastalığının Tanı ve Tahmininde Yapay Zekâ Destekli Yeni Bir Yaklaşım <i>A New Artificial Intelligence Supported Approach to Diagnosis and Prediction of Psoriasis</i>	
Mehmet Akif Bülbül	405-418
V2G Topolojisinde Enerji Yönetimi için Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü ve Tek Fazlı Şebeke Bağlantılı Evirici Tasarımı <i>Bidirectional DC-DC Converter and Single-Phase Grid-Connected Inverter Design for Energy Management in V2G Topology</i>	
Sadık Yıldız, Hasan Hüseyin Sayan	419-431
Yeni Nesil Dizileme Analizinde Hizalama Adımının GPU Başarımı <i>GPU Performance of Alignment Step in Next Generation Sequencing Analysis</i>	
Hilal Akarkamçı, Gülistan Özdemir Özdoğan	432-442

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Effects of Mechanical Washing Resistance and Weather Conditions on Chemically Strengthened Crystal Glasses

Nurçin Özkaya^a, Muath Njjar^b, Ezgi Bicer^c, Nahide Ozben^{*d}, Abdullah Akdogan^{*e}

Submitted: 06.12.2023 Revised: 05.05.2024 Accepted: 09.05.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A01

ABSTRACT

The chemical tempering method is a versatile process applicable to glass of various sizes, complex shapes, and thin structures (up to 0.5 mm). Evaluating chemical strengthening methods under different weather conditions is crucial for developing durable glassware. This study examines the impact of mechanical washing resistance and weather conditions on untreated and chemically tempered glass through experimental analysis. Tempered samples exhibit an average Compressive Stress (CS) of 413 MPa (± 8 MPa), a Layer Depth (DOL) averaging 20 μm (± 2 μm), and Central Stress (CT) averaging 9 MPa (± 0.6 MPa). Despite this, Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) images show no visible impact on surface morphology post-tempering. Nevertheless, EDS spectra indicate an increased potassium ratio, confirming successful chemical tempering. The hardness of chemically tempered glass is 6.16 GPa (± 0.18), significantly higher than untempered glass at 5.53 GPa (± 0.12). In the Free Fall Test, untempered glass drops an average of 16 cm, while tempered glass surpasses 28 cm without breaking. During the Bending Test, untempered glass bends 6 degrees on average, whereas tempered glass exceeds 13 degrees without breaking. Chemically tempered glass resists hydrolysis well and shows no significant difference in dishwasher resistance, but it excels in breakage resistance under test conditions.

Mekanik Bulaşık Yıkama Direncinin ve Hava Şartlarının Kimyasal Olarak Güçlendirilmiş Kristal Camlar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

ÖZ

Kimyasal temperleme yöntemi, çeşitli boyutlarda, karmaşık şekillerde ve ince yapılarıdaki (0,5 mm'ye kadar) camlara uygulanabilen çok yönlü bir işlemdir. Farklı hava koşullarında kimyasal güçlendirme yöntemleri, dayanıklı cam eşya geliştirmek için çok önemlidir. Bu çalışma, mekanik yıkama direnci ve hava koşullarının işlenmemiş ve kimyasal olarak temperlenmiş cam üzerindeki etkisini deneysel analiz yoluyla incelemektedir. Temperlenmiş numuneler ortalama 413 MPa (± 8 MPa) Basınç Gerilimi (CS), ortalama 20 μm (± 2 μm) Katman Derinliği (DOL) ve ortalama 9 MPa ($\pm 0,6$ MPa) Merkezi Gerilim (CT) sergiler. Buna rağmen Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) görüntüleri yüzey morfolojisi sonradan temperleme üzerinde gözle görülür bir etki göstermemektedir. Bununla birlikte, EDS spektrumları, başarılı kimyasal tavlamaı doğrulayan artan bir potasyum oranına işaret etmektedir. Kimyasal olarak temperlenmiş camın sertliği 6,16 GPa ($\pm 0,18$) olup, 5,53 GPa ($\pm 0,12$) ile temperlenmemiş camdan önemli ölçüde daha yüksektir. Serbest Düşme Testinde temperlenmemiş cam ortalama 16 cm düşerken, temperli cam 28 cm'yi kırılmadan aşar. Eğilme Testi sırasında temperlenmemiş cam ortalama 6 derece bükülürken, temperli cam kırılmadan 13 dereceyi aşar. Kimyasal olarak temperlenmiş cam, hidrolize karşı iyi direnç gösterir ve bulaşık makinesinde önemli bir fark göstermez, ancak test koşullarında kırılma direncinde üstünlük sağlar.

Keywords: Chemically tempered glass, Dishwasher Resistance, Weather conditions

^a Türkiye Sise ve Cam Fabrikaları,
34947 - İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4593-9604

^b Pamukkale University,
Engineering Faculty,
Dept. of Chemical Engineering
20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5979-4197

^c Sisecam Science,
41420 - Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0009-0005-2578-8564

^{d*} Sisecam Science,
41420 - Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0009-0005-5214-8220

^{e*} Pamukkale University,
Engineering Faculty,
Dept. of Chemical Engineering
20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7120-4380

*Corresponding author:
nozben@sisecam.com
akdogan@pau.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Kimyasal temperli cam, Bulaşık Makinesinde Yıkabilme Dayanımı, Hava Şartları

1. Introduction

Commonly perceived as a solid substance, glass actually exhibits a distinct nature as an amorphous material formed through rapid cooling with high viscosity, preventing crystallization. Essentially, it is a semi-ordered substance, lacking the repeating and organized patterns found in crystalline materials [1]. The American International Society for Testing and Materials (ASTM) provides a widely accepted definition of glass: "an inorganic product of fusion that has cooled to a rigid condition without crystallizing; a noncrystalline solid or an amorphous solid." This definition emphasizes the non-crystalline nature of glass [2].

Glass, a material with a rich history dating back thousands of years, has evolved significantly in its composition and applications. Glass has found many applications over the years and has gained a place in the construction industry, architecture, defense industry, household goods, and many other fields. Its wide usage area has led to the production and use of glass with new techniques [3-5]. Glass generally exhibits high mechanical strength and chemical resilience. However, its tensile strength is relatively low, a characteristic that can be attributed to the presence of surface defects known as cracks. These cracks significantly impact the overall mechanical properties of glass, affecting its strength and durability [6]. This vulnerability is especially noticeable when exposed to water vapor and temperature variations, leading to atmospheric corrosion known as "weathering" or "warehouse effect." Consequently, these surface changes exacerbate the impact of cracks, collectively shaping the material's overall resilience and long-term performance. In conditions of high humidity, there is a gradual expansion of cracks over time. This mechanicochemical process negatively impacts the mechanical and optical characteristics of glass, influencing properties such as fracture strength [7], surface roughness [8], and transmittance [9].

The primary corrosion processes can occur when silica-based glasses are exposed to an aqueous environment, ion exchange reaction takes place between the modifier ions of the glass network and hydrous species of water. This mechanism is commonly referred to as leaching [10]. The rate-determining step in leaching reactions can be described as follows;



where M represents the alkali ions present in the silicate glass network. This reaction illustrates the primary corrosion mechanism involving the ion exchange process between metal ions within the glass and H⁺ ions from the aqueous solution. The interaction of hydrogen with oxygen may result in condensation, and the subsequent evaporation of water can trigger cracking on the surface of the glass [8]. The rate at which these cracks expand is affected by several factors, such as humidity [10], temperature, applied stress, time, and the composition of the glass [11].

Glass often undergoes repeated exposure to humidity and various weather conditions throughout its lifespan. An illustrative example is the dishwashing process. Through the long-term dishwashing process, the glass interacts with water and detergents at elevated temperatures and for extended durations compared to manual handwashing. This exposure can lead to irreversible surface degradation, such as white clouding, iridescence, and other optical alterations on the glass surface. Numerous research papers have extensively investigated the damage to glass surfaces caused by different dishwashing detergents, varying washing temperatures, and distinct water hardness levels [12,13].

Therefore, enhancing the strength of glass is crucial, and various methods for glass strengthening have been extensively developed in recent decades. These methods include thermal tempering [14], chemical strengthening [15-17], and surface crystallization [18].

There is a growing interest in chemical tempering, also known as ion exchange or chemical strengthening, due to its excellent mechanical properties [19].

Chemical strengthening is achieved essentially by replacing smaller ions in the glass surface with larger ions. without measurable optical distortion, making it the leading candidate for enhancing glass strength [20]. The chemical tempering method is versatile and can be easily applied to glass sections

of different sizes, complex shapes, and very thin structures (up to 0.5 mm). It has advantages over other forms of glass strengthening, such as thermal tempering, as it can produce thinner and lighter glass with similar or better strength characteristics [21].

In the chemical tempering process, ion exchange occurs between alkaline ions present in the glass structure and ions in a molten salt bath that is in contact with the glass surface. The smaller radius ions in the glass structure are replaced by larger ions from the molten salt, causing local strain. This, in turn, creates compressive stress on the glass surface. The compressive pressure resulting from the ion exchange strengthens the glass, making it stronger and more resistant to mechanical and thermal stress compared to untempered glass.

By evaluating the effectiveness of chemical strengthening methods for glass in real-world scenarios, more durable glassware that can withstand harsh environments for extended periods can be developed. Therefore, this study investigates the impact of mechanical dishwasher resistance and weather conditions on untempered and chemically tempered glass through experimental analysis. It measures the compressive stress level and stress layer depth, analyzes surface characteristics and composition, measures hardness, determines main oxide and trace element content as well as heavy metal content, and evaluates impact resistance, free fall resistance, and bending resistance of the glass products.

2. Materials and Strengthening Process

The molten salt used was pure KNO_3 (purity > 99.9%). The glass surfaces were carefully cleaned with pure deionized water. The FSM-6000LE from Lueco, Japan, was utilized to determine compressive stress levels and analyze the depth of the stress layer. Surface characteristics and composition analysis were conducted using a Zeiss Supra 40 VP model Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with an Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) unit. To assess sample hardness, the Vickers hardness measurement methodology was applied using the Shimadzu Model-M Micro-rigidity, and the obtained hardness values were analyzed using the optical profiler Bruker Counter GT-K1. The principal oxide, trace element, and heavy metal content of the samples were analyzed through X-ray fluorescence (XRF) analysis.

The samples were placed within a containment basket to facilitate their introduction into the tempering process. Subsequently, subjecting the samples to a preliminary heating phase, exposing them to elevated temperatures. Compressive stress was induced on their surfaces when they were immersed in molten potassium nitrate salt during this preheating stage. After extraction from the salt bath, a meticulously controlled and gradual cooling process was applied, playing an important role in establishing the desired compressive stress within the crystalline structure. Thorough rinsing followed for the tempered samples, and their compliance with predetermined standards was evaluated. This systematic evaluation ensured the attainment of the targeted mechanical and chemical properties. Figure 1 illustrates a schematic of the chemical tempering process.

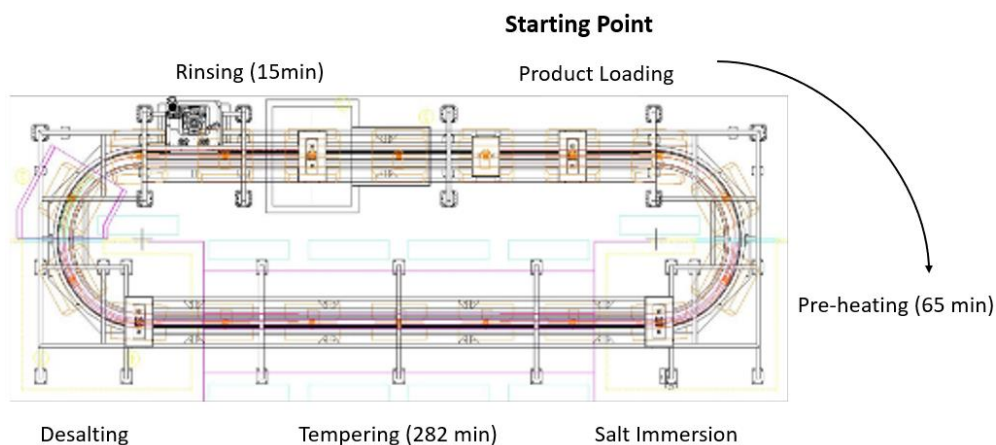


Figure 1. Chemical tempering line (Şişecam) (Patent No. 2018/01566).

3. Results and Discussion

3.1. FSM-6000LE analysis

The assessment of compressive stress (CS), layer depth (DOL), and central stress (CT) in two glass samples was conducted after chemical annealing. The average values were calculated based on five measurements for each glass sample, as shown in Table 1.

Table 1. Compressive stress, layer depth, and central stress values.

Measurement No:	Glass sample 1			Glass Sample 2		
	Compressive stress (MPa)	Depth of layer (μm)	Central Tension (MPa)	Compressive stress (MPa)	Depth of layer (μm)	Central Tension (MPa)
1	428	17	9	420	18	10
2	407	20	10	431	19	10
3	409	23	10	418	19	10
4	407	18	9	433	20	10
5	414	19	9	425	20	10
Average	413	20	9	425	19	10
Std. dev.	8	2	0,6	6	0,7	0,3

3.2. Surface morphology analysis

A thin conductive layer comprising 80% gold and 20% palladium was applied using the sputtering technique. Images were taken under a vacuum of 10^{-6} torr and with a 20 kV accelerating voltage.

Figure 2 shows SEM images of tempered and untempered glasses (both bulk and powder) taken at different magnifications. SEM images reveal that the tempering process does not visibly affect the surface morphology of the glass samples. The superficial nature of the tempering process suggests that changes in potassium and sodium did not impact the overall density of the glass.

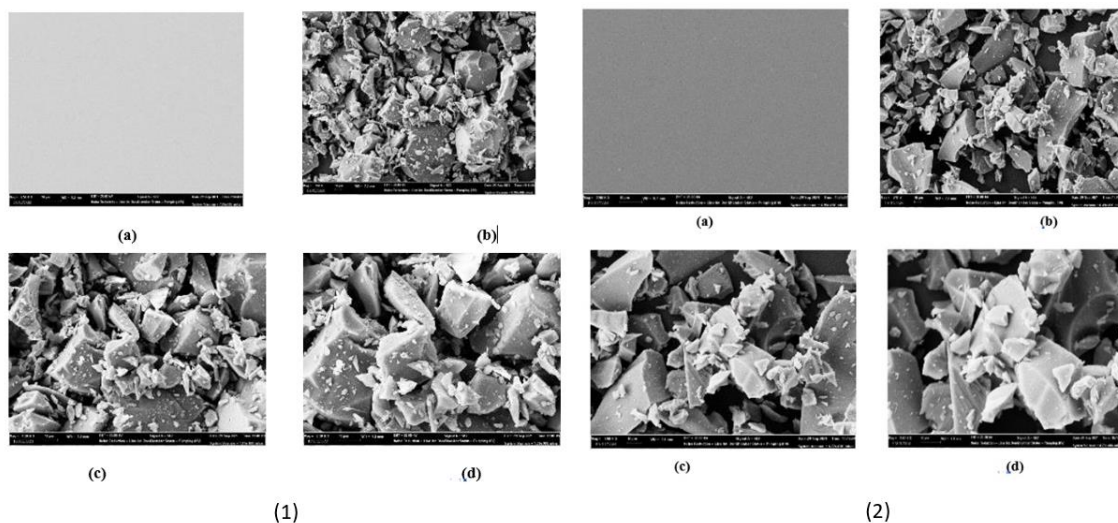


Figure 2. SEM images of tempered (1) and untempered (2) glasses (both bulk and powder) that were taken at different magnifications. a) bulk x2500 b) powder x750 c) powder x1500 and d) powder x2500.

Both untempered and tempered bulk glasses share the same matrix, yet there is a significant increase in the potassium ratio on the surface after tempering, as seen in Figure 3 and Figure 4. The tempering process is successful based on the analysis of surface morphology and composition. The differences observed in Figure 5 and Figure 6 in the potassium ratio between bulk and powder samples suggest that the tempering process is applied superficially.

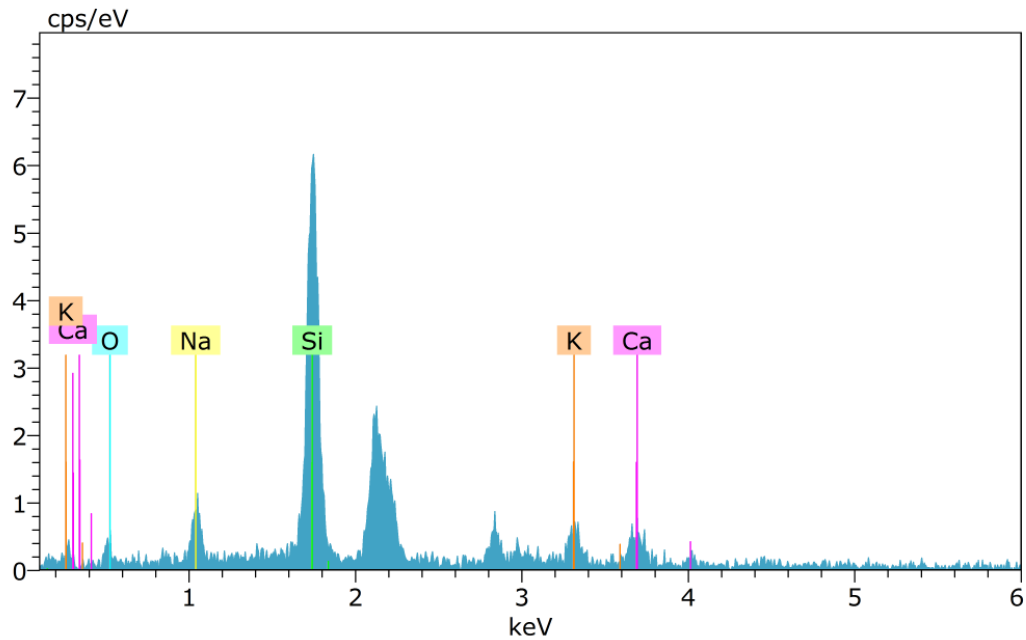


Figure 3. EDS Spectrum of untempered bulk material.

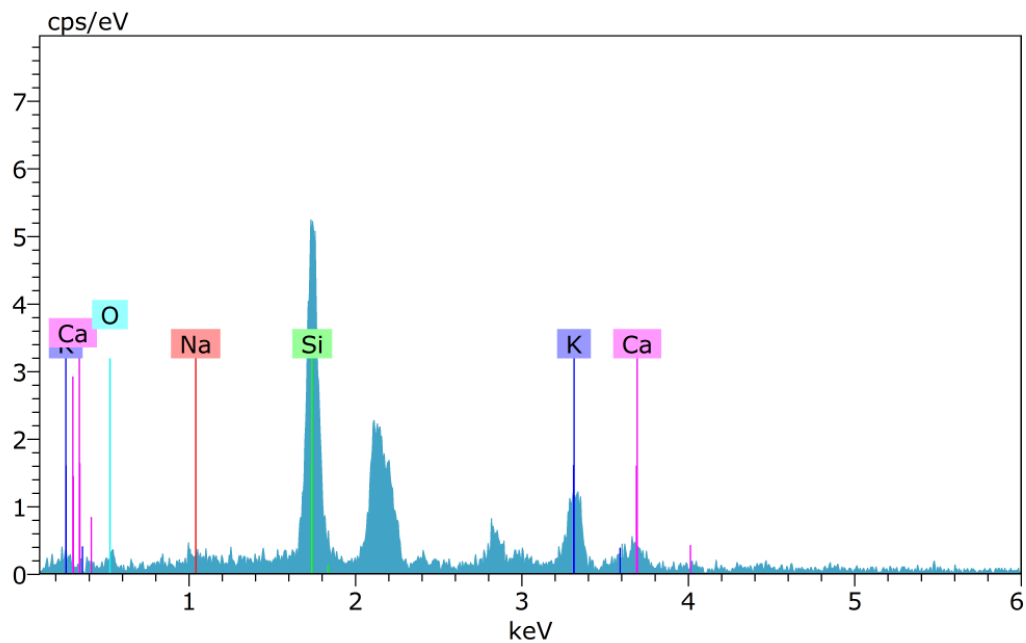


Figure 4. EDS Spectrum of tempered bulk material.

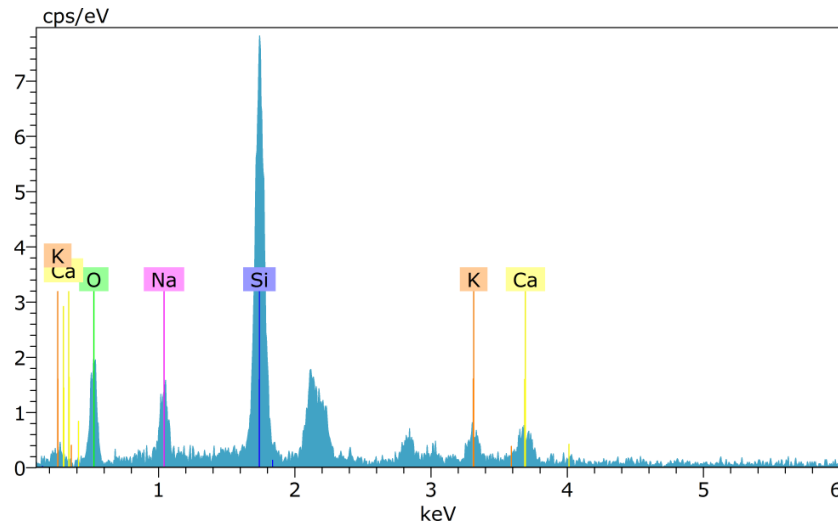


Figure 5. EDS Spectrum of untempered powder material.

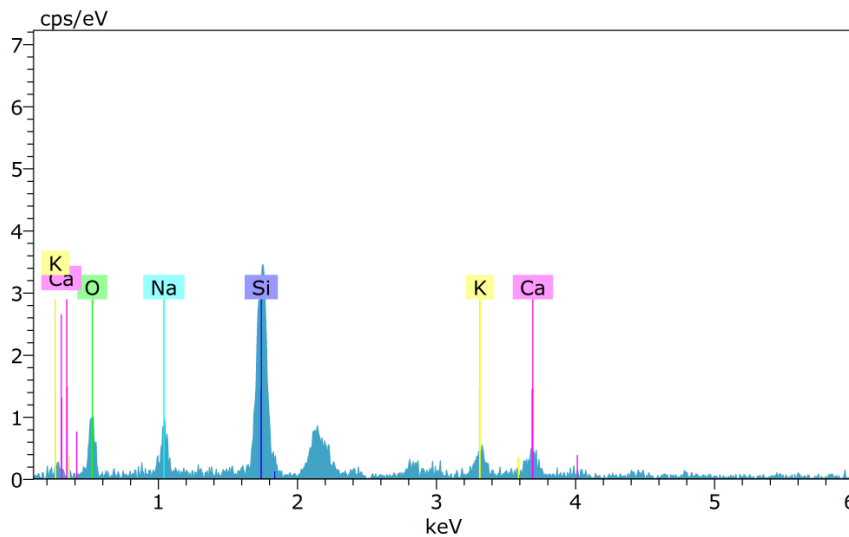


Figure 6. EDS Spectrum of tempered bulk material.

3.3. Hardness analysis

The Vickers hardness measurement method was employed to evaluate the hardness of both untempered and chemically tempered samples. The measurements were conducted using a constant loading rate, a dwell time of 15 seconds, and an applied force of 50 grams during the indentations. The image analysis software of the optical profiler (Bruker Counter GT-K1) was used to determine the hardness values in the measurements of the indentation diagonals Figure 7. An average value based on 10 indentations was calculated to represent the hardness of each sample.

The tests were carried out under controlled environmental conditions, maintaining a temperature of 23 ± 1 °C and a relative humidity of 50-60%. The chemically tempered glass exhibited a hardness of $6.16 \text{ GPa} \pm 0.18$, while the untempered glass showed a hardness of $5.53 \text{ GPa} \pm 0.12$, as shown in Table 2. These results indicate a significant increase in hardness for the chemically tempered glass compared to the original untempered glass.

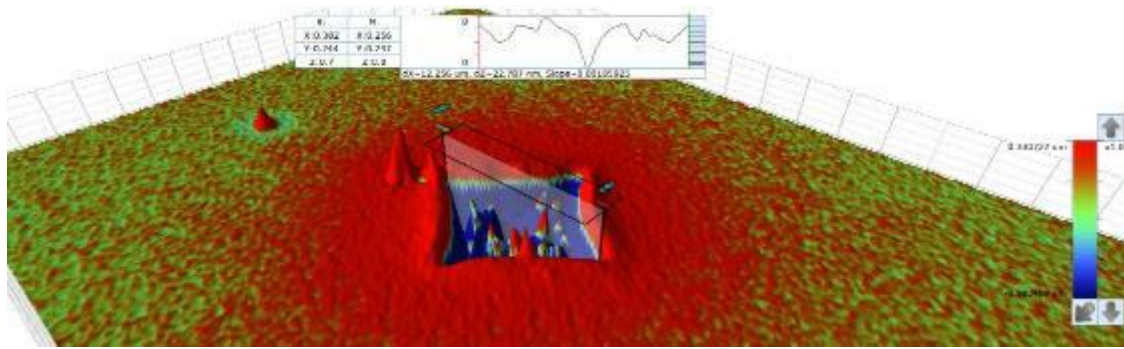


Figure 7. Measurements of recess diagonals using optical profiler.

Table 2. Vickers hardness of untempered original glass sample and chemically tempered glass sample.

Measurement No:	Unprocessed original glass (mm)	Chemical tempered glass (mm)
1	0,00891	0,00844
	0,00897	0,00873
2	0,00909	0,00854
	0,00917	0,00869
3	0,00885	0,00868
	0,00901	0,00864
4	0,00904	0,00871
	0,00922	0,00857
5	0,00915	0,00881
	0,00905	0,00851
6	0,00905	0,0087
	0,00917	0,00851
7	0,00906	0,00879
	0,00908	0,00843
8	0,00918	0,00869
	0,00922	0,0085
9	0,00908	0,00856
	0,00898	0,00844
10	0,009	0,00845
	0,009	0,00843
Average	0,00906	0,00859
HV	564 ± 12	628 ± 18
GPa	5,53 ± 0,12	6,16 ± 0,18

3.4. Mechanical tests

To evaluate sample durability, mechanical tests such as impact resistance, free fall resistance, and bending resistance, were conducted. The impact strength of both chemically tempered and untempered glass samples was measured using the instrument illustrated in Figure 6 and, with impact testing performed on both rim and bowl sections. These tests adhere to DIN 52295 and EN 12980:2000 standards. Additionally, a different tool, as described in Figure 8 and Figure 9, is employed for impact testing on the bottom part of the glass samples. The final results are shown in Table 3, Table 4, and Table 5.

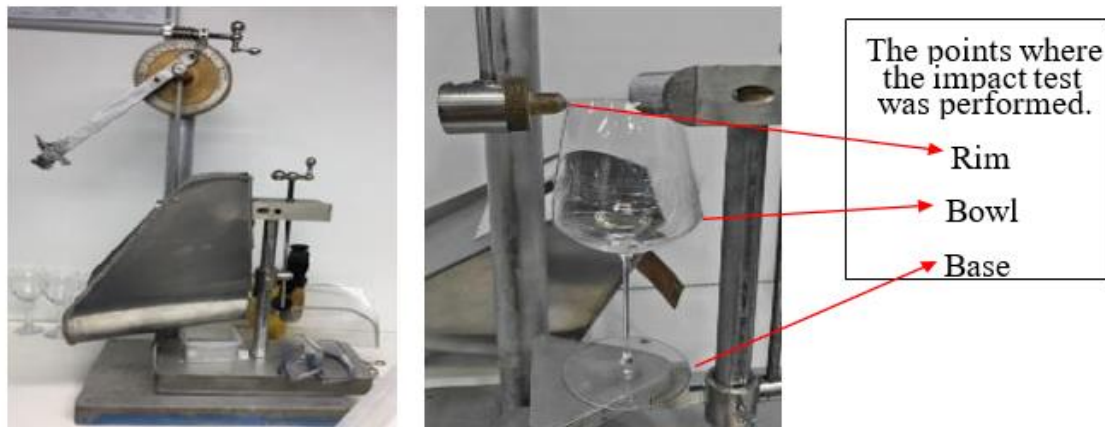


Figure 8. A tool used to test the impact resistance of glass samples taken from the edge and bowl part.



Figure 9. The tool used to test the impact resistance of glass samples taken from the base.

Table 3. Impact test results of the rim

Unprocessed glass			Chemically Tempered glass		
Sample No	Results (IPS)	Thickness of the rim (mm)	Sample No	Results (IPS)	Thickness of the rim (mm)
R-16-01	30	0,55 – 0,83	C-16-01	45 – 1st	0,62 – 0,71
R-16-02	25	0,83 – 0,88	C-16-02	45 – 3rd	0,58 – 0,59
R-16-03	20	0,50 – 0,56	C-16-03	45 – 1st	0,74 – 0,75
R-16-04	20	0,50 – 0,58	C-16-04	30 – 1st	0,57 – 0,72
R-16-05	25	0,56 – 0,61	C-16-05	45 – 1st	0,62 – 0,93
Average	24	0,64	Average	42	0,68

Table 4. Impact test results of the bowl.

Unprocessed glass		Chemically Tempered glass		
Sample No	Results (IPS)	Sample No	Results (IPS)	Thickness of the bowl (mm)
R-16-13	15	C-16-06	45 – 2nd	0,52 – 0,60
R-16-14	20	C-16-07	45 – 1st	0,54 – 0,61
R-16-15	20	C-16-08	40 – 1st	0,57 – 0,61
R-16-16	20	C-16-09	40 – 2nd	0,60 – 0,66
R-16-17	20	C-19-10	50 – 1st	0,55 – 0,58
Average	19	Average	44	0,58

Table 5. Impact test results of the base.

<i>Unprocessed glass</i>					
Sample No	Results (IPS)	Break from	Thickness of the stem (mm)	Thickness of the base (mm)	Diameter of the base (mm)
R-16-06	45	Stem	4,3	2,6	97,7
R-16-07	30	Stem	4,3	2,0	95,5
R-16-08	30	Stem	4,3	2,4	96,8
R-16-09	60	Stem	5,0	2,8	96,6
R-16-10	40	Stem	3,7	2,7	97,5
Average	41		4,3	2,5	96,8
<i>Chemically Tempered glass</i>					
Sample No	Results (IPS)	Break from	Thickness of the stem (mm)	Thickness of the base (mm)	Diameter of the base (mm)
C-16-11	85	Stem	3,7	2,4	96,8
C-16-12	105	Stem-Base	4,1	2,4	98,0
C-16-13	100	Stem-Base	4,6	2,6	96,5
C-16-14	100	Stem-Base	4,2	2,3	95,7
C-16-15	80	Base	4,8	2,7	96,9
Average	94		4,3	2,5	96,8

Free fall tests were conducted on both chemically tempered and untempered glass samples. Typically, the instrument has a maximum height limit of 50 cm. However, due to the size constraints of the wine glass, it was released for free fall from a height of 28 cm, as shown in Figure 10. The results of the test are provided in Table 6.

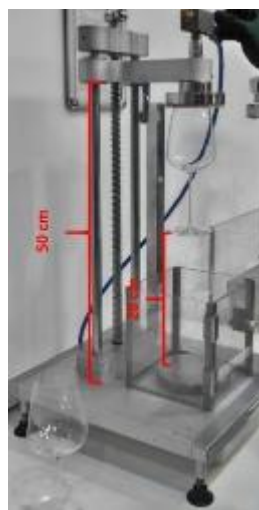


Figure 10. The instrument used for free fall testing.

Table 6. Free Fall test results.

Unprocessed glass		Kimyasal temperlenmiş cam	
Sample No	Results (cm)	Sample No	Results (cm)
R-16-18	18	C-16-16	>28 (no break)
R-16-19	14	C-16-17	>28 (no break)
R-16-20	16	C-16-18	>28 (no break)
R-16-21	14	C-16-19	>28 (no break)
R-16-22	14	C-16-20	28
Ortalama	16	Ortalama	Higher than 28

3.5. Bending test

The bending test was conducted on both chemically tempered and unprocessed glass samples using the test instrument is shown in Figure 9. The results of this test are presented in Table 7. It's worth noting that the maximum bending limit of the instrument is 11 degrees.



Figure 11. Bend Test apparatus.

Table 7. Bending test results.

Unprocessed glass			Chemically tempered glass		
Sample No	Results (degrees)	Thickness of the stem (mm)	Sample No	Results (degrees)	Thickness of the stem (mm)
R-16-23	5,5	4,2	C-16-21	>13 (not break)	3,6
R-16-24	5,5	4,2	C-16-22	>13 (not break)	4,4
R-16-25	6	4,2	C-16-23	13	4,3
R-16-26	6	4,2	C-16-24	>13 (not break)	4,7
R-16-27	6	4,2	C-16-25	>13 (not break))	-
Average	6	4,2	Average	Higher than 13	4,3

3.6. Hydrolytic resistance and dishwasher resistance analysis

Glass samples with Mold number 32016, which are crystalline glass samples, were utilized to detect the changes that may occur in hydrolytic resistance and dishwasher resistance before and after the Chemical Tempering process. ISO 719 "Resistance and classification of glass particles against water at 98°C" and EN 12875 "Resistance of household goods in the dishwasher" tests were carried out. The results obtained are given in Table 8.

Table 8. Water resistance and classification of Glass Particles at 98°C.

Sample Description	mL 0.01 mol/L HCl lg Glass Grains		Hydrolytic Class
	Result (Mean Value)	Limit Value	
32016 Unprocessed Glass	0,72	from 0,20 up to and including 0,85	HGB3
32016 Chemically Tempered Glass	0.55		

Hydrolytic Class	mL 0,01 moVL HCl Glass Grains
HGB 1	up to and including 0,10
HGB 2	from 0,10 up to and including 0,20
HGB 3	from 0,20 up to and including 0,85
HGB 4	from 0,85 up to and including 2,0
HGB 5	from 2,0 up to and including 3,5

It was kept immersed in a 0.5% (w/w) type C detergent (Finish Classic Powder) solution at 75oC. It was examined by the criteria given below according to the standard EN 12875-2. The examination results are given in Table 9.

Table 9. Dishwasher resistance of household items - fast method.

Ranking Degree	Surface Change result			
0	No Change			
1	First discernible change			
2	Clearly visible change			

Sample Description	16 HOURS	32 HOURS	48 HOURS	64 HOURS
Unprocessed Glass	0	0	0	0
Chemically Tempered Glass	0	0	0	0

From the analysis results presented in Table 10, it is evident that the chemically tempered glass exhibits higher resistance to hydrolysis compared to untreated glass. This is indicated by the reduced volume of acid (equivalent amount of sodium oxide) required for the titration of the extracted unit mass of chemically tempered glass. This reduction in required acid signifies lower reactivity with acid and, consequently, higher resistance to the corrosive effects of water.

Regarding dishwasher resistance, no notable difference was observed between the chemically untempered and tempered glass samples with mold number 32016, as per the EN 12875-4 standard. After 64 hours of testing, neither glass sample showed signs of deterioration such as clouding or grain defects. However, it is noteworthy that the untempered glass samples fractured from the foot part during testing, whereas the tempered glass samples remained intact. This indicates that tempered glass has better resistance to breakage under the specified testing conditions.

Table 10. DOL and CS values of the samples which were tested according to EN 12875-4.

Sample Description	Before Test		After 16 H		After 32 H		After 48 H		After 64 H	
	DOL (µm)	CS (MPa)	DOL (µm)	CS (MPa)	DOL (µm)	CS (MPa)	DOL (µm)	CS (MPa)	DOL (µm)	CS (MPa)
Sample 1	19,6 ±2,1	413 ±8	16,0 ±1,7	403 ±10	16,7 ±1,3	393 ±8	15,6 ±2,6	360 ±5	15,5 ±1,1	339 ±10
Sample 2	19,2 ±0,7	425 ±6	17,7 ±2,3	403 ±1	18,1 ±1,2	381 ±3	13,4±2,3	370 ±6	13,9 ±1,2	331

4. Conclusion

In conclusion, this study investigated the effects of mechanical washing resistance and weather conditions on both untempered and chemically tempered glass. The results revealed that chemically tempered glass exhibited higher compressive stress, greater hardness, and superior resistance to breakage compared to untempered glass. Additionally, chemically tempered glass exhibited enhanced resistance to hydrolysis. Overall, tempered glass demonstrated superior breakage resistance under the specified test conditions.

Acknowledgements

The authors would like to thank the University of Pamukkale for financial support to this research project (Project no 2021FEBE046).

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] D. B. Thombre and K. Singh, "Relaxation behaviour of lithium-borosilicate glasses," *International Journal of Engineering Research*, vol. 3, no. 10, pp. 602–607, Oct. 2014. doi:10.17950/ijer/v3s10/1010
- [2] P. A. E. Spectrometry, "Standard Test Methods for Determining Chemical Durability of Nuclear, Hazardous, and Mixed Waste Glasses and Multiphase Glass Ceramics: The Product Consistency Test (PCT) 1," 2002.
- [3] N. J. Kreidl, "Recent applications of Glass Science," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 123, no. 1–3, pp. 377–384, Aug. 1990. doi:10.1016/0022-3093(90)90810-9
- [4] M. C. Brierley and P. W. France, "Neodymium-doped fluoro-zirconate fibre laser," *Electronics Letters*, vol. 23, no. 16, p. 815, 1987. doi:10.1049/el:19870578
- [5] M. Moriyama and K. Kamata, "Strengthening of glass by amorphous SiO_2 ceramic films," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 6, no. 10, pp. 1141–1144, Oct. 1987. doi:10.1007/bf01729163
- [6] T. A. Michalske and S. W. Freiman, "A Molecular Mechanism for Stress Corrosion in Vitreous Silica," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 66, no. 4, pp. 284–288, Apr. 1983. doi: 10.1111/J.1151-2916.1983.TB15715.X
- [7] K. C. Datsiou and M. Overend, "Artificial ageing of glass with sand abrasion," *Constr Build Mater*, vol. 142, pp. 536–551, Jul. 2017. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.094
- [8] Y. A. Gösterişlioğlu, A. E. Ersundu, M. Çelikkilek Ersundu, and Sökmen, "Investigation the effect of weathering on chemically strengthened flat glasses," *J Non Cryst Solids*, vol. 544, p. 120192, Sep. 2020. doi:10.1016/J.JNONCRY SOL.2020.120192
- [9] A. Ghosh and S. Neogi, "Impact of dust and other environmental factors on glass transmittance in warm and humid climatic zone," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 19, no. 4, pp. 1215–1221, Oct. 2017. doi:10.1007/S10098-016-1302-0/FIGURES/8
- [10] S. M. Wiederhorn, "Influence of Water Vapor on Crack Propagation in Soda-Lime Glass," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 50, no. 8, pp. 407–414, Aug. 1967. doi:10.1111/J.1151-2916.1967.TB15145.X
- [11] S. M. Wiederhorn and L. H. Bolz, "Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 53, no. 10, pp. 543–548, Oct. 1970. doi:10.1111/J.1151-2916.1970.TB15962.X
- [12] V. Petrušková, P. Vrabel, P. Šimurka, P. Šajgalík, and M. Maryška, "Surface damage of two different wineglasses during dishwashing process," *Ceramics Silikáty*, vol. 51, pp. 57–66, 2007.
- [13] Y. A. Gösterişlioğlu, A. E. Ersundu, M. Çelikkilek Ersundu, and Sökmen, "Investigation the effect of weathering on chemically strengthened flat glasses," *J Non Cryst Solids*, vol. 544, p. 120192, Sep. 2020. doi:10.1016/J.JNONCRY SOL.2020.120192
- [14] V. F. Solinov, "Ways to Strengthen Glass: Toughening, Ion-Exchange," *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*, vol. 72, no. 5–6, pp. 191–193, Sep. 2015. doi:10.1007/S10717-015-9753-Z/TABLES/1
- [15] J. S. Olcott, "Chemical Strengthening of Glass," *Science (1979)*, vol. 140, no. 3572, pp. 1189–1193, Jun. 1963. doi:10.1126/SCIENCE.140.3572.1189
- [16] S. Karlsson, B. Jonson, and C. Stålhandske, "The technology of chemical glass strengthening-a review," *Glass Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 41–54, 2010.

- [17] A. K. Varshneya, "Chemical Strengthening of Glass: Lessons Learned and Yet To Be Learned," *Int J Appl Glass Sci*, vol. 1, no. 2, pp. 131–142, Jun. 2010. doi:10.1111/j.2041-1294.2010.00010.X
- [18] I. W. Donald, "Methods for improving the mechanical properties of oxide glasses," *J Mater Sci*, vol. 24, no. 12, pp. 4177–4208, Dec. 1989. doi:10.1007/BF00544488/METRICS
- [19] K. C. Chang, L. T. Tung, and Y. C. Liu, "P-66: The Mechanical Properties of Aluminosilicate Glass with Chemical Strengthening," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 45, no. 1, pp. 1226–1229, Jun. 2014. doi:10.1002/J.2168-0159.2014.TB00320.X
- [20] A. K. Varshneya, "Chemical strengthening of glass: lessons learned and yet to be learned," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 1, no. 2, pp. 131–142, Jun. 2010. doi:10.1111/j.2041-1294.2010.00010.x
- [21] R. Gy, "Ion exchange for glass strengthening," *Materials Science & Engineering. B, Solid-state Materials for Advanced Technology (Print)*, vol. 149, no. 2, pp. 159–165, Mar. 2008. doi:10.1016/j.mseb.2007.11.029

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Performance assessment of photovoltaic and photovoltaic/thermal systems under the impact of shadowing

Erdem Cüce^a, Pınar Mert Cüce^b

Submitted: 03.12.2023 Revised: 11.02.2024 Accepted: 15.03.2024 doi:10.30855/gmbd.0705N11

ABSTRACT

The rapid depletion of energy resources makes it necessary to turn to renewable energy sources. At this point, it is one of the most popular energy sources, especially with its solar potential. Photovoltaic thermal (PV/T) systems, which allow benefiting from thermal energy as well as modules that can produce electricity with direct photovoltaic (PV) systems, have made rapid progress in recent years. In this study, basic dynamics are tried to be determined by highlighting the basic parameters that affect the performance of PV and PV/T systems. In addition, the shading effect, which is quite common in applications, is discussed. Then, the studies, which increase the performance of the systems, are included together and the opportunity to compare the studies is presented. With innovative approaches, it is seen that good results can be obtained even at smaller scales with different applications of PV systems. With combined systems, the applicability in buildings is analysed by providing both electricity generation and thermal benefits in small-area applications.

Gölgeleme etkisi altında fotovoltaik ve fotovoltaik/termal sistemlerin performans değerlendirilmesi

ÖZ

Enerji kaynaklarının hızla tükenmesi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu noktada özellikle güneş enerjisi, potansiyeliyle en popüler enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Doğrudan fotovoltaik (PV) sistemlerle elektrik üretebilen modüllerin yanı sıra termal enerjiden yararlanmaya olanak sağlayan fotovoltaik termal (PV/T) sistemler de son yıllarda hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Bu çalışmada PV ve PV/T sistemlerin performansını etkileyen temel parametreler öne çıkarılarak temel dinamikler belirlenmeye çalışılmaktadır. Ayrıca uygulamalarda oldukça yaygın olan gölgeleme etkisi de ele alınmaktadır. Daha sonra sistemlerin performansını arttıran çalışmalara bir arada yer verilerek çalışmaların karşılaştırılmasına fırsat sunulmaktadır. Yenilikçi yaklaşımlarla PV sistemlerin farklı uygulamalarıyla daha küçük ölçeklerde bile iyi sonuçlar alınabileceği görülmektedir. Kombine sistemler ile küçük alan uygulamalarında hem elektrik üretimi hem de ısıl fayda sağlanarak binalarda uygulanabilirliği analiz edilmektedir.

Keywords: PV and PV/T systems, air and water collectors, system performance, shadowing; efficiency, I-V and P-V curve

^a Recep Tayyip Erdogan University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Mechanical Engineering 53100
- Rize, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0150-4705
e mail: erdem.cuce@erdogan.edu.tr

^b Recep Tayyip Erdogan University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Architecture
53100 - Rize, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6522-7092

*Corresponding author:
erdem.cuce@erdogan.edu.tr

Anahtar Kelimeler: PV and PV/T sistemler, havalı ve sulu toplayıcılar, sistem performansı, gölgeleme, verim, I-V and P-V eğrisi

1. Introduction

Due to the increasing human population, electricity consumption in living spaces is increasing day by day. When technological developments are added to this situation, more primary sources are needed to meet the energy demand. Currently, the biggest reason why this situation poses a danger is the continued use of fossil fuels in energy production. In the last century, meeting the energy need mainly with fossil fuels is the only unresolved problem. This increase in the use of fossil fuels will cause economic, global, and social problems in the future and will reach a level of threat due to CO₂ emissions [1]. Considering all these effects, the use of renewable energy sources gains vital importance as an alternative to fossil fuels. Renewable energy sources are incredibly attractive since they are environmentally friendly and their CO₂ emissions are low or even 0 in some cases [2]. Renewable energy sources are expected to meet half of the total energy production by 2060 [3]. Solar energy is different from other renewable energy sources. The sun can be used for both thermal and electrical energy [4]. In order to generate electricity, renewable energies use a medium or some mechanism. PV modules can convert solar radiation directly into electrical energy [5]. PV systems not only produce electricity directly but also let thermal energy production with some integrated applications [6]. These systems are called photovoltaic thermal (PV/T) systems. PV/T systems enable the use of thermally transferable energy by not converting it into electrical energy when the sun falls on the PV modules. At the same time, by removing this thermal energy from the modules, they contribute to lowering the temperature and thus increasing the efficiency [7]. The performance of PV systems depends on temperature and solar radiation and cannot be expressed with analytical equations [8]. For this reason, in this study, the performance of PV and PV/T systems is managed in every aspect, and the production and climatic parameters that affect the performance of the system are examined first. Then, the shading effect, which should be considered during the installation phase of the system, is presented and the work done is reviewed. Studies to improve the performance of PV and PV/T systems are presented to the readers comparatively by scanning the literature. Finally, hybrid studies on PV systems are included.

2. Module Efficiency and Parameters Affecting PV and PV/T Performance

The increasing human population and the significant increase in energy demand have led to the questioning of energy resources in recent years. Especially considering that energy sources are fossil-fuelled, environmental pollution poses a potential danger to human health in the coming years. For these reasons, the dissemination of renewable energy sources is extremely important. However, another prominent issue is the efficient use of these resources. In recent years, researchers have been doing plenty of research on the efficiency of energy systems and presenting new studies for the improvement of existing systems. In addition to the diversity of renewable energy sources, it draws attention, especially in terms of solar energy potential. Solar energy is used for space and water heating as well as for generating electricity. PV systems, which are popularly used to generate electricity, directly convert solar radiation into electricity [9]. The determining effect on the performance of these systems, which are constantly dependent on the sun, is temperature and solar radiation. It is of extremely vital importance to provide a suitable working environment for the PV system. Therefore, it is necessary to extract the performance parameters. Researchers suggest various methods for this [10]. Radziemska [11] works to experimentally evaluate the effect of temperature on power output in a single-crystal solar cell. It comparatively presents the output powers (PL) versus varying voltage values (UL) under constant lighting load at 28, 40, 60, and 80 temperatures (Figure 1A). It also shows the maximum power output depending on the temperature in Figure 1B. Claims that temperature rise causes a drastic reduction in power output.

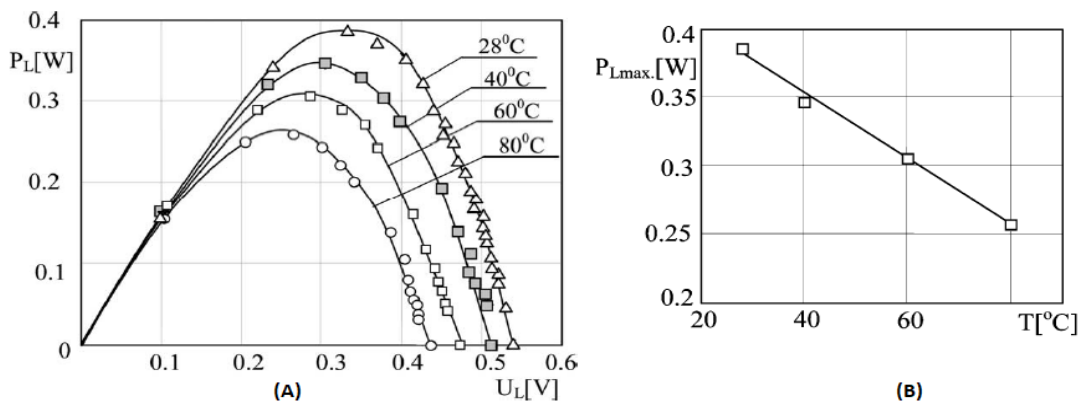


Figure 1. Power curve for different voltage values of a single-crystal silicon solar cell for 4 different temperature values (a), power output depending on temperature (b) [11].

Cuce and Cuce [12] evaluate the effect of air cooling on thermodynamic performance in silicon photovoltaic cells. In their numerical study, they show the voltage values versus current and power data for different cell temperatures at constant illumination intensity of $G=1000\text{W/m}^2$ in Figures 2a and 2b. Similarly, they show in Figure 2c that the maximum power output of the photovoltaic module decreases linearly with increasing cell temperature. They use different temperatures of air to lower the cell temperature as the cell temperature directly reduces the performance. The table of average cell temperatures and performance parameters for different air speeds and temperatures is given in Figure 3. Mahmoud et al. [13] interpret the performance of PV systems with different mathematical models. They perform current-voltage analysis on PV modules for different temperatures and solar radiation values. They show that while performance decreases with temperature, it increases with radiation intensity.

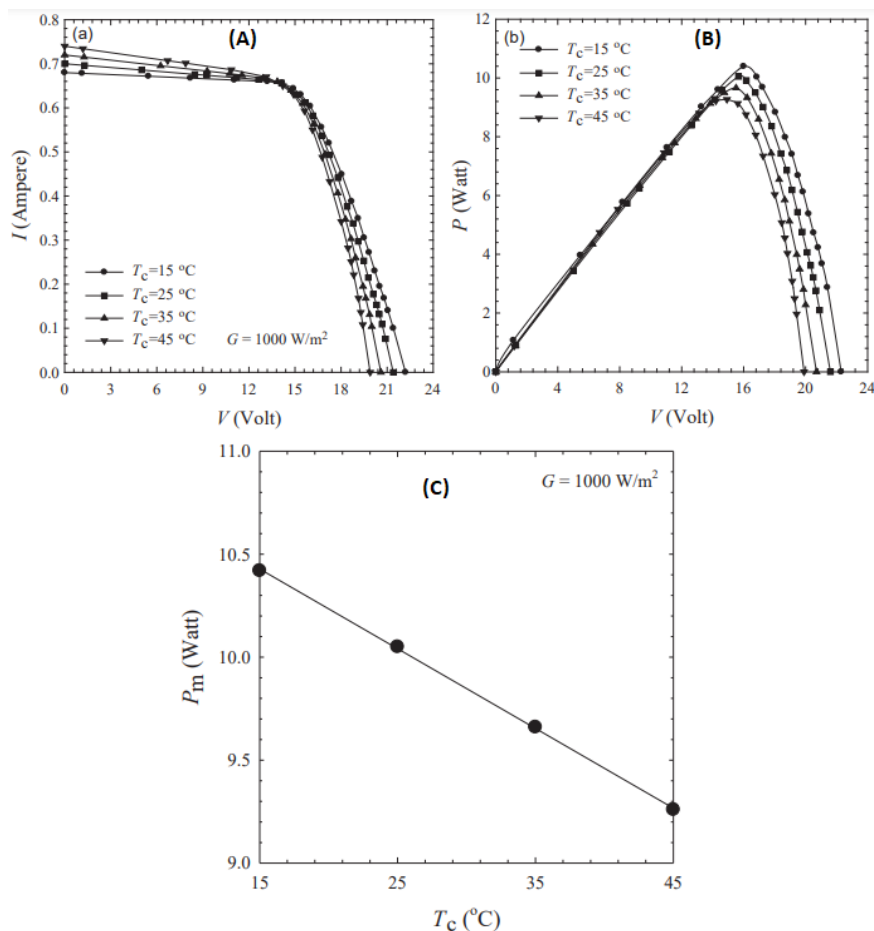


Figure 2. (a) I-V, (b) P-V characteristics for different PV cell temperatures, and (c) Variation of the maximum power output of the photovoltaic module with photovoltaic cell temperature [12].

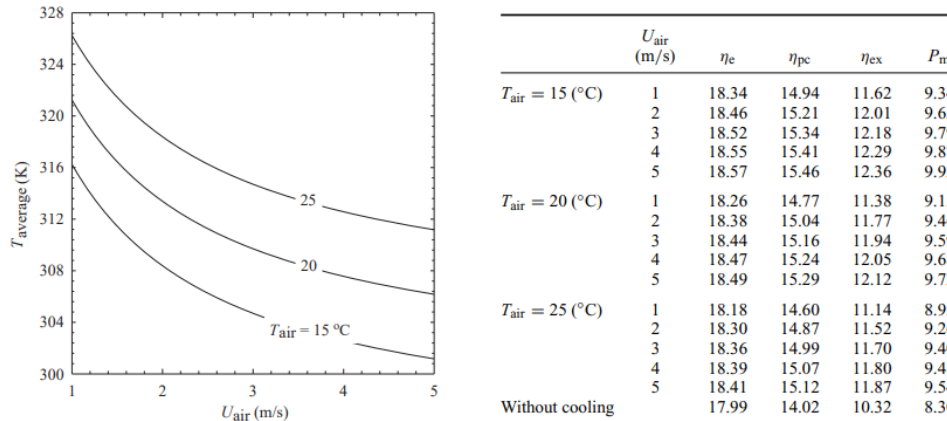


Figure 3. Average cell temperature ($T_{average}$) graph for different air velocities (U_{air}) and temperatures (T_{air}) and its effect on performance parameters [12].

The performance of PV systems in the literature is discussed extensively by researchers experimentally. In general, it is observed that the parameters affecting module efficiency are solar radiation, initial temperature, dust-shading, humidity, wind speed, and material. PV systems convert solar radiation directly into electricity. When the PV cells are exposed to sunlight continuously during the day, the temperature of the modules rises. In this case, the electrical efficiency of the cells with increasing temperature mitigates. Maximum electricity efficiency is achieved in the early morning and evening hours. Figure 4 shows the change in electrical efficiency during the day depending on the cell temperature [14]. The performance of PV cells differs depending on the cell temperature at different irradiation intensities. Najafi and Woodbury [15] develop a MATLAB-based mathematical model to examine the performance of PV systems. They show that keeping the PV cell temperature low will improve system performance. In Figure 5, they give a graph of power output depending on different cell temperatures and irradiation intensities.

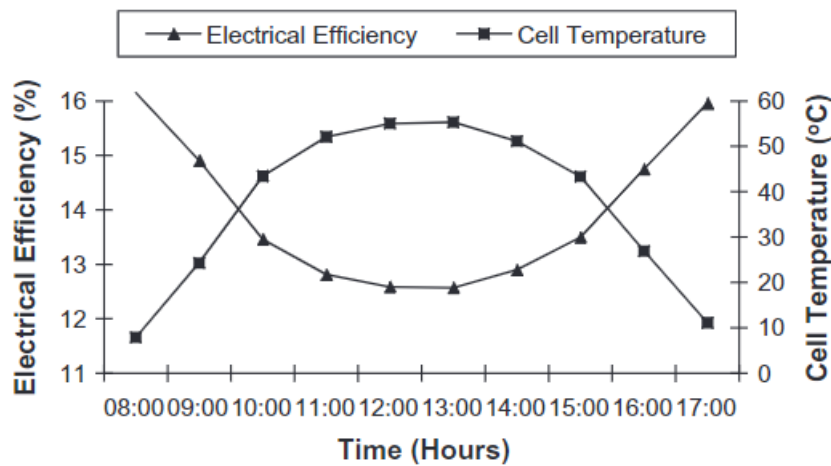


Figure 4. Hourly electricity efficiency graph based on cell temperature on a typical day in the low season [14].

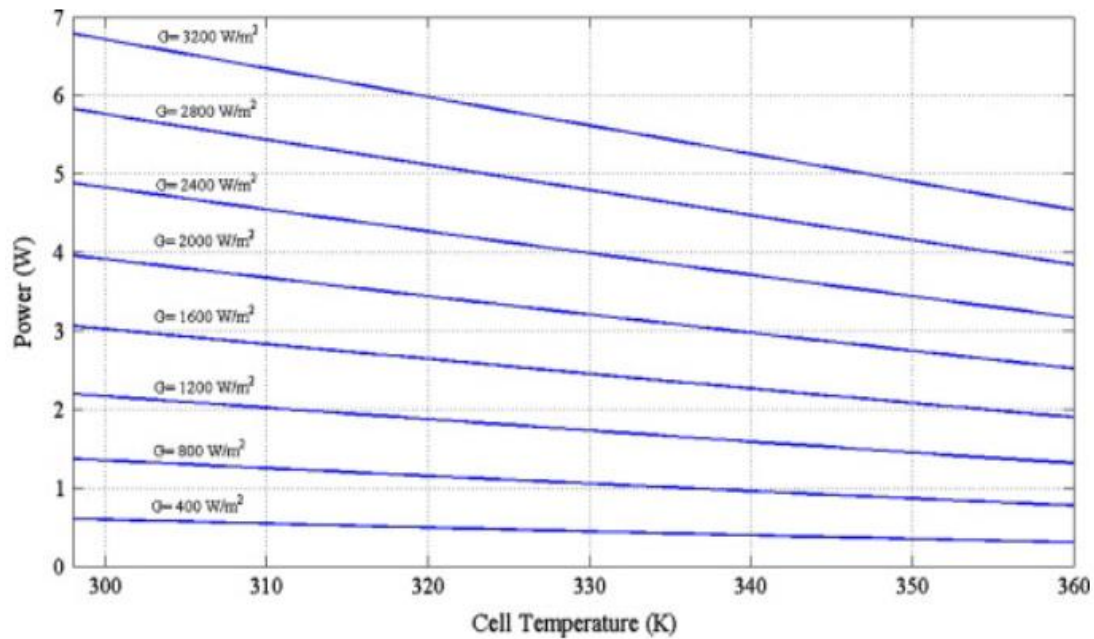


Figure 5. Graph of power performances of PV cells depending on the temperature at different irradiation intensities [15].

Salim et al. [16] assess the effect of dust on the performance of PV systems in a solar village near Riyadh. They claim that there is a 32% mitigation in the performance of the system with the dust effect when compared to the clean PV systems. Hammad et al. [17] develop two different models to determine the effect of dust and temperature on performance and the ideal cleaning frequency in PV systems. In the study conducted for the Jordan region, they show that the yield decreased by 0.607% and 0.768% per day for the two models, respectively, due to dust in measurements made over 192 days. Researchers claim that the performance of PV systems can be protected by regular maintenance and cleaning against the dust effect [18]. According to Katkar et al. [19] argue that the performance of PV systems will first increase and then decrease rapidly with temperature. They give the variation in the efficiency of the system for different temperatures in Table 1. In the literature, parameters affecting the performance of PV modules have been studied extensively by researchers. In general, it is seen that the studies are intense such as cell temperature, wind, solar radiation, ambient temperature, dust, and sand. In Table 2, some of the studies in the literature are given. The relative humidity is also important in PV performance, like other parameters. Relative humidity affects other climatic parameters as well as other climatic parameters. Therefore, it must be considered when evaluating PV performance. Kazem and Chaichan [20] interpret the PV performance between July and September 2015, considering the climatic parameters and relative humidity. When the results are examined, they find that the relative humidity is quite effective on the PV performance. They claim that PV efficiency remains low at high relative humidity levels. In areas with high dust concentration, the humidity formed on the PV surface and the dust in the air will adhere to the surface more, contributing to the mitigation of performance and an increase in maintenance costs [21]. Meyer and Van DYK [22] develop an energy model based on the performance of 3 Si-based PV modules, namely edge-defined-film-fed growth (EFG), mono, and multi, based on total daily solar radiation and maximum initial temperature. The model is applicable only when the maximum temperature and total daily irradiation are known.

Table 1. PV efficiency for different cell temperatures [19].

Temperature (°C)	PV efficiency (%)	Temperature (°C)	PV efficiency (%)
32.5	10.0	45	6.5
35	11	47.5	5.5
36.1	12	50	5.4
37.5	11.5	52.5	4.5
40	8	55	3.9
42.5	7	57.5	2.3

Table 2. Parameters affecting PV module performance.

Reference	Parameters	Working method	Findings
[23]	Cell temperature	Mathematical	An increase in cell temperature lowers voltage and power output.
[24]	Cell temperature	Experimental	An increase in cell temp. reduces the max. power.
[25]	Sand accumulation systems	Experimental	17% decrease in PV performance due to sand accumulation.
[26]	Cell temperature	Theoretical	Increased solar radiation improves efficiency, but temperature rise lowers power output.
[27]	Solar radiation Wind speed	Mathematical	Although wind speed does not have much of an effect, they claim that increasing speed will increase thermal efficiency while increasing solar radiation will increase thermal efficiency.
[28]	Dust and ambient Temperature	Experimental	Temperature and dust accumulations are extremely effective for PV performance.
[29]	Temperature and wind speed	Computer simulation	An increase in the inlet temperature of the module lowers the performance parameters, while an increase in the inlet air velocity, on the contrary, increases it. It measures electrical efficiency at approximately 10%.
[30]	Dew and rain	Experimental	Since water droplets formed due to condensed air and rain on the PV panels scatter radiation, it is tried to reduce efficiency.
[31]	Humidity	Experimental	The effect of humidity on PV performance is interpreted for monocrystalline (m-Si) and polycrystalline silicon solar cell (p-Si) cell technologies. The effect of humidity on performance is negligible.

3. Shading Effect in Photovoltaic Systems

Gao et al. [32] offer a configuration to evaluate the performance of PV systems under rapidly changing shading effects. With experimental work, they claim that a PV system with direct converter input single-cell voltage is ideal. Hong et al. [33] calculate the usable roof area in cities using hillshade analysis. They calculate hourly the areas where electricity can be generated via PV modules on the roofs of Gangnam City in Seoul. They claim that whilst 35.9% of the total roof area can be used at 7 am, the maximum roof utilization rate is 73.2% at 10 am. In this case, they emphasize that the shading effects of the buildings are the cause. Mishra et al. [34] model in MATLAB/Simulink environment regarding the optimum arrangement of PV modules to achieve maximum power under partial shading conditions. They argue that the performance of their newly designed NS configuration will provide a 13.2% maximum increased power for cross-shading movements compared to the total cross-linked (TCT) configuration. Ko and Chung [35] propose a monitoring system that considers the shadow effect to increase the efficiency of PV systems. They calculate the distance between the PV modules and the height which will not create a shading effect. An example image is given in Figure 6. They claim that the system will deliver 6.86 kW more power per day and 123 kW more per month than the traditional model. Jang et al. [36] claim that by developing an algorithm, by optimally adjusting the distance between the PV module strings, an extra 10 kW of electricity can be produced per day and up to 120 kW per month. They support their algorithms with experimental work.



Figure 6. Example of PV array [35].

Lodhi et al. [37] analyse the maximum power point (MPP) of PV modules under partial shading conditions via MATLAB/Simulink. They compare particle swarm optimization (PSO) and incremental conductivity (INC) algorithms in terms of power output. They claim that the global peak power point (GMPP) of the PSO algorithm hovers around 298 W, while the INC algorithm hovers around 260 W. They emphasize that the PSO algorithm gives healthier results in abruptly changing environmental conditions than INC. Ahmed and Salam [38] compare the approaches used to reduce the shading effect in PV systems. They claim that the Maximum power point tracer (MPPT) algorithm is the most applicable and economical model for the shadowing effect. Karakose and Baygin [39] use an image-processing algorithm on detecting shadow motions for reconstruction in PV arrays. With the new approach they use, the efficiency of the system increases, and they claim a 15% increase in power output. The power output and current graphics of the system against voltage are as in Figure 7 before and after configuration.

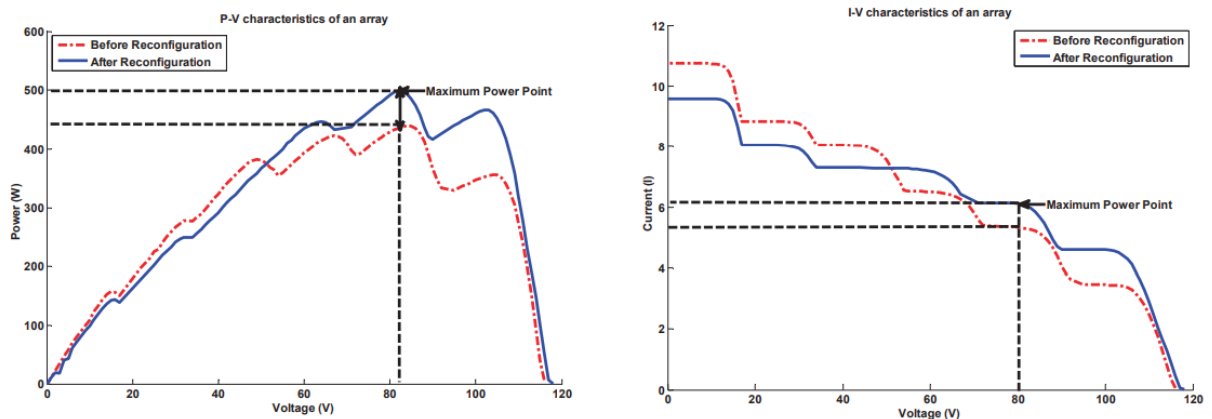


Figure 7. Voltage-power and voltage-current graphs before and after reconfiguration [39].

Taheri et al. [40] argue that the Conventional Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique may fail to monitor the global power of PV systems, and this is partly due to shading effects. Alternatively, they propose an algorithm based on Differential Evolution (DE) that can track MPP under partial shading. In their results solved with MATLAB/Simulink, they emphasize that DE can track MPP very quickly and accurately. They also observe that Perturbation and Observation (PO) is very slow to reach MPP. Ishaque and Salam [41] present a review of the most advanced MPPT techniques for PV system applications. They claim that Evolutionary Algorithm (EA) methods are the most promising method for partial shading. With the MPPT method, they give the graph of current and power against different voltages in Figure 8.

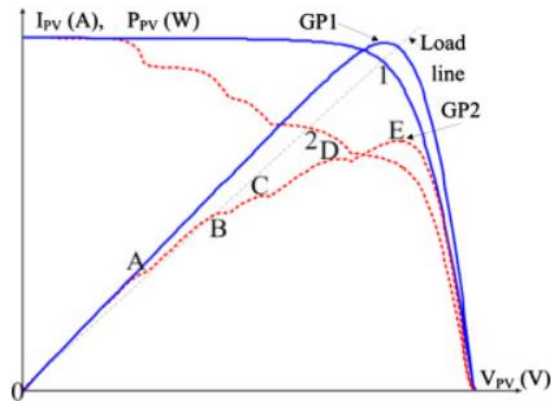


Figure 8. Current (I) and power (P) versus voltage (V) curves are used to evaluate the performance of different MPPT methods [41].

In most Photovoltaic Thermal (PV/T) systems, the PV cells are covered with a cover to reduce heat loss and increase efficiency. Unlike ordinary PV systems, these covers may cause partial shading, resulting in a decrease in the performance of the system. Wang et al. [42] analyse this situation with mathematical modelling. They claim that under partial shading, parallel-connected circuits will suffer more performance loss than series-connected ones and that the efficiency will decrease by 39% in the worst case with the shading effect. They also argue that the shadowing effect can be reduced by reducing the number of cells close to the frame edges. In PV systems, the MPP is difficult to monitor in case of shading effects and damage to some cells. In this case, disabling the part that is exposed to the shadow effect may be effective for the performance of the system. Karatepe et al. [43] monitor the operating voltage of the system by equipping each PV array with DC-DC converters. In this way, they discover the shaded PV modules and determine the MPP of the unshaded PV modules. A 20-30% increase in PV array power output can be expected using the MPPT converter, but with the recommended configuration, the power output of a partially shaded PV array can support a 300% increase.

For PV systems, the shading effect is a fundamental problem, especially for small-area applications. For this reason, applications that will eliminate or minimize the shading effect gain importance. Considering the effects of traditional PV applications such as erosion, microclimate changes, and deforestation, innovative approaches are inevitable [44]. One of the innovative approaches that will minimize the shading effect is PV trees. The features can minimize the shading effect of PV trees that can be used in landscape applications [45]. An example of the system is given in Figure 9.



Figure 9. Modelling of PV tree installed at a certain height from the ground.

Table 3. Suggestions for improvement of shadow effect on PV systems

	Advantages	Disadvantages	Outcomes
Bypass diode	The utilisation of a bypass is intended to safeguard solar cells from overheating, ensuring the smooth transfer of incoming current to shaded cells. This ensures the passage of the entire current, allowing the system to persist without interruption [46].	A considerable quantity of bypass diodes is necessary for these systems to pre-empt issues, incurring an associated cost burden [47].	In a comprehensive study investigating scenarios involving complete shading of one, two, and three modules, various assessments are documented on the application of bypass. The purpose is to demonstrate the efficacy of bypass in enhancing efficiency. The results, when categorised individually for one module, two and three modules, with and without bypass, reveal improvements ranging from 17.96% to 12.79%, 14.5% to 9.63%, and 6.87% to 3.59%, severally [48].
DC-DC converter	In extensive systems, every solar submodule has the potential to be linked to a DC-DC converter, which oversees its MPP and can operate in proximity to this optimal point. Consequently, this contributes to an overall enhancement in the efficiency of the entire system [49].	The requirement for DC-DC converters may match the number of solar modules, posing a potential challenge for larger systems [50].	Deline [51] conducts a study to investigate the impact of shadows on the performance of PV systems. The findings indicate that the incorporation of a DC-DC converter results in a 5-10% increment in annual power production. Moreover, the performance loss attributed to shadows is mitigated by 24-48% due to the utilisation of the DC-DC converter.

Table 3 provides a concise overview of the advantages, disadvantages, and findings related to partial shading conditions. This information is valuable in mitigating issues such as multiple peaks, hot spot formation, and electrical mismatch, ultimately enhancing system performance. In addition to the techniques outlined in Table 3, current methods for improving performance include PV array reconstruction. An example is the competence squared cloud method, as investigated by Dhanalakshmi and Rajasekar [52]. They apply this method with various configurations to address shadows in PV systems. Various shading configurations, namely short-wide, short-narrow, long-narrow, and long-wide, were examined using the competence squared method. The results indicated a significant maximum efficiency increase of 24.4% for the short-wide shadow pattern. In contrast, the short-narrow pattern showed a minimum improvement of 6.6%. Additionally, the efficiency squared method was calculated to prevent a reduction in power loss, ranging from 30% to 49%. In order to observe MPP, there are also restructuring methods such as Skyscraper [53], Magic square [54], and Dominance square [55].

In conclusion, while advanced shadow management techniques offer substantial benefits in terms of efficiency and performance improvement in PV systems, it is essential to carefully consider associated costs, complexities, and space requirements. Research findings consistently highlight the positive impact on energy harvesting and power loss reduction, demonstrating the potential for significant improvements in system reliability and overall effectiveness.

4. Studies for Performance Improvement of PV and PV/T Systems

PV systems are among the favourites of clean energy for the future. However, it is a great advantage that solar energy is safe, clean, relatively low cost, and efficient [56]. Nevertheless, even the most efficient examples of PV systems currently on the market are below 20% [57]. So much so that PV modules convert 82-85% of solar radiation to heat and 15-18% to electricity [58]. The reason for the low efficiency of PV systems is the decrease in the electricity produced by the system with elevated temperatures. Therefore, in order to increase the performance of the system, the cell temperature must be lowered. Environmental factors affecting PV cell temperature can be listed as ambient air velocity, solar radiation, relative humidity, and ambient dust [59]. This environmental, also known as climatic factors, should be taken under control as they affect the cell temperature. However, for an established system, these effects cannot be changed because they depend on geography. Therefore, additional applications are needed to lower the cell temperature. There are different applications in the literature to improve the performance of the system. In general, there are applications in the form of removing the heat from the module to eliminate the high-temperature situation. In this way, the power output

and performance of the system can be improved by artificial cooling [60]. An increase of 0.4-0.5% in the temperature of Crystal Silicon (c-Si) modules causes a 0.65% decrease in PV efficiency [11]. In light of these data, an effective cooling to be applied to the modules will allow significant increases in the performance of the system. In order to increase the efficiency of PV systems, solar radiation must be converted into electricity by means of modules and the thermal energy must be absorbed and removed from the modules with additional systems. Thermal systems integrated with modules in this way are called photovoltaic thermal (PV/T) systems [61]. In PV/T systems, air or fluid can be used to remove the heat from the modules of the system. In systems using fluids, the cold water passed through the pipes placed in the part where the modules are placed is used to remove the heat. The schematic view of the system is given in Figure 10.

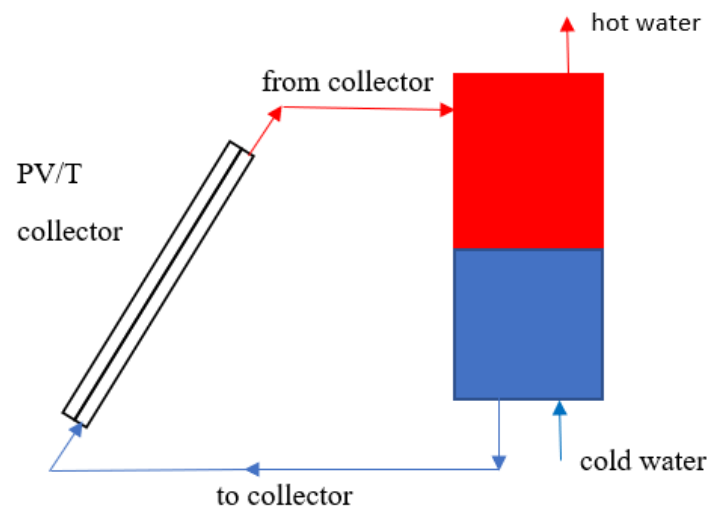


Figure 10. Liquid-based PV/T system schematic [27].

Zondag et al. [62] mathematically evaluate the performance of the combined PV/T system. They compare performance in 4 different designs: sheet-and-tube PVT, channel PVT, free-flow PVT, and two-absorber PVT (insulated type). They claimed that the channel-type design had the best thermal efficiency. They emphasized that the single cover plate and tube type PV/T design can be used as an alternative, where only 2% lower efficiency is achieved compared to the channel type. Kalogirou and Tripanagnostopoulos [63] design a combined system that will reduce the module temperature in the PV/T system and meet the thermal energy and hot water needs of the house. In their analysis with TRNSYS simulation, they claim that although the non-hybrid PV system is 38% more efficient, it is a useful application since most of the hot water needs of the spaces will be met with the system. Some researchers compare using the natural convection effect of air instead of water to remove heat in PV/T systems. Nizetic et al. [64] evaluated the effect of water spray cooling on the performance of the PV module with an experimental study. The effects of water spray on the system performance are compared by applying 3 different ways: only from the front, only from the back, and from both the front and the back of the panel. The schematic view of the system is given in Figure 11. With the panel with an area of 0.31 m², it is measured that a power output of 35 W is obtained without cooling at 1000 W/m² solar radiation and 25 degrees ambient temperature. Then, 39.9 and 40.1 W output is measured under the same conditions with spray cooling only from the front and only the rear region, respectively. Finally, 40.7 W output is measured with bidirectional spray cooling. Moharram et al. [65] work to determine the minimum amount of water required to cool the PV modules in high temperature and arid regions and for minimum energy consumption. They use a mathematical model to calculate at what temperature the cooling process of the panels with water spraying will start and how long the cooling process will take. They claim that maximum power output is obtained when the cooling process starts when the panel temperature reaches 45°C. They find the cooling rate as 2°C/min under the relevant working conditions. Salih et al. [66] evaluated the effect of water spraying on the front surface of PV systems on the performance of the system with a large-scale experimental study. They emphasize that the average efficiency is 17.8% while taking a cooling rate of 4'/min during the day. They also claim that with the increase in efficiency, more power can be drawn from smaller PV fields.

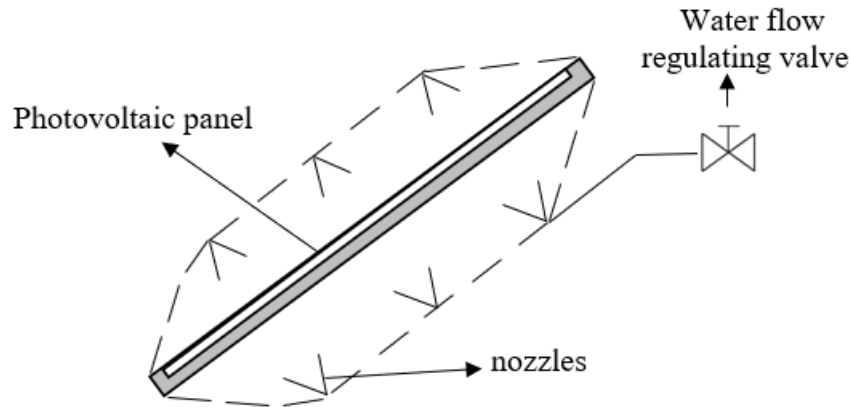


Figure 11. Schematic view of the water spraying cooling system applied to the PV system [64].

Tripanagnostopoulos [67] interprets the performance of PV/T systems by creating 4 different designs with an experimental study. First, it uses an air duct instead of a copper tube water exchanger to remove heat. In addition, it uses an additional air duct in the first stage in both water exchanger and air duct designs. Then, it compares the effect of closing the module with a glass cover on the system performance for both cases. The schematic view of 4 different models is given in Figure 12. They claim that the best result for the module efficiency of the PV/T system will be obtained from a dual system with a water heat exchanger and air duct, but for building concepts, a copper tube-based water heat exchanger design will be more useful in terms of hot water supply. They show that the thermal efficiency of the system will be 30-70%, and the electrical data will be 10-16%. Water, which is used as the most common liquid to provide heat dissipation in PV/T systems, is widely used because it provides more stable thermal performance [68].

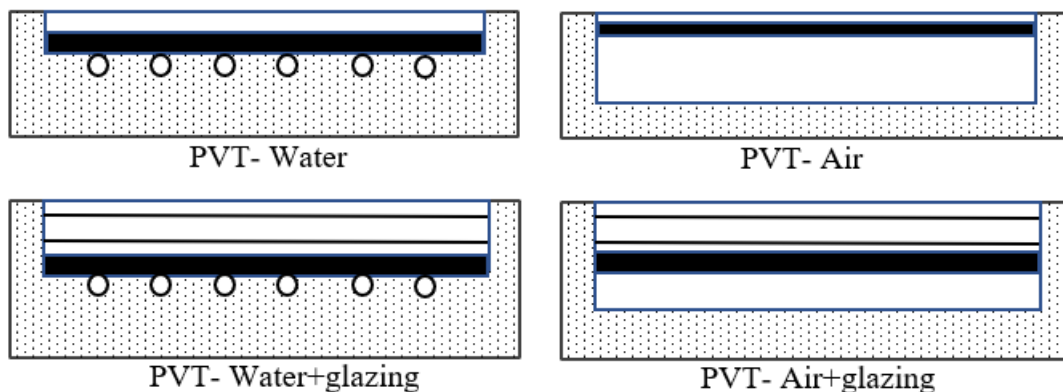


Figure 12. Glass-less PV designs with water or air support. [67].

Air can be used instead of water to remove heat to prevent temperature rise in PV/T systems. Due to the high heat capacity of water, it is expected to remove more heat from the system than air. Tripanagnostopoulos et al. [69] compare the performance of poly-crystalline (pc-Si) and amorphous silicon (a-Si) PV cells by setting up a PV/T system. They claim that with the cooling system, PV efficiency increases by about 10% and that water provides better cooling than air circulation. Alshibil et al. [70] compare the performance of PV and PV/T systems with an experimental study. They evaluate electrical and thermal performance in 3 different situations for the classic PV module, the classic PV/T system with copper absorber plate (a-PV/T), and the new fin design PV/T system (BiF-PV/T). They claim that the cell temperature of the other 2 designs is 19.2°C lower than the standard PV system and that 7.56% electrical efficiency and 66.17% thermal efficiency are achieved with the new design. Bahrehmand et al. [71] evaluate the performances of single- and double-glazing PV systems under forced transport conditions. In addition, the performance of PV systems is compared depending on the rectangular and triangular fin effect, the channel depth, and the Re number. In the results obtained with the mathematical model, they claim that the fin-containing and thin metal sheet (TMS) systems are more efficient than the others. For values of Reynold (Re) number greater than 22000, the exergy efficiency is negative, for a two-glass cover with TMS. Saygin et al. [72] evaluate the effect of the change in the distance between the PV module and the glass on the performance by using air cooling in the PV/T system. They claim that with the analysis of variance (ANOVA) method, the best thermal efficiency is

obtained at 3 cm, and the best electrical efficiency is obtained at 5 cm, with air inlet from the middle of the glass cover. There are numerous studies in the literature on the cooling of PV and PV/T systems. Looking at its main lines, it is seen that the studies concentrate on certain topics. Some researchers classify fluid type as natural and forced convection in terms of flow characteristics. In Table 4, there is a section of the studies of researchers using air and water to cool PV and PV/T systems.

Table 4. Studies for performance improvement of PV systems.

Reference	Coolant material	Findings
[73]	Water	Decreased module temp with liquid circulation increases efficiency
[74]	Water	It is seen that the PV system consisting of laminate performs better than the traditional PV system with its water-cooling effect. With the new concept, it is determined that the electrical efficiency is 7.2% and the thermal efficiency is 33%
[75]	Water	When the hot water production per unit collection area exceeds 80 kg/m ² , the PV efficiency is approximately 10.15%
[76]	Water	Partially closed PV/T system with PV will give better performance, thermal efficiency will be between 40-55% and electrical efficiency will be 11-12%
[77]	Water	Glazing is a performance-enhancing method for PV systems. However, this is not the case in all cases. Factors such as radiation, water flow, glazing area, and ambient temperature should be evaluated
[78]	Water	The efficiency of PV systems decreases by 8-15% due to the increased temperature because of reflection. Efficiency can be increased by lowering the cell temperature with a thin water film layer. In addition, the heated water can be used for different purposes
[79]	Water	The PV/T system with a 2m ² collector area is closed first with a 0.605m ² PV module and then complete with a PV module and the results obtained are compared numerically. When the entire area is covered with the PV module, the thermal energy gain is reduced by 9.8%. Closing the entire collector with a PV module increases electricity production
[80]	Water	They perform energy and exergy analysis of the glazed PV/T system. They claim that the overall efficiency of the system will be higher relative to the first law efficiency at low water inlet temperature, but the actual efficiency will be higher according to the second law analysis when essentially higher temperatures are reached
[27]	Water	Increasing the water flow rate from 0.01 kg/s to 0.1 kg/s in the PV/T system reduces the average cell temperature from 84C to 34C. As a result, thermal and electrical efficiency increases
[81]	Water	Application of Roll-bond flat plate aluminium absorber in a water-cooled, glazed PV/T system improves performance
[82]	Water	In the experimental study, they state that the thermal efficiency is 25-58% and the electrical efficiency is 12-16% with the energy and exergy analysis of the water-cooled combined PV/T system. They emphasize the usability of the concept for household use
[83]	Air	They show that an air cooling-based PV/T system using a compound parabolic concentrator will give better thermal and electrical performance than the standard system
[84]	Air	The performance of 2 types of PV modules with glass-to-tedlar and glass-to-glass features is compared. Electricity efficiency is in the range of 9.5-11% during the day. Glass-to-glass PV/T concept shows better thermal efficiency
[85]	Air	They evaluate the performance effect of connecting additional modules in series or parallel in the PV/T system. They claim that the parallel module connection, which will allow dual air inlets and outlets, will give the best thermal and electrical efficiency
[86]	Air	The efficiency of the air-cooled PV/T system is 20% higher than the traditional PV electricity efficiency
[87]	Air	The cooling effect of air in PV panels is compared under natural and forced convection conditions. For 970 W/m ² radiation intensity, the efficiency is 2% higher with forced convection under the same conditions.
[88]	Water / Air	Water or air cooling of the PV system is considered for different flow rates and channel depths. It is seen that the thermal efficiency varies between 50-67% when heating water and 17-51% when heating air
[89]	Water / Air	4 different PV/T systems, unglazed with tedlar (UGT), glazed with tedlar (GT), unglazed without tedlar (UGWT), and glazed without tedlar (GWT), are compared. It is seen that the water-integrated system performs better than the air

Solar chimney power plants are large structures that work on the principle of rising heated air [90]. Due to the pressure difference at the inlet and outlet of the high chimney in its structure, the air inside it moves upwards continuously. This mobility can be used to lower or stabilize the temperature of the PV module. The schematic view of the solar chimney photovoltaic thermal (SC-PV/T) system is given in Figure 13. With the chimney to be integrated into the PV/T system, the electrical efficiency is 18% higher than standard PV modules, reducing the temperature of the PV module [91].

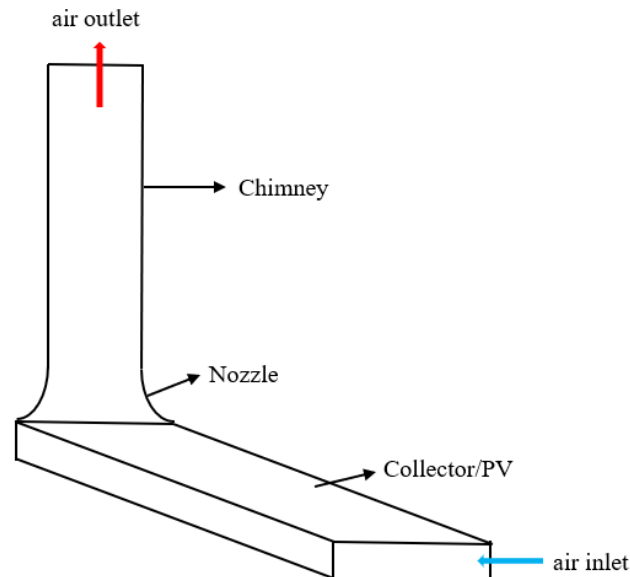


Figure 13. Solar chimney integrated air-cooled PV/T system schematic [91].

The solar chimney concept does not work in such a way as to reduce the module temperature by only supporting the airflow over the PV module. With the structures to be directly integrated into the system, power output can be obtained from both PV modules and solar chimney power plants. Haghghat et al. [92] design a combined system by placing PV modules in the collector of the solar chimney. They evaluate the performance of the system and the solar chimney together with PV modules of different widths. With the system, they achieve a 5°C drop in PV module temperature. They claim that when 50 cm wide PV is placed, the power obtained from the solar chimney decreases, but this situation is more than compensated by the increase in panel efficiency. Jamali et al. [93] design a solar tower photovoltaic (STPV) based on the dimensions of the Manzanares pilot plant. The collector of the turbine-free solar chimney system is laid with completely transparent PV modules. They claim that the temperature of the panels will be reduced by approximately 45°C thanks to the airflow created by the solar chimney with a radiation intensity of 900 W/m². They show that according to the radiation intensity, the system will increase PV efficiency by up to 29%.

PV/T systems are used in the literature in combination with different systems. Mohamed et al. [94] claim that the COP of the absorption cooling system with the integrated PV/T system will be about 5. They also state that electricity savings will be achieved with the system. Cao et al. [95] design an effective system that can be used in cold regions with a heat pump integrated into the PV/T system. They emphasize that the average COP coefficient of the unit designed using the air source heat pump PV/T collector output reaching 76.6°C by the TRNSYS simulation will reach 4.1 and it is an effective method for heating mode. Solar photovoltaic water pumping system (SPVWPS) installed for agricultural lands far from the settlement is one of the effective applications that can be an alternative to fossil fuel generators [96]. Chen et al. [97] perform numerical and experimental analysis by integrating a heat-pipe solar (HPS) heat pump and a PV/T system. They emphasize that ambient temperature and solar radiation are the main factors affecting the performance of the system. They claim that the efficiency of the system is in the range of 30-50% according to the heat pipe range, and the COP value is in the range of 3.4-5.6. They especially draw attention to the usability of the system in small houses and buildings.

Thin film PV cells and their integration into building elements are in the centre of interest especially in recent years due to the increasing application of modern architecture [98]. Shadowing is also an issue

in building elements like thin film PV glazing systems. Even partial shadowing plays a significant role in the reduction of power output. In this regard, facade design is of vital importance for optimum energy efficiency. Energy efficiency and optimum energy generation in such systems is usually expressed with solar cell parameters and their dependency on main environmental factors such as solar radiation and ambient temperature [99]. Maximising solar radiation falling on the aperture glazing while minimising the cell temperature can be considered as the optimal solution in most cases for enhanced current and voltage parameters thus higher power output and efficiency [100].

5. Conclusion

Renewable energy has the potential to break the dominance of fossil fuels, which have dominated energy production for 200 years. It is obvious that renewable energy will continue to increase its power in the coming years, especially thanks to the use of solar energy all over the world and its endless potential. This study evaluates the performance parameters by shedding light on the performance of PV and PV/T systems. It also aims to give an idea to manufacturers by providing comparisons for development studies. The findings obtained from the study can be listed as follows.

- Solar energy has enormous potential and is very useful for both electrical and thermal energy.
- PV modules, which are widely used to generate electricity from the sun, can be used regardless of geography.
- Environmental temperature and solar radiation have a primary effect on the performance of PV modules.
- Low ambient temperature and high solar radiation mean maximum power output for PV modules.
- For standard climatic conditions, the efficiency of PV modules is 13-15%. This efficiency range is maintained as long as the PV module remains at a temperature lower than 60°C.
- The performance of PV modules is also affected by the material produced. Polycrystalline Si modules outperform Monocrystalline Si's.
- Especially in arid climatic regions, sand accumulation is very effective in the performance of PV modules. Sand build-up can cause performance degradation of up to 17%.
- Humidity is not an effective parameter in performance. However, humidity can have a performance-reducing effect as airborne dust clings to the PV modules. Similarly, the Dew effect is another point to be considered.
- It is good for high power output to install large-scale systems. However, the increased shading effect can be a disadvantage. Therefore, optimum module spacing, ideal positioning, and angle adjustment are required.
- Comparing by trying different methods for performance monitoring under the effect of shadowing gives healthier results.
- The PV tree method can be used effectively, especially in places with shading effects and installation space problems.
- PV/T systems, which are used to increase the performance of PV modules and to benefit from thermal energy, are extremely useful for buildings.
- Module efficiencies of PV/T systems are 20% higher than traditional PVs.
- It is highly effective for air and water cooling, most commonly used for PV/T systems. Since the heat capacity of water is higher than that of air, it gives better performance for cooling.
- PV modules can eliminate the dependence on energy-needing vehicles such as pumps and drills on fossil fuels in agricultural lands in remote areas.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] P. M. Cuce, H. Sen, and E. Cuce, "Impact of tower diameter on power output in solar chimney power plants," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 253-263, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.08

- [2] S. Bilgen, K. Kaygusuz, and A. Sari, "Renewable energy for a clean and sustainable future," *Energy sources*, vol. 26, no. 12, pp. 1119-1129, 2004. doi:10.1080/00908310490441421
- [3] T. Kober, H. W. Schiffer, M. Densing, and E. Panos, "Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019," *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, p. 100523, 2020. doi:10.1016/j.esr.2020.100523
- [4] C. Smith, "Revisiting solar power's past," *Technology Review*, vol. 98, no. 5, pp. 38-47, 1995.
- [5] E. Cuce, P. M. Cuce, I. H. Karakas, and T. Bali, "An accurate model for photovoltaic (PV) modules to determine electrical characteristics and thermodynamic performance parameters," *Energy Conversion and Management*, vol. 146, pp. 205-216, 2017. doi:10.1016/j.enconman.2017.05.022
- [6] P. G. Charalambous, G. G. Maidment, S. A. Kalogirou, and K. Yiakoumetti, "Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review," *Applied thermal engineering*, vol. 27, no. 2-3, pp. 275-286, 2007. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.06.007
- [7] K. Moradi, M. A. Ebadian, and C. X. Lin, "A review of PV/T technologies: Effects of control parameters," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 64, pp. 483-500, 2013. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.044
- [8] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Colak, "Neural network based solar cell model," *Energy conversion and management*, vol. 47, no. 9-10, pp. 1159-1178, 2006. doi:10.1016/j.enconman.2005.07.007
- [9] E. Cuce, P. M. Cuce, S. Carlucci, H. Sen, K. Sudhakar, M. Hasanuzzaman, and R. Daneshazarian, "Solar chimney power plants: a review of the concepts, designs and performances," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1450, 2022. doi:10.3390/su14031450
- [10] E. Cuce, T. Bali, and S. A. Sekucoglu, "Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 299-308, 2011. doi:10.1093/ijlct/ctr018
- [11] E. Radziemska, "The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells," *Renewable energy*, vol. 28, no. 1, pp. 1-12, 2003. doi:10.1016/S0960-1481(02)00015-0
- [12] E. Cuce and P. M. Cuce, "Improving thermodynamic performance parameters of silicon photovoltaic cells via air cooling," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 193-199, 2014. doi:10.1080/01430750.2013.793481
- [13] Y. Mahmoud, W. Xiao, and H. H. Zeineldin, "A simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules," *IEEE transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 185-186, 2011. doi:10.1109/TSTE.2011.2170776
- [14] G. N. Tiwari, R. K. Mishra, and S. C. Solanki, "Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modelling," *Applied energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2287-2304, 2011. doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.005
- [15] H. Najafi and K. A. Woodbury, "Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells," *Solar Energy*, vol. 91, pp. 152-160, 2013. doi:10.1016/j.solener.2013.01.026
- [16] A. A. Salim, F. S. Huraib, and N. N. Eugenio, "PV power-study of system options and optimization," In *EC photovoltaic solar conference*, vol. 8, pp. 688-692, 1988.
- [17] B. Hammad, M. Al-Abed, A. Al-Ghandoor, A. Al-Sardeah, and A. Al-Bashir, "Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2218-2234, 2018. doi:10.1016/j.rser.2017.08.070
- [18] M. Mani and R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124-3131, 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.07.065
- [19] A. A. Katkar, N. N. Shinde, and P. S. Patil, "Performance & evaluation of industrial solar cell wrt temperature and humidity," *International Journal of Research in mechanical engineering and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 69-73, 2011.
- [20] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, "Effect of humidity on photovoltaic performance based on experimental study," *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, vol. 10, no. 23, pp. 43572-43577, 2015.
- [21] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, and J. Bagdahn, "Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 98, pp. 239-254, 2018. doi:10.1016/j.rser.2018.09.015
- [22] E. L. Meyer and E. E. Van Dyk, "Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature," *Renewable Energy*, vol. 21, no. 1, pp. 37-47, 2000. doi:10.1016/S0960-1481(99)00124-X
- [23] R. Khenfer, S. Benahdouga, M. Meddad, M. Mostefai, A. Eddiai, and K. Benkhouja, "Effect of temperature on the PV cells and improving their performance by the use of thermo generators," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 627, no. 1, pp. 23-28, 2016. doi:10.1080/15421406.2015.1137141
- [24] K. Agroui, "Indoor and outdoor characterizations of photovoltaic module based on multicrystalline solar cells," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 857-866, 2012. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.100
- [25] F. Wakim, "Introduction of PV power generation to Kuwait," *Kuwait Institute for Scientific Researchers, Kuwait City*, vol. 204,

1981.

- [26] R. Mayfield, "The highs and lows of photovoltaic system calculations," *Renewable Energy Consultants Electrical Construction and Maintenance*, 2012.
- [27] M. Hajji, S. E. Naimi, B. Hajji, A. El Mehdi, and M. L. El Hafyani, "Performance analysis of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 1-6, 2015.
- [28] A. H. H. Ali, S. Eldin, and S. M. Abdel-Gaie, "Effect of dust and ambient temperature on PV panels performance in Egypt," *Jordan Journal of Physics*, vol. 8, no. 2, pp. 113-124, 2015.
- [29] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. M. I. N. Behzadmehr, and M. M. Adeli, "An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector," *Applied energy*, vol. 87, no.7, pp. 2328-2339, 2010. doi:10.1016/j.apenergy.2010.01.001
- [30] E. Simsek, M. J. Williams, and L. Pilon, "Effect of dew and rain on photovoltaic solar cell performances," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 222, p. 110908, 2021. doi:10.1016/j.solmat.2020.110908
- [31] E. Cuce, P. M. Cuce, and T. Bali, "Impact of humidity on current parameters of solar cells," *Journal of Energy Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 84-96, 2018. doi:10.30521/jes.441643
- [32] L. Gao, R. A. Dougal, L. S, and A. P. Iotova, "Parallel-Connected Solar PV system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1548-1556, May 2009. doi:10.1109/tie.2008.2011296.
- [33] T. Hong, M. Lee, C. Koo, J. Kim, and K. Jeong, "Estimation of the available rooftop area for installing the rooftop solar photovoltaic (PV) system by analyzing the building shadow using Hillshade analysis," *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 408-413, Jun. 2016. doi:10.1016/j.egypro.2016.06.013
- [34] N. Mishra, A. S. Yadav, R. K. Pachauri, Y. K. Chauhan, and V. K. Yadav, "Performance enhancement of PV system using proposed array topologies under various shadow patterns," *Solar Energy*, vol. 157, pp. 641-656, Nov. 2017. doi:10.1016/j.solener.2017.08.021
- [35] J. S. Ko and D. Chung, "Control of a novel PV tracking system considering the shadow influence," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 524-529, Jul. 2012. doi:10.5370/jeet.2012.7.4.524
- [36] M.-K. Jang, J.-S. Choi, J.-S. Ko, J.-H. Mun, and D. Chung, "Control of a novel PV tracking system considering the shadow influence," *ICCAS 2010*, Oct. 2010. doi:10.1109/iccas.2010.5669730
- [37] E. Lodhi, R. N. Shafqat, K. K. D. E, and Z. Lodhi, "Application of Particle Swarm Optimization for Extracting Global Maximum Power Point in PV System under Partial Shadow Conditions," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 223-229, Jan. 2017. doi:10.18178/ijeee.5.3.223-229
- [38] J. Ahmed and Z. Salam, "A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 933-953, Jul. 2015. doi:10.1016/j.rser.2015.03.080
- [39] M. Karakose and M. Baygin, "Image processing based analysis of moving shadow effects for reconfiguration in PV arrays," in *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pp. 683-687, May 2014, IEEE. doi:10.1109/energycon.2014.6850500
- [40] H. Taheri, Z. Salam, and K. Ishaque, "A novel maximum power point tracking control of photovoltaic system under partial and rapidly fluctuating shadow conditions using differential evolution," in *2010 IEEE symposium on industrial electronics and applications (ISIEA)*, pp. 82-87, October 2010, IEEE.
- [41] K. Ishaque and Z. Salam, "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 475-488, 2013. doi:10.1016/j.rser.2012.11.032
- [42] Y. Wang, G. Pei, and L. Zhang, "Effects of frame shadow on the PV character of a photovoltaic/thermal system," *Applied energy*, vol. 130, pp. 326-332, 2014. doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.054
- [43] E. Karatepe, T. Hiyama, M. Boztepe, and M. Çolak, "Voltage based power compensation system for photovoltaic generation system under partially shaded insolation conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 8, pp. 2307-2316, 2008. doi:10.1016/j.enconman.2008.01.012
- [44] G. D. Pimentel Da Silva and D. A. C. Branco, "Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts," *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 36, no. 5, pp. 390-400, 2018. doi:10.1080/14615517.2018.1477498
- [45] P. M. Cuce, A. Saxena, E. Cuce, and S. Riffat, "Applications of solar PV tree systems with different design aspects and performance assessment," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 17, pp. 266-278, 2022. doi:10.1093/ijlct/ctac004
- [46] D. Nguyen and B. Lehman, "A reconfigurable solar photovoltaic array under shadow conditions," in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 980-986, 2008.

- [47] R. G. Vieira, F. M. de Araújo, M. Dhimish, and M. I. Guerra, "A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules," *Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2472, 2020. doi:10.3390/en13102472
- [48] S. Saha, S. Akter, K. K. Mahto, P. Das, A. K. Chakraborty, and G. K. Awasthi, "Improvement in power efficiency of photovoltaic array under shading condition using bypass diode," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 6, no. 2, pp. 628-636, 2016.
- [49] E. Roman, R. Alonso, P. Ibanez, S. Elorduizapatarietxe and D. Goitia, "Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1066-1073, June 2006. doi:10.1109/TIE.2006.878327
- [50] M. Kasper, D. Bortis and J. W. Kolar, "Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC-DC Converter Concepts," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 2511-2526, May 2014. doi:10.1109/TPEL.2013.2273399
- [51] C. Deline, "Partially shaded operation of multi-string photovoltaic systems," in *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 000394-000399, 2010.
- [52] B. Dhanalakshmi and N. Rajasekar, "A novel competence square based PV array reconfiguration technique for solar PV maximum power extraction," *Energy conversion and management*, vol. 174, pp. 897-912, 2018. doi:10.1016/j.enconman.2018.08.077
- [53] M. S. S. Nihanth, J. P. Ram, D. S. Pillai, A. M. Ghias, A. Garg and N. Rajasekar, "Enhanced power production in PV arrays using a new skyscraper puzzle based one-time reconfiguration procedure under partial shade conditions (PSCs)," *Solar Energy*, vol. 194, pp. 209-224, 2019. doi:10.1016/j.solener.2019.10.020
- [54] A. S. Yadav, R. K. Pachauri, Y. K. Chauhan, S. Choudhury, and R. Singh, "Performance enhancement of partially shaded PV array using novel shade dispersion effect on magic-square puzzle configuration," *Solar Energy*, vol. 144, pp. 780-797, 2017. doi:10.1016/j.solener.2017.01.011
- [55] B. Dhanalakshmi and N. Rajasekar, "Dominance square based array reconfiguration scheme for power loss reduction in solar PhotoVoltaic (PV) systems," *Energy conversion and management*, vol. 156, pp. 84-102, 2018. doi:10.1016/j.enconman.2017.10.080
- [56] N. Lior, "Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future," *Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 842-857, 2008. doi:10.1016/j.energy.2007.09.009
- [57] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, "The emergence of perovskite solar cells," *Nature photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506-514, 2014. doi:10.1038/nphoton.2014.134
- [58] M. C. Browne, B. Norton, and S. J. McCormack, "Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM," *Solar Energy*, vol. 133, pp. 533-548, 2016. doi:10.1016/j.solener.2016.04.024
- [59] J. Siecker, K. Kusakana, and E. B. Numbi, "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 192-203, 2017. doi:10.1016/j.rser.2017.05.053
- [60] A. G. Lupu, V. M. Homutescu, D. T. Balanescu, and E. A. Popescu, "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 444, no. 8, p. 082016, 2018.
- [61] T. Bergene and O. M. Løvvik, "Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells," *Solar energy*, vol. 55, no. 6, pp. 453-462, 1995. doi:10.1016/0038-092X(95)00072-Y
- [62] H. A. Zondag, D. W. De Vries, W. G. J. Van Helden, R. J. C. Van Zolingen, and A. A. Van Steenhoven, "The yield of different combined PV-thermal collector designs," *Solar energy*, vol. 74, no. 3, pp. 253-269, 2003. doi:10.1016/S0038-092X(03)00121-X
- [63] S. A. Kalogirou and Y. Tripanagnostopoulos, "Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production," *Energy conversion and management*, vol. 47, no. 18-19, pp. 3368-3382, 2006. doi:10.1016/j.enconman.2006.01.012
- [64] S. Nižetić, D. Čoko, A. Yadav, and F. Grubišić-Čabo, "Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response," *Energy conversion and management*, vol. 108, pp. 287-296, 2016. doi:10.1016/j.enconman.2015.10.079
- [65] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. El-Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 869-877, 2013. doi:10.1016/j.asej.2013.03.005
- [66] S. M. Salih, O. I. Abd, and K. W. Abid, "Performance enhancement of PV array based on water spraying technique," *Int. J. Sustain. Green Energy*, vol. 4, no. 16, pp. 8-13, 2015. doi:10.11648/j.ijrse.s.2015040301.12
- [67] Y. Tripanagnostopoulos, "Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems," *Solar energy*, vol. 81, no. 9, pp. 1117-1131, 2007. doi:10.1016/j.solener.2007.04.002
- [68] A. Kroiß, A. Präbst, S. Hamberger, M. Spinnler, Y. Tripanagnostopoulos, and T. Sattelmayer, "Development of a seawater-proof hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector," *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 93-103, 2014. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.058
- [69] Y. Tripanagnostopoulos, T.H. Nousia, M. Souliotis, and P. Yianoulis, "Hybrid photovoltaic/thermal solar systems," *Solar energy*, vol. 72, no. 3, pp. 217-234, 2002. doi:10.1016/S0038-092X(01)00096-2

- [70] A. M. Alshibil, I. Farkas, and P. Víg, "Experimental performance comparison of a novel design of bi-fluid photovoltaic-thermal module using Louver fins," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 4518-4531, 2023. doi:10.1016/j.egy.2023.03.110
- [71] D. Bahrehmand, M. Ameri, and M. J. R. E. Gholampour, "Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with forced convection," *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 1119-1130, 2015. doi:10.1016/j.renene.2015.03.009
- [72] H. Saygin, R. Nowzari, N. Mirzaei, and L. B. Y. Aldabbagh, "Performance evaluation of a modified PV/T solar collector: A case study in design and analysis of experiment," *Solar Energy*, vol. 141, pp. 210-221, 2017. doi:10.1016/j.solener.2016.11.048
- [73] Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis, and D. Patrikios, "Hybrid PV-TC solar systems," *Renewable energy*, vol. 8, no. 1-4, pp. 505-508, 1996. doi:10.1016/0960-1481(96)88908-7
- [74] H. A. Zondag, D. D. de Vries, W. G. J. Van Helden, R. C. van Zolingen, and A. A. Van Steenhoven, "The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector," *Solar energy*, vol. 72, no. 2, pp. 113-128, 2002. doi:10.1016/S0038-092X(01)00094-9
- [75] J. Ji, J. P. Lu, T. T. Chow, W. He, and G. Pei, "A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation," *Applied Energy*, vol. 84, no. 2, pp. 222-237, 2007. doi:10.1016/j.apenergy.2006.04.009
- [76] S. Dubey and G. N. Tiwari, "Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater," *Solar energy*, vol. 82, no. 7, pp. 602-612, 2008. doi:10.1016/j.solener.2008.02.005
- [77] T. T. Chow, G. Pei, K. F. Fong, Z. Lin, A. L. S. Chan, and J. Ji, "Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover," *Applied Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 310-316, 2009. doi:10.1016/j.apenergy.2008.04.016
- [78] R. Hosseini, N. Hosseini, and H. Khorasanizadeh, "An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system," in *World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden*, no. 057, pp. 2993-3000, 2011.
- [79] R. K. Mishra and G. N. Tiwari, "Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode," *Solar energy*, vol. 90, pp. 58-67, 2013. doi:10.1016/j.solener.2012.12.022
- [80] G. Evola and L. Marletta, "Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector," *Solar Energy*, vol. 107, pp. 12-25, 2014. doi:10.1016/j.solener.2014.05.041
- [81] N. Aste, F. Leonforte, and C. Del Pero, "Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) water collector," *Solar Energy*, vol. 112, pp. 85-99, 2015. doi:10.1016/j.solener.2014.11.025
- [82] O. R. Alomar and O. M. Ali, "Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal solar system under climatic condition of North Iraq," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101429, 2021. doi:10.1016/j.csite.2021.101429
- [83] H. P. Garg and R. S. Adhikari, "Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs," *International journal of energy research*, vol. 23, no. 15, pp. 1295-1304, 1999. doi:10.1002/(SICI)1099-114X(199912)23:15%3C1295::AID-ER553%3E3.0.CO;2-T
- [84] A. S. Joshi, A. Tiwari, G. N. Tiwari, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T)(glass-to-glass) system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 1, pp. 154-164, 2009. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001
- [85] C. S. Rajoria, S. Agrawal, and G. N. Tiwari, "Overall thermal energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal array," *Solar Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1531-1538, 2012. doi:10.1016/j.solener.2012.02.014
- [86] L. Rekha, C. V. Vazhappilly, and C. R. Melvinraj, "Numerical simulation for solar hybrid photovoltaic thermal air collector," *Procedia Technology*, vol. 24, pp. 513-522, 2016. doi:10.1016/j.protcy.2016.05.088
- [87] R. Mazón-Hernández, J. R. García-Cascales, F. Vera-García, A. S. Káiser, and B. Zamora, "Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2013, 2013. doi:10.1155/2013/830968
- [88] J. Prakash, "Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water," *Energy Conversion and Management*, vol. 35, no. 11, pp. 967-972, 1994. doi:10.1016/0196-8904(94)90027-2
- [89] A. Tiwari and M. S. Sodha, "Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: a parametric study," *Renewable energy*, vol. 31, no. 15, pp. 2460-2474, 2006. doi:10.1016/j.renene.2005.12.002
- [90] E. Cuce, A. Saxena, P. M. Cuce, H. Sen, H. Eroglu, S. P. Selvanathan, K. Sudhakar, and M. Hasanuzzaman, "Performance assessment of solar chimney power plants with natural thermal energy storage materials on ground: CFD analysis with experimental validation," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 17, pp. 752-759, 2022. doi:10.1093/ijlct/ctac001
- [91] W. K. Hussam, H. J. Salem, A. M. Redha, A. M. Khlefat, and F. Al Khatib, "Experimental and numerical investigation on a hybrid solar chimney-photovoltaic system for power generation in Kuwait," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 15, p. 100249, 2022. doi:10.1016/j.ecmx.2022.100249
- [92] S. Haghghat, A. Kasaeian, F. Pourfayaz, and B. M. Shahdost, "Fluid dynamics analysis for different photovoltaic panel

- locations in solar chimney," *Energy conversion and management*, vol. 191, pp. 71-79, 2019. doi:10.1016/j.enconman.2019.03.053
- [93] S. Jamali, M. Yari, and S. M. S. Mahmoudi, "Enhanced power generation through cooling a semi-transparent PV power plant with a solar chimney," *Energy Conversion and Management*, vol. 175, pp. 227-235, 2018. doi:10.1016/j.enconman.2018.09.004
- [94] G. G. Mohamed, S. Ookawara, N. Sameh, and H. Hassan, "Performance assessment of photovoltaic/thermal (PVT) hybrid adsorption-vapor compression refrigeration system," *Journal of Energy Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 209-220, 2022. doi:10.30521/jes.1002871
- [95] C. Cao, H. Li, G. Feng, R. Zhang, and K. Huang, "Research on PV/T-air source heat pump integrated heating system in severe cold region," *Procedia Engineering*, vol. 146, pp. 410-414, 2016. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.422
- [96] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, "Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1038-1067, 2016. doi:10.1016/j.rser.2016.01.021
- [97] H. Chen, L. Zhang, P. Jie, Y. Xiong, P. Xu, and H. Zhai, "Performance study of heat-pipe solar photovoltaic/thermal heat pump system," *Applied energy*, vol. 190, pp. 960-980, 2017. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.145
- [98] E. Cuce, "Development of innovative window and fabric technologies for low-carbon buildings," *Ph.D. Thesis, The University of Nottingham*, 2014.
- [99] E. Cuce and T. Bali, "Variation of cell parameters of a p-Si PV cell with different solar irradiances and cell temperatures in humid climates," *Fourth International Exergy, Energy and Environment Symposium*, 19-23 April 2009, Sharjah, United Arab Emirates.
- [100] E. Cuce, "Thermodynamic analysis of the effectiveness of different types of PV modules for wet conditions," *M.Sc. Thesis, Karadeniz Technical University*, 2009.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Methodology for Creating a New Bio-Inspired Bone Model

Alkın Yılmaz Akter^{a,b}, Hüdayim Başak^c

Submitted: 16.04.2024 Revised: 25.05.2024 Accepted: 27.05.2024 doi: 10.30855/gmbd.0705A03

ABSTRACT

Keywords: Bio-inspired design, biomimetics, computer-aided design tool, bone structure, lattice

^{a,*} Gazi University,
Graduate School of Natural and Applied
Sciences,
Industrial Design Engineering Program
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5979-4197
e mail: alkin.akter@cbu.edu.tr

^{b,*} Manisa Celal Bayar University,
Hasan Ferdi Turgutlu Technology
Faculty,
Dept. of Mechatronics Engineering
45400 - Manisa, Türkiye

^c Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Industrial Design Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8066-5384

*Corresponding author:
alkin.akter@cbu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Biyo-esinlenme tasarımı, biyomimetik, bilgisayar destekli tasarım aracı, kemik yapısı, kafes yapıları

Bioinspiration is an approach that involves applying the information obtained by examining the structures, systems and processes found in nature to technology and design. This method aims to produce sustainable and innovative solutions to man-made problems by using solutions from nature's millions of years of evolution. Numerous design tools have been developed for use in the bio-inspired design process. However, there are not enough design tools for integrating the biological solution into the design. This study introduces a CAD module named Bone Structure, intended for designers who wish to reduce material and mass in their designs by drawing inspiration from the porous structure of trabecular bone. This module uses lattice structures when creating the bone structure and uses a hybrid modeling method in which random and periodic lattice formation methods are used together when creating the lattice structure. This software establishes a foundation for future studies in this field, and the consistency of geometric properties of example pieces with the characteristics of biological solutions is promising for this module.

Biyo-Esinlenme Tabanlı Yeni Bir Kemik Modeli Oluşturma Metodolojisi

ÖZ

Biyo-esinlenme yaklaşımı, doğada bulunan yapılar, sistemler ve süreçlerin incelenmesiyle elde edilen bilgilerin teknoloji ve tasarıma uygulanmasını içeren bir yaklaşımdır. Bu yöntem, doğanın milyonlarca yıllık evrim sürecinden gelen çözümleri kullanarak insan yapımı sorunlara sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler üretmeyi amaçlar. Biyo-esinlenme tasarımı sürecinde kullanılmak üzere geliştirilmiş birçok tasarım aracı bulunmaktadır. Fakat biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesi aşaması için yeterli tasarım aracı bulunmamaktadır. Bu çalışmada, tasarımında malzeme ve kütle azaltmak için trabeküler kemiğin boşluklu yapısından esinlenmek isteyen tasarımcıların kullanabileceği Bone Structure isimli CAD modülü tanıtılmıştır. Kemik yapısını oluştururken kafes yapıları kullanan bu modül ve kafes yapısını oluştururken rastgele ve periyodik kafes oluşturma yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yazılım, bu alanda yapılacak gelecek çalışmaları için bir temel oluşturmakta ve örnek parçalara ait geometrik özelliklerin biyolojik çözümün özellikleri ile uyuşması bu modül için umut vadetmektedir.

1. Giriş (Introduction)

Biyo-esinlenme yaklaşımı, doğadaki organizmaların geçirdikleri evrimsel süreçler sonucunda hayatta kalmalarını sağlayan sıra dışı özelliklerinin insanlığın karşılaştığı problemlere çözüm olabileceğini savunan bir tasarım yaklaşımıdır. Organizmanın doğada karşılaştığı problemlere getirmiş olduğu çözümlerin ideale yakın olduğu iddiasıyla özgün ve optimum çözümlerin bulunabileceğini savunmaktadır. Bu savı ispatlar nitelikte günümüze kadar birçok biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmiştir [1]. İlk başlarda vakalar üzerinden sistematik olmayan bir şekilde uygulanan bu tasarım yaklaşımı, gün geçtikçe keşfedilen organizmalara ait biyolojik bilginin inovatif çözümler üretebildiği kanıtlandıkça vaka özelinde [2] veya genel metodolojiler geliştirilerek [3] sistematik hale gelmeye başlamıştır. Her ne kadar bu yaklaşıma dair ISO 18458 gibi standartlar oluşturulmuş olsa da doğadan esinlenmenin birçok yolu vardır [4]. Bu sebeple biyo-esinlenme tasarım sürecinde kullanılmak üzere çeşitli tasarım araçları geliştirilmeye devam etmektedir [5].

Organizmaların morfolojik özellikleri sayesinde elde ettikleri fonksiyonların mühendislik problemlerine çözüm olması morfolojik biyo-esinlenme tasarımı olarak tanımlanacak olursa bu yaklaşım da form-odaklı, yüzey-odaklı ve yapı odaklı olarak kategorilere ayrılabilir. Form-odaklı yaklaşım organizmanın biçimi, geometrisi ve estetik özelliklerini kapsayan dış morfolojisi, yüzey-odaklı yaklaşım organizmaya ait yüzeyin yüzey morfolojisi ve yapı-odaklı yaklaşım ise organizmanın biçimini destekleyen iç morfolojisi ile ilgilenmektedir [6].

Biyo-esinlenme tasarım ilkeleri göz önünde bulundurulduğunda biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesine dair CAD yazılımlarının unsurları dışında tasarımcıya tasarım sürecinde yardımcı olacak biyo-esinlenme odaklı tasarım araçları bulunmamaktadır. Bu çalışmada, insan trabeküler kemik yapısı bir yapı odaklı morfolojik biyo-esinlenme çözümü olarak değerlendirilmiş ve bu çözümün tasarıma entegrasyonunda kullanılmak üzere geliştirilmiş yeni bir metot ve Bone Structure CAD yazılımı tanıtılmıştır.

2. Literatür Araştırması (Literature Research)

Biyo-esinlenme yaklaşımının bir tasarım yaklaşımını sistematik hale getirmek için çeşitli metodolojiler ortaya konmuştur [7]. Bu metotlar temelinde problem odaklı ve çözüm odaklı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Problem odaklı yaklaşımda öncelikle bir mühendislik problemi tanımlanır ve daha sonra doğada bu probleme çözüm aranırken, çözüm odaklı yaklaşımda keşfedilen doğadan elde edilmiş bilginin kullanılabilirliği bir mühendislik problemi aranmaktadır [8]. Her iki yaklaşım için de geliştirilmiş sistematik metotlar mevcuttur.

Endüstriyel ürün tasarımı sürecinde organizmanın biçimi, işlevi veya organizmaya ait bir süreci esas alarak problemi biyoloji alanına çekerek çözen [9], bir mühendislik problemini çelişkiler şeklinde tanımlayıp doğadaki çözüm prensiplerini kullanarak çözen [10], tasarım sürecine ürün yaşam döngüsünü de dahil ederek doğaya sorarak çözen [11], biyoloji ile mühendislik tanımlamalarını ayrı terminolojiler ile yapıp sonrasında bu terminolojileri eşleştirerek çözen [12], tasarım optimizasyonu problemini organizmaya ait matematiksel model oluşturarak çözen [13] veya tasarım problemini Konsept-Bilgi teorisini kullanarak çözen [14] problem odaklı metotlar bulunmaktadır. Geliştirilen problem odaklı metotların birçoğu konsept tasarımın elde edilmesine kadar olan sürece odaklansa da tasarımın değerlendirilmesi sürecini de sistematik hale getirmeyi sağlayan metotlar da bulunmaktadır [15-16].

Fayemi'nin biyo-esinlenme tasarım sürecini 4 eylem (analiz, çıkarım, transfer, uygulama) üzerinden anlattığı metodu [17] literatürde büyük öneme sahiptir. Öyle ki bu metot, ISO 18458 nolu standardın ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Çözüm odaklı metotlar çok çeşitlenmesi de Helms ve arkadaşlarının 2009'da tanımladığı "Problem arayışına biyo-çözüm metodu", bir doğa olayının gözlemlenmesinden başlayarak elde edilen bilginin hangi probleme çözüm olabileceğini keşfetmeye ve sonrasında probleme çözüm olabilecek tasarımın gerçekleştirilmesine dayanan bir biyo-esinlenme tasarım metodudur [12].

Biyo-esinlenme tasarım metotlarının temelinde bazı ilkeler bulunmaktadır. Problemin tespiti ya da tanımlanması, teknik bir dil ile sadeleştirilmesi, biyolojik çözümün bulunması, biyolojik çözümün

sadeleştirilmesi, bilgi aktarımı, biyolojik bilginin tasarıma entegre edilmesi ve tasarımın değerlendirilmesi şeklindeki işlemler biyo-esinlenme tasarım ilkeleri (BETİ) olarak nitelendirilebilmektedir. Çalışmada BETİ olarak bahsedilen ilkeler literatürde vazifeler ve süreçler [18], faaliyetler [19], adımlar [12, 17] şeklinde yer almaktadır. Bu ilkeler aşağıdaki gibidir:

- Problemin tespit edilmesi ya da tanımlanması
- Problemin sadeleştirilmesi (Teknik bilginin çıkarılması)
- Biyolojik çözümün bulunması
- Organizmanın sadeleştirilmesi (Biyolojik bilginin çıkarılması)
- Bilginin aktarılması
- Biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesi
- Tasarımın değerlendirilmesi

Biyo-esinlenme tasarım sürecinde, bahsedilen tasarım ilkelerinin gerçekleşme sırası değişiklik gösterebilmektedir. Problem odaklı ve çözüm odaklı yaklaşımlar buna örnek gösterilebilir.

2.1. Bilgisayar destekli biyo-esinlenme tasarım araçları (Computer aided bio-inspired design tools)

Biyo-esinlenme tasarım araçları, BETİ'nin bir veya birkaçının gerçekleştirilmesini sağlayan ve tasarımcının problemine çözüm bulmada yardımcı olan tasarım araçlarıdır. Yukarıda bahsi geçen BETİ'nin tasarım sürecinde gerçekleştirilmesi sırasında ortaya çıkmış birçok tasarım aracı bulunmaktadır [5]. Fakat Appio'ya göre tasarımcılar, bu tasarım araçlarından haberdar olmadıkları için, tasarım sürecinde biyo-esinlenme yaklaşımına ihtiyaç duyduklarında bir uzmana danışmayı tercih etmektedir [20]. Biyo-esinlenme tasarım sürecini tasarımcılar için uzmana ihtiyaç duyulmayacak şekilde kolaylaştırmanın bir yolu bilgisayar yazılımları kullanmaktır.

Problem odaklı biyo-esinlenme tasarımının ilk adımı problemin tespit edilmesi veya halihazırda tespit edilmiş bir problemin teknik olarak tanımlanması sürecidir. Problemin tespiti ya da tanımı için doğal dil analizi [21] veya önceden eğitilmiş dil modelleri (PLM) [22] kullanılabilir. Arka planda kullanılan ontoloji modeline göre tasarımcıdan girdiler alarak problem tanımı oluşturan yazılımlar da mevcuttur [23].

Problemin sadeleştirilmesi, biyo-esinlenme tasarım sürecinde tasarımcının karşılaştığı probleme en uygun çözümleri bulabilmesi adına oldukça önem arz eden bir aşamadır. Bu aşamada problem, bir mühendislik problemi olarak problemin özündeki teknik gereksinim ortaya çıkarılarak tanımlanmaktadır. SAPPPhIRE [24], DANE [25] veya UNO-BID [26] gibi ontoloji modelleri hem organizmanın hem de problemin teknik tanımının yapılmasına imkân sağlamaktadır. Bunun yanında bu aşamada çeşitli fonksiyon taksonomileri [27-28] ve bununla birlikte doğal dil analiz metodlarının [29] kullanımı da söz konusu olabilmektedir.

Biyolojik çözümün bulunması, organizmalara dair şimdiye kadar keşfedilmiş tüm bilgiler içerisinde bir problemi çözmek için ihtiyaç duyulan bilgiyi elde etmeyi ifade etmektedir. DANE ya da SAPPPhIRE ontoloji modelleri veya Biomimicry taksonomi gibi fonksiyon sınıflandırmaları ile oluşturulmuş biyolojik bilgi veri tabanları [23, 28, 30-32] biyolojik çözüm bulmaya imkân tanıyan tasarım araçları arasındadır. Bunun yanı sıra anahtar kelimeler yardımıyla akademik çalışmalar arasında tarama yapan biyo-esinlenme tasarımı için özelleşmiş arama motorları da tasarımcıya biyolojik çözüm bulma konusunda yardımcı olmaktadır [33].

Organizmanın sadeleştirilmesi, keşfedilmiş organizmalara dair biyolojik bilginin esinlenme sürecinde problemle daha kolay eşleştirilebilmesi için sistematik olarak ontoloji modelleri veya çeşitli sınıflandırmalar yapılarak yeniden tanımlanmasını ifade etmektedir. Problem teknik tanımlaması için kullanılan tasarım araçları bu aşamada da kullanılabilir.

Bilginin aktarılması, biyolojik bilginin tasarımın yapıldığı alana transfer edilmesini ve konsept fikirlerin oluşturulmasını ifade etmektedir. Biyo-esinlenme vaka çalışmaları [30] ya da piyasaya sürülmüş son ürünlerin yer aldığı veri tabanları [32], bünyesindeki biyolojik bilginin tasarım ile bulunduğu biyo-esinlenme tasarım örnekleri ile tasarımcılara yeni tasarım fikirleri oluşturma imkânı tanımaktadır. Bunun yanı sıra TRIZ çelişki matrisinin biyo-esinlenme tasarımı için yeniden düzenlenmesi ile elde

edilen BioTRIZ aracı tasarım çelişki problemlerine biyolojik çözümler getirerek özgün tasarım fikirleri oluşturma konusunda tasarımcılara destek olmaktadır [10].

Biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesi, mühendislik tasarımı göz önünde bulundurulduğunda oluşturulan konsept tasarımların üretime hazır hale getirilmesini ifade etmektedir. Bu süreçte CAD yazılımları bir araç olarak kullanılsa da literatürde biyo-esinlenme yaklaşımı odaklı bir CAD yazılımı veya modülü bulunmamaktadır. Kafes yapıların oluşturulmak üzerine geliştirilmiş nTop [34] veya Rhino Grasshopper [35] gibi yazılımlar her ne kadar biyo-esinlenme tasarımına katkı sağlasa da bu amaçla oluşturulmamıştır. Bu sebeple, biyo-esinlenme tasarımları geleneksel CAD unsurları kullanılarak oluşturulmaktadır.

Tasarımın değerlendirilmesi, ortaya çıkan tasarımın bilgisayar destekli mühendislik yöntemleri ile analiz edilerek son ürün haline getirilmesi ve çevresel veya sosyal etkilerinin araştırılması gibi süreçleri ifade etmektedir. Literatürde tasarımların analizini tasarım sürecine dahil eden metotlar bulunmaktadır [15-16]. Fakat biyo-esinlenme tasarımı için özelleştirilmiş tasarım araçları söz konusu olduğunda biyo-esinlenme tasarımlarının çevreye etkilerini değerlendiren BiomiMETRIC yazılımı [36] dışında literatürde çalışma bulunmamaktadır.

2.2. Morfolojik biyo-esinlenme tasarımı (Morphological bio-inspired design)

Nagel biyo-esinlenme boyutlarını 7 kategoriye ayırmıştır. Bunlar, organizmanın görsel özelliklerine odaklanılan form, organizmanın iç morfolojisine odaklanan yapı, organizmanın yüzey morfolojisine odaklanan yüzey, organizmanın malzeme özelliklerine odaklanan malzeme, organizmadaki sistemlerin fizyolojisine odaklanan fonksiyon, organizmaların adım adım ilerleyen davranışlarına odaklanan süreç ve organizmaya ait üst seviye prensiplere, stratejilere ya da fonksiyonlara odaklanan sistem kategorileridir [6]. Organizmanın morfolojisine odaklanan form, yapı ve yüzey, bu çalışmada morfolojik biyo-esinlenme boyutları olarak ifade edilmektedir.

Robot uzuvları oluşturma [37], su ortamında itiş gücü elde etme [38], darbe kaynaklı enerji sönümü [39], bir ortamdan diğerine geçiş sırasında ivme kaybını azaltma [40], kazı parçaları üzerindeki gerilme ve deformasyonu azaltma [41] gibi problemlerin çözümü için form odaklı biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Enerji soğurma [42-43], malzeme azaltırken dayanım arttırmak için boşluklu yapı oluşturma ve topolojik optimizasyon [35,44] gibi amaçlar için yapı odaklı biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Kendi kendini temizleme [45], hidrofobi [46-48], yapışma ve aşınma azaltma [49], bölgesel akış türbülansını azaltma [50], eşyönsüz sürtünme oluşturma [51-52] gibi amaçlar için yüzey odaklı biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmektedir.

2.3. Morfolojik biyo-esinlenme tasarım sürecine CAD yazılımlarının etkisi (The effect of CAD softwares on morphological bio-inspired design process)

Biyo-esinlenme tasarım araçları endüstri profesyonelleri tarafından yüksek derecede değer görürken, CAD yazılımlarının bu süreçte sağladığı esneklik ve araç çeşitliliği, tasarım ve geliştirme süreçlerinin daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır. Özellikle, biyolojik algoritmaların uygulanmasıyla CAD yazılımları, taşıyıcıların optimum profil değerlerinin belirlenmesi gibi tasarım optimizasyonlarına imkân sağlayabilmektedir. Bu durum, doğadan ilham alan stratejiler aracılığıyla tasarım çözümlerinin geliştirilmesinde CAD yazılımlarının potansiyelini göstermektedir.

Katmanlı imalat teknolojisinin gelişmesiyle kafes yapılara dair unsurlar CAD yazılımlarına entegre edilmeye başlamıştır (nTop ve Rhino Grasshopper). Fakat literatürde matematiksel modellemesi yapılmamış biyolojik modellerin [53] başka bir tasarımcı tarafından tekrarlanabilmesi ve kendi problemlerine göre uyarlayabilmesi için biyo-esinlenme tasarımına özgü CAD unsurlarına dair çalışma bulunmamaktadır.

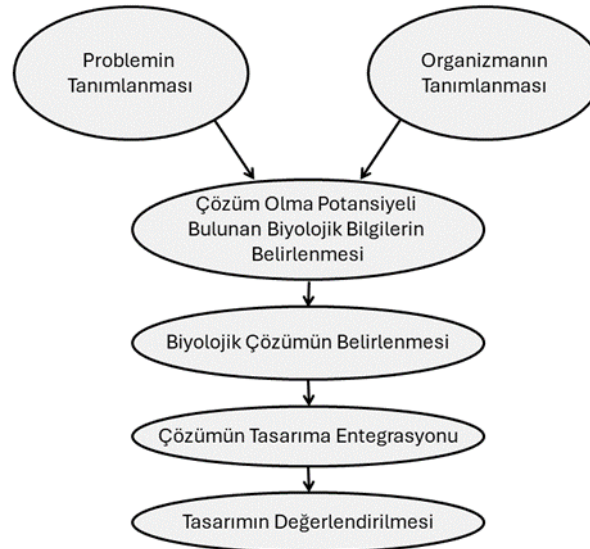
Literatürdeki morfolojik biyo-esinlenme tasarım süreçleri incelendiğinde form, yüzey ve yapı odaklı tasarımlarda yapılan işlemler ve bu işlemler için kullanılan bilgisayar teknolojisi Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Morfolojik biyo-esinlenme sürecinde yapılan işlemler ve bu işlemleri gerçekleştirmek için kullanılan bilgisayar teknolojileri (Procedures performed in the morphological bio-inspiration process and computer technologies used to perform these operations)

Esinlenme Boyutu	İstenen İşlem	Bilgisayar Teknolojisi	Kaynak
Form odaklı	Canlı formunun dijital kopyasının elde edilmesi	MRI ile DICOM uzantılı dosyalar elde edilmiştir. 3D tarama ile STL uzantılı nokta bulutu elde edilmiştir.	[37] [41]
	Dijital kopya üzerinden eğri yerleştirme işlemi	MATLAB ile eğrilerin matematiksel formülü elde edilmiştir.	[37]
	Mesh modelin oluşturulması ve düzenlenmesi	Geomagic Design X ile STL uzantılı dosyalar düzenlenmiştir.	[41]
	Katı modelin oluşturulması	Solidworks ile 3 boyutlu katı model oluşturulmuştur.	[41]
Yüzey odaklı	Canlı formunun dijital kopyasının elde edilmesi	X-Ray CT yüzey morfolojisi dijital ortama aktarılmıştır.	[50]
	Canlı formun geometrisinin incelenmesi	SEM ile organizmanın iç morfolojisi incelenerek ölçümler yapılmıştır.	[42]
Yapı odaklı	Canlı formunun dijital kopyasının elde edilmesi	CT ile elde edilen DICOM uzantılı dosya InVesalium ile STL uzantılı nokta bulutuna dönüştürülmüştür.	[53]
	Mesh modelin oluşturulması ve düzenlenmesi	Rhinoceros – Grasshopper ile parametrik mesh yapısı oluşturulmuştur. K3DSurf ile matematik modeli üzerinden mesh modeli oluşturulmuştur.	[35] [35]
	Vokselizasyon	MATLAB ile kafes yapısının birim hücreleri oluşturulmuştur.	[54]
	Katı modelin oluşturulması	nTop ile kafes yapısı oluşturulmuştur.	[55-56]

3. Metodoloji (Methodology)

Şekil 1’de gösterilen biyo-esinlenme tasarım metodu göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmada, morfolojik biyo-esinlenme tasarım sürecinin çözümün tasarıma entegrasyonu adımıyla kullanılmak üzere bir tasarım aracı geliştirilmiştir. Bu sebeple bu çalışmada bahsedilen biyo-esinlenme tasarımı kavramı morfolojik biyo-esinlenme tasarımı için kullanılmaktadır.



Şekil 1. Biyo-esinlenme tasarım metodu (Bio-inspired design method)

Organizmanın tanımlanması, halihazırda keşfedilmiş olan organizmalara ait biyolojik bilginin çeşitli sınıflandırmalar veya ontolojik tanımlama modelleri kullanılarak tanımlanmasını ifade etmektedir. Bu sayede, bir probleme çözüm arandığında ya da özgün bir tasarım fikri bulunmak istendiğinde organizmaların tanımlandığı veri tabanları taranabilmektedir.

Problemin tanımlanması, genellikle organizmanın tanımlanması sırasında kullanılan tanımlama

yöntemine göre yapılan tanımlamaları ifade etmektedir. Problemin özündeki teknik gereksinimin doğru tespit edilmesi sürecin en önemli noktalarından bir tanesidir.

Çözüm olma potansiyeli olan biyolojik bilgilerin belirlenmesi, tanımlaması yapılmış problem ve bu probleme potansiyel çözüm olabilecek biyolojik bilgilerin ortaya çıkarılmasını ifade etmektedir.

Biyolojik çözümün belirlenmesi, bir tasarım problemine çözüm olabilecek potansiyel biyolojik bilgiler arasından seçim yapılarak bu biyolojik bilgiyi bir esinlenme çözümüne diğer bir deyişle biyolojik çözüme dönüştürmeyi ifade etmektedir. Biyolojik çözüm belirlendikten sonra bu sayede konsept tasarım fikirleri ortaya konmaktadır.

Çözümün tasarıma entegrasyonu, biyolojik çözüm elde edilip konsept tasarım fikri oluşturulduktan sonra üretilebilir ürün tasarımının oluşturulmasını ifade etmektedir. Biyolojik çözümün tasarıma entegrasyonu ile test edilmeye hazır bir ürün ortaya konmaktadır.

Tasarımın değerlendirilmesi, ortaya çıkan ürünün CAE metotları gibi çeşitli analizler veya prototip oluşturularak yapılan deneyler ile test edilmesini ve son haline getirilmek üzere optimize edilmesini ifade etmektedir.

3.1. Biyolojik çözüm (Biological solution)

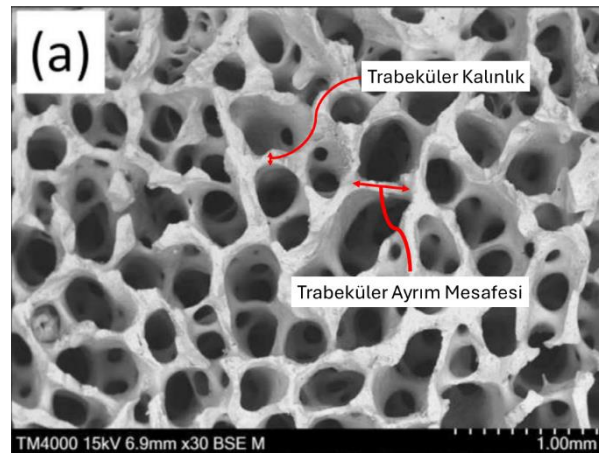
Memelilerin kemik yapısını oluşturan boşluklu yapı sayesinde yapının birim kütledeki dayanımı tamamen dolu yapılara göre daha yüksek olabilmektedir [57]. Kemığın bu boşluklu yapısı matematik modeli oluşturulabilecek düzenli bir yapı olmadığı için bu yapılara benzer mekanik özellikler gösteren periyodik [58] ve rastlantısal [59] kafes yapıları literatürdeki birçok çalışmada kemik yapısını taklit etmek için kullanılmıştır.

Memelilerde farklı morfolojik ve yapısal özelliğe sahip birçok kemik bulunmaktadır. Bundan sonra, insan trabeküler kemiğinin yapısından kemik yapısı olarak bahsedilecektir. Kemik yapısına ait esinlenmede esas alınan geometrik özellikler Çizelge 2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2. Kemik yapısının esinlenmede kullanılan geometrik özellikleri
(Geometric features of bone structure used for inspiration)

Geometrik Özellik	Miktar	Birim
Porozite oranı [60]	0,75-0,86	-
Trabeküler kalınlık [60]	0,3-2,2	mm
Trabeküler ayırım mesafesi [60]	0,2-1,5	mm

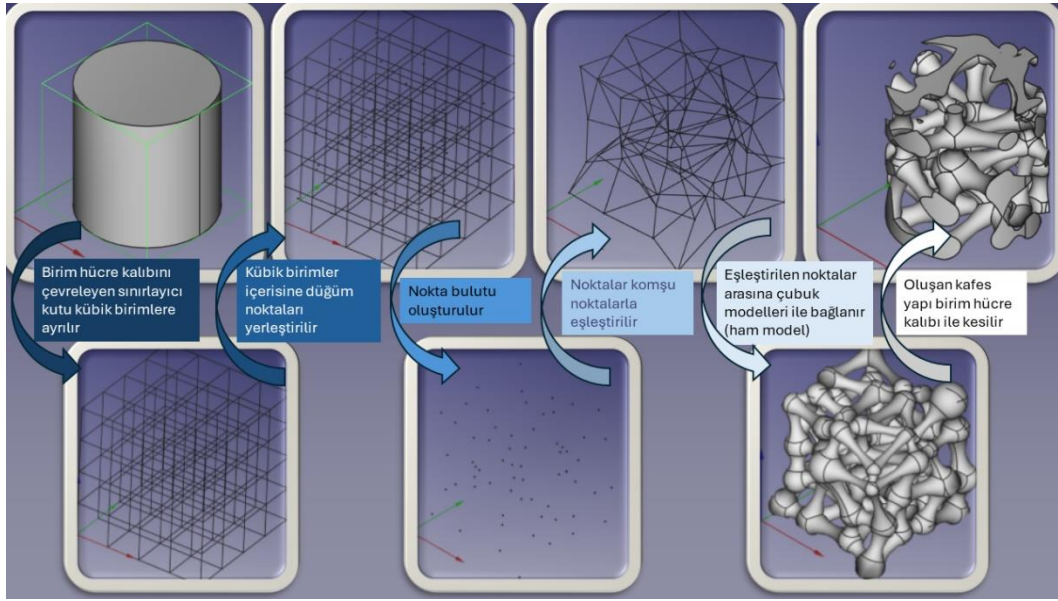
Çizelge 2’deki; porozite oranı kemik yapısındaki boş hacmin kemik hacmine oranını, trabeküler kalınlık trabeküler boşlukların duvar kalınlığını, trabeküler ayırım mesafesi ise trabeküler boşlukların duvar uzunluğunu ifade etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Trabeküler kemik SEM görüntüsü. Uyarlandı. [60]
(Trabecular bone SEM image. Adapted from [60])

3.2. Birim hücrenin oluşturulması (Creating the unit cell)

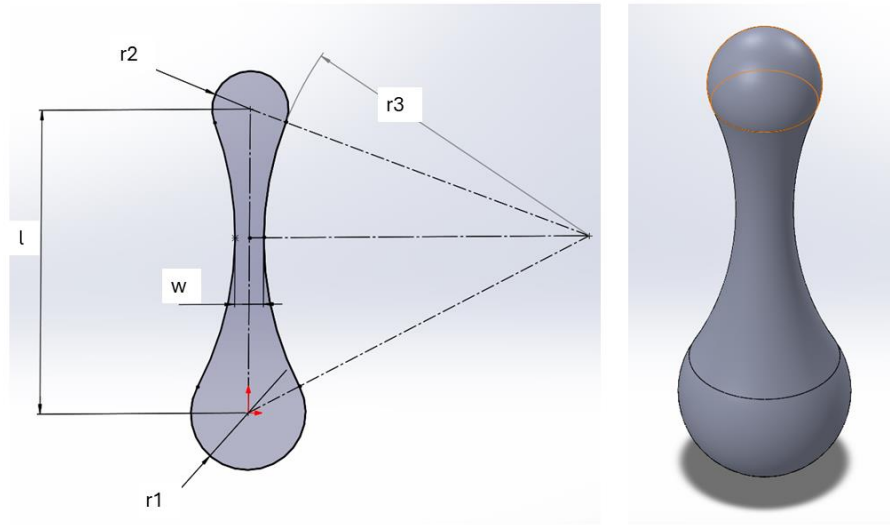
Bu çalışmada kemik yapısı rastlantısal kafes yapısı tekniği oluşturulmuş birim hücrelerin periodik olarak bir araya getirilmesi ile elde edilmiştir. Bu süreçteki ilk adım birim hücrenin rastlantısal bir yöntem ile elde edilmesidir. Bu çalışmada, küp, piramit ve silindir olmak üzere 3 çeşit birim hücre kalıbı kullanılmaktadır. Küp şeklindeki birim hücre kalıbı $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ölçülerinde, piramit şeklindeki birim hücre kalıbı tabanı $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ yüksekliği 2 mm ve koniklik açısı 30° olacak şekilde ve silindir şeklindeki birim hücre kalıbı taban çapı 4 mm ve yüksekliği 2 mm olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 3. Örnek birim hücrenin oluşma şeması
(Formation diagram of the sample unit cell)

Birim hücre yapısı düğümler ve çubuklardan oluşan bir kafes yapısı şeklindedir. Öncelikle, birim hücrenin içerisine girebileceği sınırlayıcı kutu (*bounding box*) $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ kübik birimlere ayrılır. Kafes yapısının düğüm noktaları bu kübik birimler içerisinde küpün kenarına $0,1\text{ mm}$ 'den daha yakın olmayacak ve her bir küpte bir tane olacak şekilde rastgele olarak yerleştirilir. Bu şekilde kısmi olarak rastgele yerleştirilmiş bir nokta bulutu elde edilir. Birbirine x, y ve z doğrultusunda komşu olan kübik birimler içerisindeki düğüm noktaları çiftler halinde eşleştirilerek çubuk bağlantıları oluşturulur.

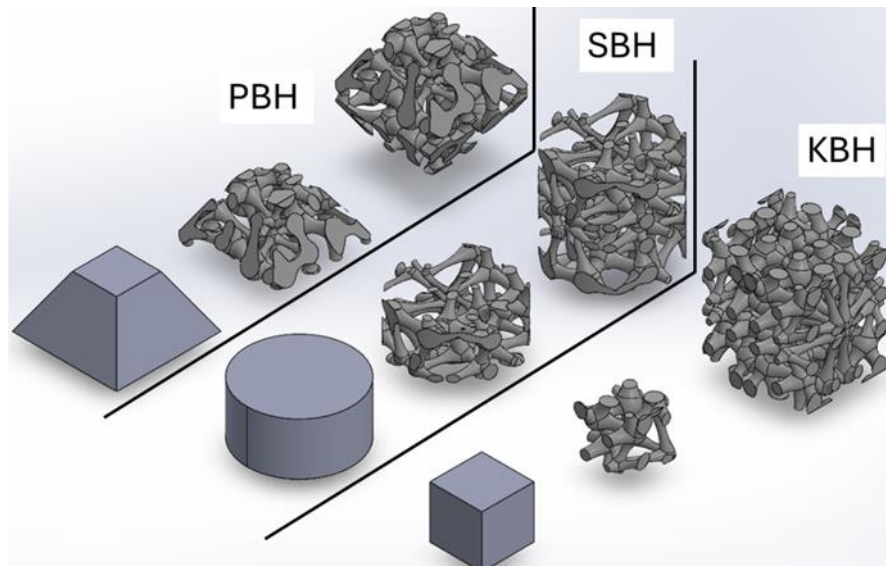
Düğüm noktalarını birbirine bağlayan çubuk elemanları parametrik olarak modellenmektedir. Çubuk modellemede esas alınan parametreler; birinci düğümün yarıçapı (r_1), ikinci düğümün yarıçapı (r_2), minimum çubuk genişliği (w) ve çubuk uzunluğudur (l) (Şekil 3). Nokta bulutundaki komşu noktaların arasındaki mesafeler ($0,2 - 1,8\text{ mm}$) çubuk uzunluğunu (l), bir düğüm noktası ile komşu noktalar arasındaki en kısa mesafenin $1/3$ 'ü o düğüm küresinin yarıçapını (r) ve bir çubuğa ait iki düğüm küresi yarıçapı (r_1 ve r_2) arasında küçük olan yarıçap değeri çubuk genişliğini (w) belirlemektedir.



Şekil 4. Örnek çubuk ve kesiti
(Sample strut and its cross section)

Nokta bulutundaki her noktanın eşleştirildiği diğer noktalar ile arasına Şekil 4'te kesiti verilen içbükey çubuk modelleri yerleştirilip bu parçalar bütünleştirildiğinde birim kafes yapının ham hali oluşur. Ortaya çıkan ham kafes yapısı merkezine birim hücre kalıbı yerleştirilip kesişim geometrisi çıkarılarak birim hücre elde edilir (Şekil 3).

Bu yöntem ile küp şeklinde birim hücreler oluşturulabildiği gibi kemik yapısının uygulanacağı parçanın geometrisine küp, silindir ya da piramit şeklinde birim hücre kullanılabilir. Ayrıca bu birim hücreler çeşitli simetri düzlemleri kullanılarak periyodik çoğaltmaya uygun hale getirilebilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Küp, silindir ve piramit hücre kalıpları ve oluşturulan kemik yapıları
(Cube, cylinder and pyramid cell molds and bone structures created)

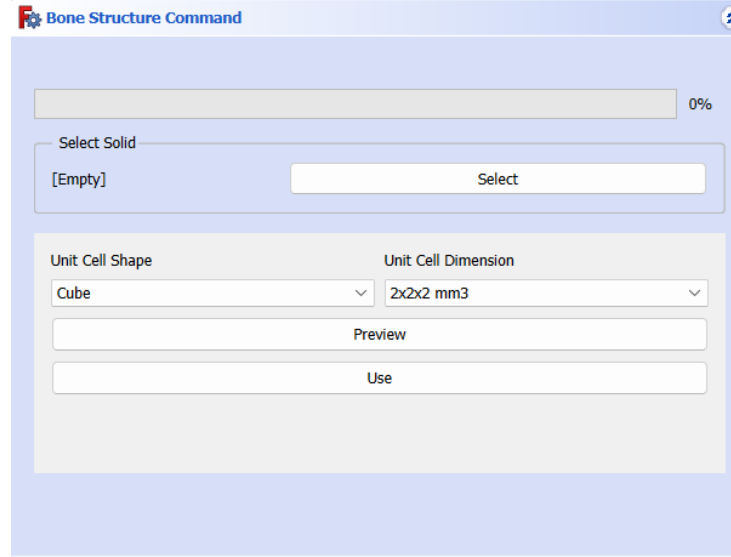
4. Bone Structure Yazılımı (Bone Structure Software)

Bone Structure, kemik yapısının morfolojik özellikleri ile yapı odaklı biyo-esinlenme tasarımları oluşturmak için kullanılan bir FreeCAD modülüdür. Python dilinde yazılmıştır. Başlık 3.2'de anlatılan yöntem ile kemik yapısı oluşturmayı sağlamaktadır. Bu modül ile oluşturulan birim hücreler periyodik şekilde çoğaltılıp birleştirilerek daha büyük modellerin oluşturulmasına imkân sağlamaktadır. Kafes yapısı boşluk oranı, minimum ve maksimum çubuk genişliği ile birlikte minimum ve maksimum çubuk uzunluğu, oluşturulan modellerin kemik yapısının geometrik özelliklerine benzerliği açısından dikkat

edilen kriterlerdir.

4.1. Bone Structure arayüzü (Bone Structure interface)

Yazılımın arayüzü bir adet ilerleme çubuğu, kemik yapısı entegre edilmek istenen parçanın seçildiği bir bölüm, kullanılacak birim hücrenin ön izlemesini gösteren bir düğme ve nihai yapıyı oluşturmayı sağlayan bir düğmede oluşmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Bone Structure yazılım arayüzü (Bone Structure software interface)

Tasarımcı STEP formatında yüklediği parçayı seçip “Select” düğmesi ile seçimi tamamladıktan sonra kemik yapısının oluşturulmasında kullanılacak birim hücre biçimi ve birim hücre boyutunu seçimini gerçekleştirir. Yapılan tanımlamalara göre 3. Başlıkta anlatılan metot ile o anda oluşturulan birim hücreyi görüntülemek için “Preview” düğmesine basılır. Tasarımcı oluşan birim hücrede oluşmuş olabilecek komplikasyonlara karşı denetimini bu aşamada yapmaktadır. Yeni bir birim hücre oluşturulması gerekmesi durumunda “Preview” düğmesine tekrar basarak yeni bir birim hücre modeli oluşturulabilir. Oluşan birim hücrenin kullanıma uygun olduğuna karar verildiğinde “Use” düğmesine basılarak kemik yapısı parçaya entegre edilir.

4.2. Örnek birim hücreler (Sample unit cells)

Küp, silindir ve piramit biçimindeki birim hücrelerin kemik yapısına benzerliğini incelemek için her bir birim hücre biçiminden üç adet model oluşturulmuştur. Küp şeklindeki birim hücre modellerine KBH, piramit şeklindeki birim hücre modellerine PBH ve silindir şeklindeki birim hücre modellerine SBH kod adı verilmiştir (Şekil 5). Bone Structure yazılımı ile üretilmiş numunelere ait geometrik bilgiler Çizelge 3’te gösterilmiştir. Çizelgede yer alan ölçümler, birim hücre oluşturulurken kullanılan çubukların uzunluk (l) ve genişlik (w) değerlerinin en küçük ve en büyük değerleridir. Dolayısıyla bu değerler model oluşturulurken kayıt altına alınmaktadır.

Çizelge 3. Bone Structure ile oluşturulan hücre modellerinin geometrik özellikleri
(Geometric properties of cell models created with Bone Structure)

Birim Hücre Numuneleri	Yaklaşık Boşluk Oranı	Minimum çubuk genişliği (μm)	Maksimum çubuk genişliği (μm)	Minimum çubuk uzunluğu (μm)	Maksimum çubuk uzunluğu (μm)
KBH1	0,72	205	450	493	1833
KBH2	0,77	173	515	415	1851
KBH3	0,78	141	510	339	1781
PBH1	0,73	138	485	333	1841
PBH2	0,75	150	481	361	1908
PBH3	0,72	163	527	392	1854
SBH1	0,78	147	490	353	1839
SBH2	0,77	151	586	362	1832
SBH3	0,72	152	615	365	1846

Oluşturulan hücre modellerinin geometrik özellikleri Çizelge 2’deki kemik yapısının geometrik

özellikleri ile büyük ölçüde eşleşmektedir. Tüm modellerdeki değerlerin ortalaması alındığında modellerin boşluk oranı (0,75) ile insan trabeküler kemiğinin boşluk oranına ait sınır değerler içerisinde yer almaktadır. Diğer yandan ortalama minimum çubuk kalınlığı (158 μm) kemik yapısında bulunan minimum trabeküler kalınlığın yaklaşık %50 oranında altında kalmaktadır. Ortalama maksimum çubuk kalınlığı (518 μm) ve ortalama minimum çubuk uzunluğu (379 μm) kemik yapısının değerleri ile örtüşürken ortalama maksimum çubuk uzunluğu (1843 μm) maksimum trabeküler ayırım mesafesinin %23 üzerindedir.

5. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

Kemik yapısını taklit eden boşluklu yapı oluşturmayı sağlayan bu metod, rastgele oluşturulan düğüm noktalarının çubuklarla birbirine bağlanması yoluyla elde edilen birim hücrelerin periyodik olarak çoğaltılması ile kemik yapısının büyük boyutlarda oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu metod ile başka morfolojik özelliklere sahip kafes yapıları ile temsil edilebilecek başka canlılara ait boşluklu yapılar da modellenilebilir. Çünkü birim hücredeki düğüm noktalarının konumları belirli kısıtlar altında rastgele oluşturulmaktadır. Bu durum yapının morfolojik özelliklerini kontrol edebilmeyi mümkün kılmaktadır. Oluşturulan birim hücrelerde zaman zaman bağımsız havada süzülen küçük parçalar oluşabilmektedir. Bu sebeple bu prototipte tasarımcıya birim hücreyi kullanmadan önce kontrol etme imkânı sunulmuştur.

Bone Structure yazılımı bir prototiptir. Fakat özgün kemik yapısı oluşturulma metodu ile kayda değer bir çalışmadır. Yazılımın geliştirildiği CAD programı olarak açık kaynak kodlu FreeCAD yazılımının tercih edilmesinin sebebi, bu çalışma sonrasında bu alanda çalışma yapan araştırmacıların yazılıma ve kaynak kodlarına erişiminin sağlanarak programın bilinirliğini arttırmaktır. Çalışmanın devam etmesi sebebiyle, yazılıma erişim bu makale yazıldığı sırada mümkün olmamakla birlikte çalışmanın tamamlanması itibarıyla FreeCAD eklentileri arasında yerini alması planlanmaktadır.

Modeli oluştururken kullanılan çubuk profili ve çubuk geometrisine ait parametrelerde yapılacak optimizasyon ile bu çalışmada tanıtılan kemik yapısı modelleme metodu iyileştirmeye açık ve umut vadeden bir metottur. Bu modellerin kemik yapısının yapısal özellikleri ile ne derece benzerlik gösterdiği sonraki çalışmalarda araştırılacaktır. Ayrıca, yapısal özelliklere yapıyı oluşturmada kullanılan çubuk uzunluğu (l), çubuk genişliği (w), düğüm küresi yarıçapı (r_1 ve r_2) ve çubuk profili (içbükey) gibi parametrelerin etkisini incelemek amacıyla optimizasyon çalışması gelecekte yapılabilecek çalışmalar arasındadır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Y. Bar-Cohen, *Biomimetics: nature-based innovation*. CRC press, 2016.
- [2] S. Jalali, M. Aliabadi, and M. Mahdavinejad, "Learning from plants: a new framework to approach water-harvesting design concepts," *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 40, no. 3, pp. 405–421, May 2022. doi:10.1108/IJBPA-01-2021-0007
- [3] D. A. Coelho and C. A. M. Versos, "A comparative analysis of six bionic design methods," *Int. J. Design Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 114–131, 2011. doi:10.1504/IJDE.2011.045131
- [4] J. F. V. Vincent, "Stealing Ideas from Nature," in *Deployable structures*, Springer, 2001, pp. 51–58.
- [5] K. Wanieck, P. E. Fayemi, N. Maranzana, C. Zollfrank, and S. Jacobs, "Biomimetics and its tools," *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, vol. 6, no. 2, pp. 53–66, Aug. 2016. doi:10.1680/jbibn.16.00010
- [6] J. K. S. Nagel, L. Schmidt, and W. Born, "Fostering Diverse Analogical Transfer in Bio-Inspired Design," in *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Boston, Massachusetts, USA, 2015. doi:10.1115/DETC2015-47922
- [7] C. A. M. Versos and D. A. Coelho, "Biologically Inspired Design: Methods and Validation," in *Industrial Design – New Frontiers*, D. Coelho, Ed., InTech, 2017, pp. 101–120. doi:10.5772/20326
- [8] N. Tan et al., "A system-of-systems bio-inspired design process: Conceptual design and physical prototype of a reconfigurable

robot capable of multi-modal locomotion," *Front Neurobot*, vol. 13, 2019. doi:10.3389/fnbot.2019.00078

- [9] W. K. Junior and A. S. Guanabara, "Methodology for product design based on the study of bionics," *Mater Des*, vol. 26, no. 2, pp. 149–155, Apr. 2005. doi:10.1016/j.MATDES.2004.05.009
- [10] J. F. V. Vincent, O. A. Bogatyreva, N. R. Bogatyrev, A. Bowyer, and A. K. Pahl, "Biomimetics: Its practice and theory," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 3, no. 9. Royal Society, pp. 471–482, Aug. 22, 2006. doi:10.1098/rsif.2006.0127
- [11] D. Baumeister, "Biomimicry resource handbook, life's principles, and biomimicry spirals," Missoula MT, USA: Biomimicry Group Inc, 2012.
- [12] M. Helms, S. S. Vattam, and A. K. Goel, "Biologically inspired design: process and products," *Des Stud*, vol. 30, no. 5, pp. 606–622, Sep. 2009. doi:10.1016/j.destud.2009.04.003
- [13] B. Yang and W. Yan, "Methods of obtaining, verifying, and reusing optimal biological solutions," *Cogent Eng*, vol. 4, no. 1, Jan. 2017. doi:10.1080/23311916.2017.1306951
- [14] C. F. Salgueiredo, "Modeling biological inspiration for innovative design," in *i3 conference*, 2013.
- [15] J. Y. Huang and S. T. Siao, "Development of an integrated bionic design system," *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 310–327, 2016. doi:10.1108/JEDT-08-2014-0057
- [16] G. Cao, Y. Sun, R. Tan, J. Zhang, and W. Liu, "A function-oriented biologically analogical approach for constructing the design concept of smart product in Industry 4.0," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 49, Aug. 2021. doi:10.1016/j.aei.2021.101352
- [17] P.-E. Fayemi, N. Maranzana, A. Aoussat, and G. Bersano, "Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools," in *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference*, Dubrovnik - Croatia, 2014, pp. 173–182.
- [18] A. K. Goel, S. Vattam, B. Wiltgen, and M. Helms, "Information-Processing Theories of Biologically Inspired Design," in *Biologically Inspired Design*, Springer London, 2014, pp. 127–152. doi:10.1007/978-1-4471-5248-4_6
- [19] T. A. Lenau, A.-L. Metzke, and T. Hesselberg, "Paradigms for biologically inspired design," *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, Mar. 2018, p. 1. doi:10.1117/12.2296560
- [20] F. P. Appio, S. Achiche, A. Martini, and C. Beaudry, "On designers' use of biomimicry tools during the new product development process: an empirical investigation," *Technol Anal Strateg Manag*, vol. 29, no. 7, pp. 775–789, 2017. doi:10.1080/09537325.2016.1236190
- [21] G. Cascini and D. Russo, "Computer-Aided analysis of patents and search for TRIZ contradictions," *Int. J. Product Development*, vol. 4, no. 1–2, pp. 52–67, 2006. doi:10.1504/IJPD.2007.011533
- [22] Q. Zhu, X. Zhang, and J. Luo, "Biologically inspired design concept generation using generative pre-trained transformers," *Journal of Mechanical Design*, vol. 4, no. 145, pp. 1–46, 2023. doi:10.1115/1.4056598
- [23] L. Siddharth and A. Chakrabarti, "Evaluating the impact of Idea-Inspire 4.0 on analogical transfer of concepts," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, vol. 32, no. 4, pp. 431–448, Nov. 2018. doi:10.1017/S0890060418000136
- [24] A. Chakrabarti, P. Sarkar, B. Leelavathamma, and B. S. Nataraju, "A Functional Representation for Aiding Biomimetic and Artificial Inspiration of New Ideas," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, vol. 19, no. 2, pp. 113–132, Apr. 2006. doi:10.1017/S0890060405050109
- [25] S. S. Vattam and A. K. Goel, "Foraging for Inspiration: Understanding and Supporting the Online Information Seeking Practices of Biologically Inspired Designers," in *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Washington, DC: ASME, Aug. 2011.
- [26] F. Rosa, G. Cascini, and A. Baldussu, "UNO-BID: Unified Ontology for Causal-Function Modeling in Biologically Inspired Design," *International Journal of Design Creativity and Innovation*, vol. 3, no. 3–4, pp. 177–210, 2015. doi:10.1080/21650349.2014.941941
- [27] B. Lucero, C. J. Turner, and J. Linsey, "Design repository & analogy computation via unit language analysis (DRACULA) repository development," in *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2015. doi:10.1115/DETC2015-46640
- [28] E. Spiliopoulou, S. Rugaber, A. Goel, L. Chen, B. Wiltgen, and A. K. Jagannathan, "Intelligent search for biologically inspired design," in *International Conference on Intelligent User Interfaces, Proceedings IUI, Association for Computing Machinery*, Mar. 2015, pp. 77–80. doi:10.1145/2732158.2732182
- [29] P. A. Verhaegen, J. D'Hondt, D. Vandevenne, S. Dewulf, and J. R. Duflou, "Identifying candidates for design-by-analogy," *Comput Ind*, vol. 62, no. 4, pp. 446–459, May 2011. doi:10.1016/j.COMPIND.2010.12.007
- [30] A. K. Goel, G. Zhang, B. Wiltgen, Y. Zhang, S. Vattam, and J. Yen, "On the benefits of digital libraries of case studies of analogical design: Documentation, access, analysis, and learning," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing:*

AIEDAM, vol. 29, no. 2, pp. 215–227, Apr. 2015. doi:10.1017/S0890060415000086

- [31] L. Chen et al., “A Knowledge-Based Ideation Approach for Bio-inspired Design,” *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, pp. 231–240, 2023. doi:10.1017/pds.2023.24
- [32] The Biomimicry Institute, “AskNature.” [Online]. Available: <https://asknature.org/> [Accessed: Sep. 07, 2023].
- [33] M. K. Kaiser, H. Hashemi Farzaneh, and U. Lindemann, “BIOscrabble - Extraction of Biological Analogies Out of Large Text Sources,” in *IC3K 2013-5th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2013, pp. 10–20.
- [34] M. Z. Khan, J. Bhaskar, and A. Kumar, “Analysis of Lattice-Based Cranial Implant,” in *International Conference on Recent Advances in Materials, Manufacturing and Thermal Engineering*, A. Kumar, M. Zunaid, K. A. Subramanian, and H. Lim, Eds., Singapore: Springer, 2022, pp. 397–409. doi:10.1007/978-981-19-8517-1_30
- [35] S. G. González, M. D. Vlad, J. L. López, and E. F. Aguado, “Novel bio-inspired 3D porous scaffold intended for bone-tissue engineering: Design and in silico characterisation of histomorphometric, mechanical and mass-transport properties,” *Mater Des*, vol. 225, Jan. 2023. doi:10.1016/j.matdes.2022.111467
- [36] P. Terrier, M. Glaus, and E. Raufflet, “BiomiMETRIC assistance tool: A quantitative performance tool for biomimetic design,” *Biomimetics*, vol. 4, no. 3, Sep. 2019. doi:10.3390/biomimetics4030049
- [37] C. H. Hung, A. Etoundi, A. Jafari, J. Matthews, W. C. Chang, and J. J. Chong, “Mimicking Condylar Knee to Design Bio-Inspired Robotic Knee Joint Based on Magnetic Resonance Imaging,” in *2021 24th International Conference on Mechatronics Technology, ICMT 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi:10.1109/ICMT53429.2021.9687202
- [38] D. Costa, G. Palmieri, M. C. Palpacelli, D. Scaradozzi, and M. Callegari, “Design of a carangiform swimming robot through a multiphysics simulation environment,” *Biomimetics*, vol. 5, no. 4, pp. 1–18, Dec. 2020. doi:10.3390/biomimetics5040046
- [39] Y. Seki, M. S. Schneider, and M. A. Meyers, “Structure and mechanical behavior of a toucan beak,” *Acta Mater*, vol. 53, no. 20, pp. 5281–5296, 2005. doi:10.1016/j.actamat.2005.04.048
- [40] K. E. Crandell, R. O. Howe, and P. L. Falkingham, “Repeated evolution of drag reduction at the air–water interface in diving kingfishers,” *J R Soc Interface*, vol. 16, no. 154, May 2019. doi:10.1098/rsif.2019.0125
- [41] A. Y. Akter and H. Basak, “Design and analysis of biomimetics based excavator bucket and tooth,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 236, no. 3, pp. 1166–1175, 2022. doi:10.1177/09544089211057645
- [42] G. Raphel, M. M. Jacob, and S. Viswanathan, “Bioinspired designs for shock absorption, based upon nacre and Bouligand structures,” *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 9, Sep. 2019. doi:10.1007/s42452-019-1062-7
- [43] A. Ghazlan, T. Ngo, T. Nguyen, S. Linforth, and T. Van Le, “Uncovering a high-performance bio-mimetic cellular structure from trabecular bone,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 14247, 2020. doi:10.1038/s41598-020-70536-7
- [44] N. Kladovasilakis, K. Tsongas, and D. Tzetzis, “Finite element analysis of orthopedic hip implant with functionally graded bioinspired lattice structures,” *Biomimetics*, vol. 5, no. 3, Sep. 2020. doi:10.3390/BIOMIMETICS5030044
- [45] W. R. Hansen and K. Autumn, “Evidence for self-cleaning in gecko setae,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, no. 2, pp. 385–389, 2005. doi:10.1073/pnas.0408304102
- [46] A. J. Schulte, D. M. Droste, K. Koch, and W. Barthlott, “Hierarchically structured superhydrophobic flowers with low hysteresis of the wild pansy (*Viola tricolor*) - new design principles for biomimetic materials,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 2, no. 1, pp. 228–236, 2011. doi:10.3762/bjnano.2.27
- [47] R. Helbig, J. Nickerl, C. Neinhuis, and C. Werner, “Smart skin patterns protect springtails,” *PLoS One*, vol. 6, no. 9, Sep. 2011. doi:10.1371/journal.pone.0025105
- [48] W. Barthlott and C. Neinhuis, “Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces,” *Planta*, no. 202, pp. 1–8, 1997. doi:10.1007/s004250050096
- [49] Z. Q. Liu, D. Jiao, Z. Y. Weng, and Z. F. Zhang, “Structure and mechanical behaviors of protective armored pangolin scales and effects of hydration and orientation,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 56, pp. 165–174, Mar. 2016. doi:10.1016/j.jmbbm.2015.11.013
- [50] M. Miyazaki, Y. Hirai, H. Moriya, M. Shimomura, A. Miyauchi, and H. Liu, “Biomimetic Riblets Inspired by Sharkskin Denticles: Digitizing, Modeling and Flow Simulation,” *J Bionic Eng*, vol. 15, no. 6, pp. 999–1011, Nov. 2018. doi:10.1007/s42235-018-0088-7
- [51] Z. Ji et al., “3D printing of bioinspired topographically oriented surfaces with frictional anisotropy for directional driving,” *Tribol Int*, vol. 132, pp. 99–107, Apr. 2019. doi:10.1016/j.triboint.2018.12.010
- [52] Y. Zhang, H. Huang, J. X. Zhang, S. B. Zhang, and L. Q. Ren, “Friction and Wear Properties of the Tergum Surface of Mole Cricket, *Gryllotalpa orientalis*,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 461, pp. 707–711, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.461.707

- [53] V. M. Mustahsan, A. Anugu, D. E. Komatsu, I. Kao, and S. Pentyala, "Biocompatible customized 3D bone scaffolds treated with CRFP, an osteogenic peptide," *Bioengineering*, vol. 8, no. 12, Dec. 2021. doi:10.3390/bioengineering8120199
- [54] P. S. Mehta, J. S. Ocampo, A. Tovar, and P. Chaudhari, "Bio-inspired design of lightweight and protective structures," *SAE Technical Paper*, 2016. doi:10.4271/2016-01-0396
- [55] M. Z. Khan, J. Bhaskar, and A. Kumar, "Design and analysis of strut-based lattice structure cranial implant," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, pp. 9307–9314, 2023. doi:10.15282/jmes.17.1.2023.1.0735
- [56] L. Vaiani, A. E. Uva, and A. Boccaccio, "Structural and topological design of conformal bilayered scaffolds for bone tissue engineering," *Thin-Walled Structures*, vol. 192, p. 111209, 2023. doi:10.1016/j.tws.2023.111209
- [57] N. H. Hart, S. Nimphius, T. Rantalainen, A. Ireland, A. Siafarikas, and R. U. Newton, "Mechanical basis of bone strength: influence of bone material, bone structure and muscle action," *J Musculoskelet Neuronal Interact*, vol. 17, no. 3, p. 114, 2017.
- [58] S. Kanwar, O. Al-Ketan, and S. Vijayavenkataraman, "A novel method to design biomimetic, 3D printable stochastic scaffolds with controlled porosity for bone tissue engineering," *Mater Des*, vol. 220, Aug. 2022. doi:10.1016/j.matdes.2022.110857
- [59] M. Fantini, M. Curto, and F. De Crescenzo, "A method to design biomimetic scaffolds for bone tissue engineering based on Voronoi lattices," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 11, no. 2, pp. 77–90, Apr. 2016. doi:10.1080/17452759.2016.1172301
- [60] X. Li et al., "The design and evaluation of bionic porous bone scaffolds in fluid flow characteristics and mechanical properties," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 225, p. 107059, 2022. doi:10.1016/j.cmpb.2022.107059

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Effects of Tensile Force on the Stripping Process in Crane Drum-Rope Mechanisms

Aydoğan Akça^a, Ece Karşlı^b, Engin Tekin^c, Hasan Öktem^d

Submitted: 22.05.2024 Revised: 23.07.2024 Accepted: 30.07.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A11

ABSTRACT

Keywords: steel rope, winch drum, torque, grooved plate, drum rope clamp

^{a,*} KM Kumsan Crane System Company,
Dept. of Research and Development,
Mechatronic Technician
41455 - Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0009-0000-3479-5719
e mail: aydoganakca40@hotmail.com

^b KM Kumsan Crane System Company,
Dept. of Research and Development,
R&D Engineer
41455 - Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0009-0000-8034-5292

^c KM Kumsan Crane System Company,
Technical Manager
41455 - Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0009-0007-1944-7135

^d Kocaeli University,
Hereke Asım Kocabıyık,
Dept. of Machine and Metal
Technology, Polymer Science and
Technology
41800 - Kocaeli, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2526-8364

*Corresponding author:
aydoganakca40@hotmail.com

One of the most important problems is the stripping of the rope, which is a part of the drum-rope mechanisms required in the weight lifting operations used in today's crane systems, from the drum rope clamps under load. This article is a new study in the literature. In this study, the focus is on investigating the design and process parameters of the drum rope clamps used on the drum mechanisms in overhead cranes, simplifying and improving the production. In order to fulfil this objective, firstly, a prototype table-top experimental system that constructs a drum-rope connection has been established. In the experimental study, flat and radius clamps were used as design parameters and the squeezing forces of the bolts connecting the clamps to the drum were considered as process parameters. The tensile force to be applied throughout the study was obtained by making various mathematical calculations. Finally, it was concluded that design and process parameters have significant effects on crane drum-rope systems and comparisons were made on drum rope clamp designs. In addition, it is seen from the experimental results that it has an impact on cost and operational efficiency.

Vinç Tambur-Halat Mekanizmalarında Çekme Kuvvetinin Sıyırılma İşlemi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

ÖZ

Günümüzdeki vinç sistemlerinde kullanılan ağırlık kaldırma işlemlerinde gerekli tambur-halat mekanizmalarının bir parçası olan halatın, yük altında halat sıkma pabuçlarından sıyırılması en önemli problemlerden birisidir. Bu makale literatüre konu olacak yeni bir çalışmadır. Bu çalışmada, tavan vinçlerindeki tambur mekanizmalarında kullanılan halat sıkma pabuçlarının tasarım ve işlem parametrelerinin araştırılması, üretimin basitleştirilmesi ve geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu amacı yerine getirebilmek için, öncelikle bir tambur-halat bağlantısını kurgulayan prototip masa üstü bir deneysel sistem kurulmuştur. Deneysel çalışmada tasarım parametreleri olarak düz ve radiuslu pabuçlar kullanılırken işlem parametreleri olarak da pabuçların tambur ile olan bağlantısını sağlayan civataların sıkma kuvvetleri işleme alınmıştır. Çalışma boyunca uygulanması gereken çekme kuvveti çeşitli matematiksel hesaplamalar yapılarak elde edilmiştir. Sonuç olarak tasarım ve işlem parametrelerinin vinç tambur-halat sistemleri üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmış ve halat sıkma pabucu tasarımlarıyla ilgili karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca üretim maliyeti ve verimliliği artırmak için işlem parametrelerinden daha çok tasarım parametrelerinin etkili olduğu elde edilen deneysel sonuçlardan görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çelik halat, vinç tamburu, tork, yivli plaka, halat sıkma pabucu

1. Introduction

Cranes are work machines consisting of ropes, chains and pulleys; used for loading, lifting, transporting and unloading heavy loads, machines, materials and goods. Although it is used in many sectors in the industry, it has a usage area beyond manpower in terms of the mechanical advantage it provides. For this reason, cranes are widely used.

A comprehensive literature study has been carried out in order to examine the subject in detail. Cranes have rope drums that increase safety and allow tonnes of weight to be lifted easily [1]. Friction that may occur during the sliding of the rope on the drum is minimized in terms of the grooves opened on the drum surface. Thus, the life of the steel rope is prolonged and operational efficiency is increased [2]. In addition to friction, various methods are used to prevent the rope from peeling off the drum. These are; squeezing with grooved plate, squeezing with ungrooved plate, squeezing with flat wedge bolt, squeezing with inclined wedge, etc. The connection of the rope with the drum is realised by methods [3]. In this study, the clamping method with grooved plate was investigated and tested.

Drum rope clamps (grooved plates) are placed on the drum at certain intervals and fixed by tightening with a specified torque value after taking the holes drilled for drum rope clamps on the drum with bolts as reference. While the bolts used for fixing the drum rope clamps on the drum are tightened with a determined torque value, it is aimed to press the drum rope clamp and the drum together and to prevent the possibility of the drum rope clamp slipping under load [4]. Ernst [5] stated that the reason why there is no need to take precautions against loosening of the bolts is due to the spring function of the rope. In their studies, apart from the two windings tightened to the drum rope clamp, at least two windings on the drum were taken as safety windings. As a result, they stated that the friction force arising from the winding of the rope on the drum carries the load. Chang et al. [6] the problems caused by abrasion in steel wire rope were mentioned. As a result of their study, they observed that the reason for the decrease in the performance of the steel rope is due to abrasion. Chang et al. [7] mentioned that the risk of wear poses a serious threat to service reliability and investigated the tribological behaviour of rope by constructing a test rig. They concluded that surface wear and corrosion affect the performance of the wire rope and the friction coefficient is affected by the rope structure, contact angle and sliding speed.

Ye et al. [8] investigated the properties of marine haulage rope subjected to various stresses by a series of full-scale sheave experimental tests on a specially designed test crane. According to reports revealed that the modified rope was able to induce larger loads than before. Hu et al. [9] the torsional effect and damage accumulated in the rope in the manual rope replacement process were investigated. A special fatigue test apparatus was used to perform the specified tests and tests were carried out with various devices to observe the wear and fracture condition of the steel wire. Onur et al. [10] a theoretical model of the torsional properties of parallel multi-piece rope systems is presented. Then, it is stated that the ropes can be wrapped around each other depending on the combination of applied torque, rope tension, length and spacing between rope pieces. Brandon et al. [11] carried out laboratory tests on two- and four-rope systems and performed torque measurements for rotations between 0 and 360 degrees.

Zhang et al [12] argued that in order to prevent stripping, drum rope clamps (grooved plates) mounted on the drum should be used by connecting to the drum with the technique given in Figure 1. The safety windings on the drum reduce the stripping for the rope force applied on each full winding.

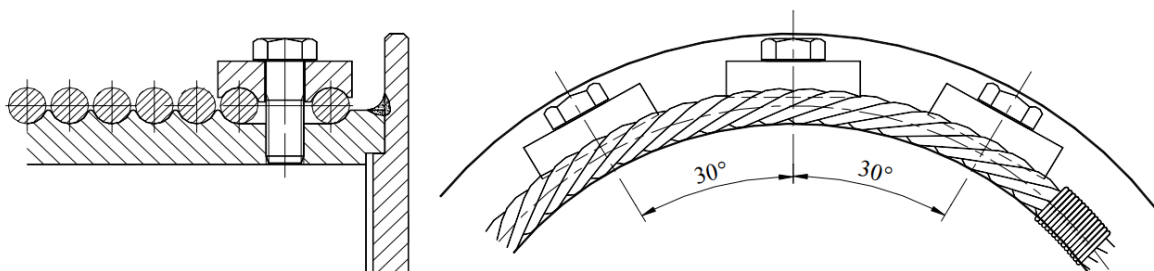


Figure 1. Fastening with grooved plate [3]

In terms of geometrical conformity, it is necessary to manufacture drum rope clamps with different radius values for each variable drum diameter [13]. In this case, it is manufactured by cutting or bending from sheet metal in accordance with the drum diameter from a manufactured pipe that is readily available. In cases where the drum diameter is large or a pipe of suitable diameter is not available, a pipe piece with a suitable radius must be manufactured with cylinder pipe bending machines. This significantly reduces operational efficiency [14]. For this reason, the stripping conditions of the flat rope clamps design, which can be manufactured from an easily available plate that can eliminate such process-consuming and cost-increasing operations, were examined and compared with the currently used rope clamps. Table 1 lists the advantages and disadvantages of the radius rope clamp and the flat rope clamp.

Table 1. Advantages and disadvantages of rope clamps

Radius Rope Clamp	Flat Rope Clamp
It corresponds exactly to the round shape of the drum and therefore provides a tight grip on the rope.	Because it is flat, it contacts a round drum tangentially and the rope squeezing performance may be weaker because it contacts at one point.
Due to its round structure, it contacts the rope from every point and thus causes less damage to the rope. This extends the life of the rope.	Due to the tangential contact with the surface of the rope, it exerts a higher pressure on the rope surface, which prevents all parts of the rope from being crushed evenly.
It is produced specially for each drum, therefore labour cost is high.	Since it is manufactured by cutting from steel plates, the labour cost is much lower.
Since it has a radius, the steel plate needs to be cut and bent. For this reason, the production time is longer.	Since it is manufactured flat, the production time is very short and therefore increases operational efficiency (mass production possibility, time, equipment used, etc.).

In order to increase operational efficiency, a study will be carried out by making design improvements in grooved plates and deciding to test their suitability.

As a result of the researches, no study on drum rope clamps manufactured from flat plates was found and there was not enough research on the problems encountered in the industry. Although, when detailed market researches were carried out on competitor companies, it was observed that flat rope clamps are generally used in companies operating in the machinery manufacturing sector [15,16]. A review of the literature gives that the number of studies in this field is insufficient and there is still a gap that needs to be filled. For this reason, the focus is on the development of the design and process parameters required for the drum-rope mechanism used in crane systems to lift the desired load without stripping. Throughout the study, an experimental system based on the drum-rope mechanism was established. Subsequently process parameters that give the most effective pulling force and the lowest cost were determined.

Present study emphasises the importance of drum rope clamp design in industrial applications and focuses on innovative solutions to meet operational requirements.

In the studies carried out for this purpose, rope stripping forces were obtained as a result of experiments using two different types of rope clamps using certain parameters and methods. The results from two different rope clamps were evaluated, the rope clamp with high operational efficiency, low cost and the most effective pulling force was determined and its usability was ensured.

2. Experimental work

2.1 Parameters and methods

The torque value applied to the bolts in drum-rope mechanisms is determined according to the

standard values given in Table 2. These values are expressed in Kg.m and Nm in terms of how much force the bolts, which are fasteners, will be tightened.

The connection of each rope clamp, which is the test parameter, with the drum was tightened with DIN 933 norm M16 bolts at 100, 140 and 205 Nm respectively using a torque wrench as given in Figure 2.

Table 2. Torque values for bolts and screws

Bolt quality	8.8	
Nominal Diameter (Nominal Dia x Pitch)	Kg.m.	N.m.
M4 x 0.7	0.3	3
M5 x 0.8	0.61	61
M6 x 1	1.42	13
M7	2.34	23
M8 x 1	3.87	38
M10 x 1	8.56	84
M12 x 1.25	9.23	90.6
M14 x 2	13.76	135
M16 x 2	20.89	205
M18 x 2.5	20.84	283
M20 x 2.5	40.77	400
M22 x 2.5	54.23	532



Figure 2. Torque wrench

2.2. Squeezing Moment and Force

In Table 3, the thread table for normal pitch bolts in TS 61 / DIN 13 norm is given and the dimensions of the M16 bolt used in the applied experiment are highlighted.

Table 3. Metric screw normal thread table

Screw Nominal Diameter (D=d)	Thread Pitch	Screw Thread Diameter		Drill Diameter	Pitch Diameter (d2=D2)	Depth of Thread	
		Crest (d1)	Root (D1)			Crest (h3)	Root (H1)
M1	0,25	0,693	0,729	0,75	0,638	0,153	0,135
M2	0,4	1,509	1,567	1	1,74	0,245	0,217
M3	0,5	2,387	2,459	2,5	2,675	0,307	0,271
M4	0,7	3,141	3,242	3,3	3,545	0,429	0,379
M5	0,8	4,019	4,134	4,2	4,48	0,491	0,443
M6	1	4,773	4,917	5	5,35	0,613	0,541
M8	1,25	6,466	6,647	6,8	7,188	0,767	0,677
M10	1,5	8,16	8,376	8,5	9,026	0,92	0,812
M12	1,75	9,853	10,106	10,2	10,863	1,074	0,947
M14	2	11,546	11,835	12	12,701	1,227	1,083
M16	2	13,546	13,835	14	14,701	1,227	1,083
M18	2,5	14,933	15,294	15,5	16,376	1,534	1,353
M20	2,5	16,933	17,294	17,5	18,376	1,534	1,353
M22	2,5	18,933	19,294	19,5	20,376	1,534	1,353

Table 4. Symbols and values table

D2 (Section Diameter)	14.701 mm
P (Screw pitch)	2 mm
μ (Coefficient of Friction)	0.1
α (Thread Angle)	60°
β (Helix Angle for a bolt with M16 and 2mm pitch)	2.48°
ρ (Angle of Friction 0.1 coefficient of friction and 60° for thread angle)	6.586°

The relationship between the tightening moment and the tightening force is calculated as the sum of the moment between the screw threads and the moment created by the nut surface on the material surface according to the formula below.

M_s = Squeezing moment

D_{Nut} = Nut diameter

$$M_s = F_p \cdot \left(\frac{D2}{2} \cdot \tan(\beta + \rho) + \mu \cdot \frac{D_{Nut}}{2} \right)$$

Examination of the torque table for bolts in Table 2 shows that the required tightening torque value for an 8.8 grade bolt in M16 size is 205 Nm.

According to DIN931 standard, the "Screw head" value of the M16 bolt is determined as 24mm is substituted in the formula below according to the squeezing torques of 100, 140 and 205 Nm applied during the test phase;

$$M_{s_{205}} = F_{p_{205}} \cdot \left(\frac{D2}{2} \cdot \tan(\beta + \rho) + \mu \cdot \frac{D_{screw\ head} - d_{Hole\ Diameter}}{2} \right)$$

$$\Rightarrow 205 \cdot 10^3 = F_{p_{205}} \cdot \left(\frac{14.701}{2} \cdot \tan(2.48 + 6.586) + 0.1 \cdot \frac{24 - 17}{2} \right)$$

$$\Rightarrow F_{p_{205}} = 134.625 \text{ N}$$

From here by similar methods;

F_p = Squeezing force

Squeezing force of 100, 140 and 205 Nm torque value;

$$F_{p_{100}} = 65.670 \text{ N}$$

$$F_{p_{140}} = 91.939 \text{ N and}$$

$$F_{p_{205}} = 134.625 \text{ N is found.}$$

2.3 Determination of rope friction force depending on squeezing force

M_s half of the F_p force generated as a result of the squeezing moment (if the bolt hole axis divides the pressure surface of the rope clamp on the drum and the rope pressure surface into two equal distances) is applied to the rope as given in Figure 3. Then, acting on the groove surface opened on the drum and the groove surface on the rope clamp clip. In this case, F_{p_rope} in Figure 4 is applied in the opposite direction to and $F_s = 2 \cdot \mu \cdot \frac{F_p}{2}$ friction force is generated. This formula is simplified $F_s = \mu \cdot F_p$ value is found.

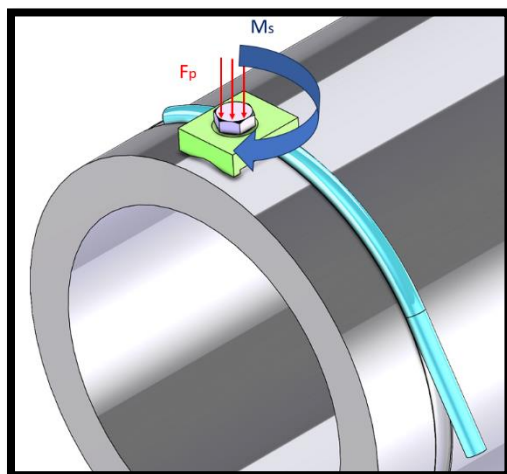


Figure 3. Forces Acting on the Rope I

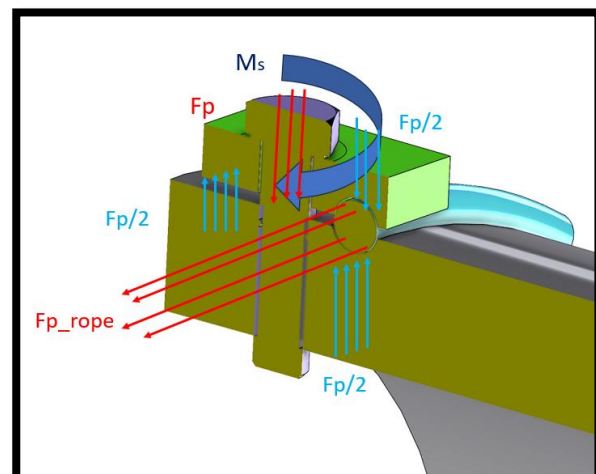


Figure 4. Forces Acting on the Rope II

2.4 Effect of rope winding number on rope pulling force

In this section, three rope clamps were used in standard crane drum. In addition to this, the design is conducted in such a way that as can be seen in Figure 5 at least 3 wrapped grooves remain wrapped around the drum when the hook block is at the lowest point.

In addition, the remaining 3 wound grooves are calculated according to the formula below.

F_{p_rope} = Rope squeezing force

F_{load} = Drum mechanism load

$$F_{p_rope} = \frac{F_{load}}{e^{\mu\alpha}} \quad [17]$$

It's here;

$e = 2.718$ is the natural logarithm number.

μ = Coefficient of friction between the rope and the drum (taken as 0.1 to stay on the safe side)

α = Rope winding angle in radians ($6.\pi$ is taken for 3 windings)

The load attached to the rope for a drum mechanism with three grooves wound at the extreme end (with the least number of grooves wound on the drum);

$$e^{\mu.\alpha} \Rightarrow e^{0.1.6\pi} \Rightarrow 6.58 \text{ times as much and}$$

It is obvious that a drum mechanism to which 3 rope clamps are connected can hold the load with $6.5 \times 3 = 19.75$ times less force.

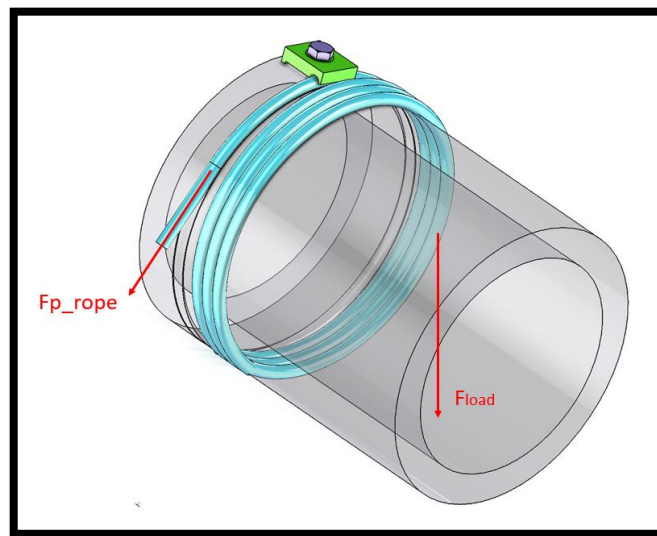


Figure 5. Drum Mechanism

2.5 Test setup (mechanical test)

In drum - rope mechanisms, rope clamps are used to prevent the rope wrapped around the drum from stripping. These rope clamps can be manufactured in two different types. Radius and Flat type clamps have their own advantages and disadvantages. The experimental setup given in Figure 6 was set up in order to determine whether the mentioned rope clamps can be manufactured with the most effective pulling force and the lowest cost in drum - rope mechanisms. By using the experimental setup, the rope stripping forces of the rope clamps manufactured with radius and flat shape will be compared. Thus, after making a comparison according to the results obtained from the experiment, the design with high operational efficiency, low cost and the most effective tensile force value will be determined from the rope clamps to be used in drum - rope mechanisms.

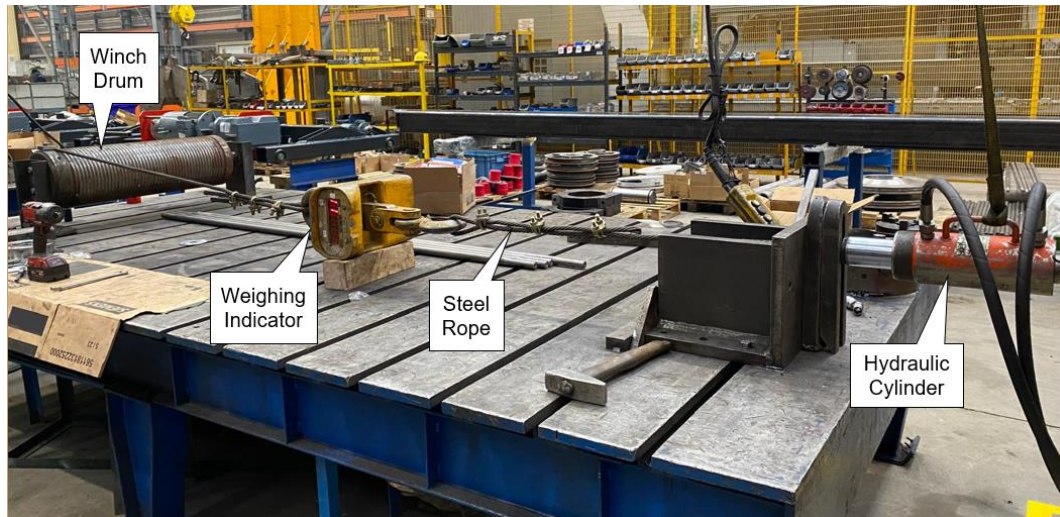


Figure 6. Experimental setup

2.6 Stripping effect of drum rope clamps under tensile force

Rope clamps are used in drum-rope mechanisms to prevent rope stripping. Two different types of rope clamps, flat type and Radius type, were used as test parameters. Figure 7 represents the flat type and Figure 8 represents the Radius type rope clamp. A number of experiments were carried out to determine the rope stripping forces of two different types of rope clamps on the experimental set-up as given in Figure 6. The experiment was first started with the flat type rope clamp given in Figure 7. The flat type rope clamp is connected to the drum with M16 bolt and tightened to 100 Nm using torque wrench. In order to determine the stripping force of the wire rope between the drum and the rope clamp, a hydraulic cylinder was used. Subsequently pulling force was applied to the wire rope with the hydraulic cylinder until the moment of stripping. The stripping force value at the moment that the steel wire rope starts to be stripped from the place where it is clamped to the drum was read from the weighing indicator. The same procedure was applied for torque values of 140 and 205 Nm respectively and the rope stripping forces were obtained.

Afterwards, the number of flat type rope clamp, which were connected to the drum, was increased from 1 to 2. The rope clamps were placed at 30° intervals and their connections with the drum were carried out M16 bolts under the same conditions. Firstly, the rope stripping force was tested with a torque value of 100 Nm applied to the bolts. The same process was applied for 140 and 205 Nm torque values respectively and rope stripping force values were obtained.

For the last test of the flat type rope clamp, the number of clamps was increased from 2 to 3 and the rope clamps were placed at 30° intervals. Under the same conditions, respectively, the bolts were tightened with a torque wrench at 100, 140 and 205 Nm. Then the pulling force was applied by means of a hydraulic cylinder until the steel rope between the drum and the rope clamp was stripped.

As a result of the applied tensile force, rope stripping forces were obtained. The experiments applied for the flat type rope clamp were also applied for the radius type rope clamp indicates in Figure 10 with the same conditions and methods. The results of the experiments are listed in Table 4 and Table 5.

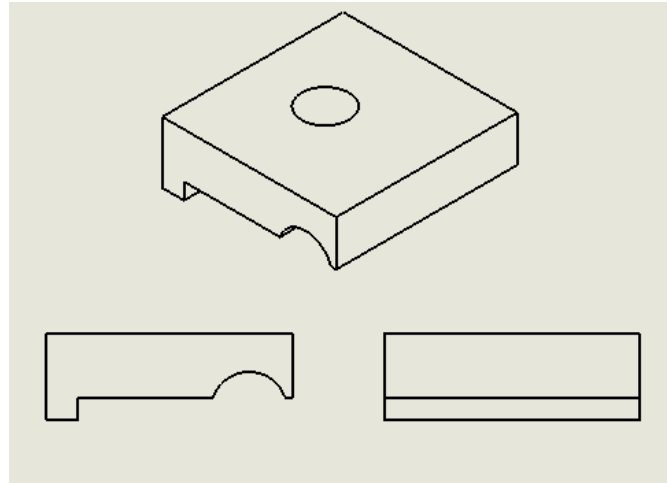


Figure 7. Technical drawing of a flat type drum rope clamp

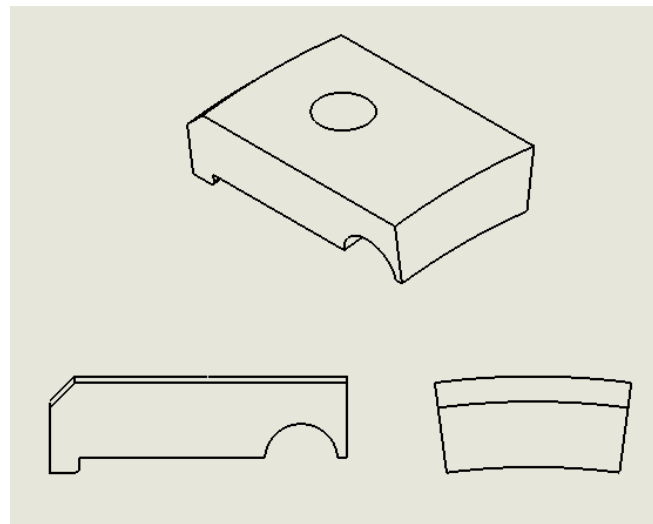


Figure 8. Technical drawing of a radius type drum rope clamp

3. Result and Discussions

In this section, all the results of the rope stripping forces obtained from the tests on the rope clamps are analysed and evaluated. Tables 4 and 5 give the rope stripping forces obtained as a result of the tensile force applied to the steel rope between the rope clamp and the drum. The results obtained from Tables 4 and 5 were interpreted and the graphs given in Figures 9 and 10 were created.

Table 5. Radius type rope clamp

	Number of Clamps	Squeezing Torque (Nm)	Clamp Geometry	Rope Stripping Force (kg)
Test 1	1	100	Radius	250
Test 2	1	140	Radius	500
Test 3	1	205	Radius	800
Test 4	2	100	Radius	700
Test 5	2	140	Radius	1300
Test 6	2	205	Radius	2400
Test 7	3	100	Radius	1900
Test 8	3	140	Radius	2550
Test 9	3	205	Radius	3700

From Table 4, it can be seen, each Radius type rope clamp was fixed to the drum with a clamping torque value of 100, 140 and 205 Nm respectively. After the pulling force was applied to the steel rope between the rope clamp and the drum using a hydraulic cylinder at 100, 140, 205 Nm clamping torque values, the rope stripping forces give in Table 4 were obtained in "kg". Considering the results in Table 4, it is observed that the rope stripping force varies depending on the number of clamps and the squeezing torque value. Using the data in Table 4 and the data obtained from the experimental results, the result graph of the Radius type rope clamp given in Figure 9 was created.

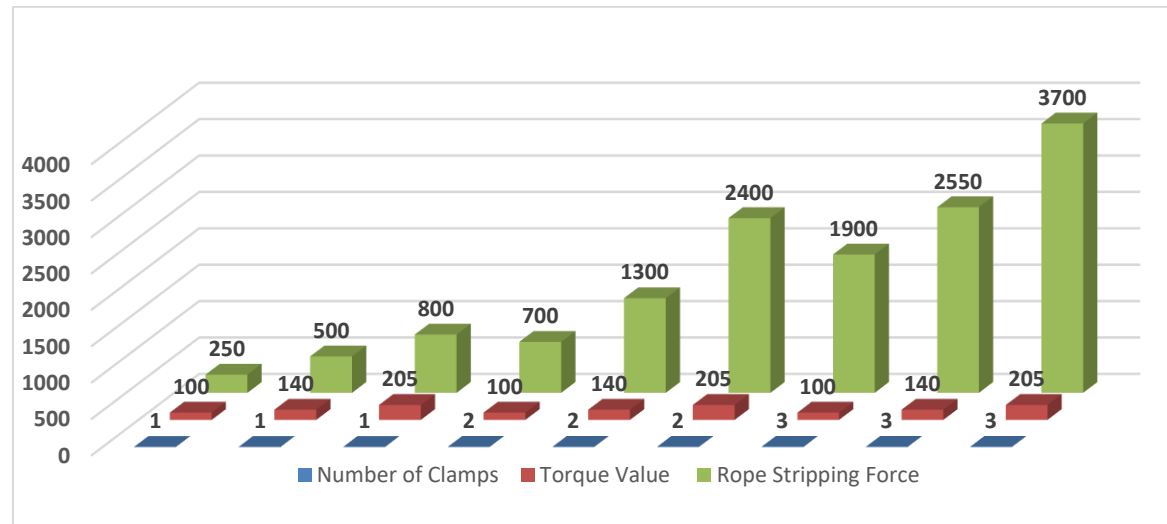


Figure 9. The rope stripping force of radius type rope clamp

The result graph of the Radius type rope clamp is given in Figure 9. As the number of clamps and the tightening torque value increases, the rope stripping forces increase as the steel rope between the drum and the clamp is held more tightly. The rope stripping force obtained when one clamp is fixed to the drum with a torque value of 205 Nm is higher than the rope stripping force obtained when two clamps are fixed to the drum with a torque value of 100 Nm. It is observed that this situation is due to the fact that the radius type rope clamp contacts the drum at every point and grips the steel rope more tightly at high torque value.

Table 6. Flat type rope clamp

Test	Number of Clamps	Squeezing Torque (Nm)	Clamp Geometry	Rope Stripping Force (kg)
Test 1	1	100	Flat	200
Test 2	1	140	Flat	350
Test 3	1	205	Flat	450
Test 4	2	100	Flat	500
Test 5	2	140	Flat	700
Test 6	2	205	Flat	1600
Test 7	3	100	Flat	1450
Test 8	3	140	Flat	2000
Test 9	3	205	Flat	3100

In Table 5, the results obtained from the experiments performed on the flat type rope clamp under the heading of rope stripping force are given in "kg". Each flat type rope clamp was connected to the drum with M16 bolt with a squeezing torque value of 100, 140 and 205 Nm respectively. A hydraulic cylinder was used to apply a pulling force until the steel rope between the drum and the flat type rope clamp

was stripped. The stripping forces obtained are given in Table 5 together with the experimental parameters. The results in Table 5 are considered, it is observed that the rope stripping force varies depending on the number of clamps and the squeezing torque value. Using the data in Table 5 and the data obtained from the experimental results, the result graph of the flat type rope clamp given in Figure 10 was created.

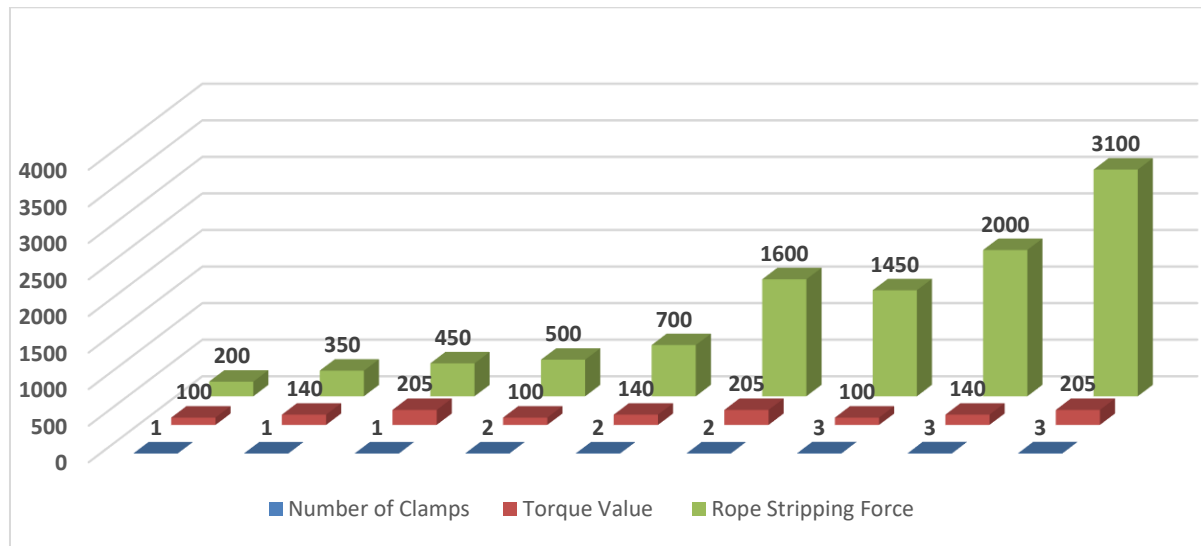


Figure 10. The rope stripping force of flat type rope clamp

Analysing the result graph of the flat type rope clamp in Figure 10, since the flat type rope clamp applies pressure from a tangent point to the drum, the rope stripping force value also increases with increasing the number of clamps. In addition to increasing the number of clamps, it was observed that the stripping force of the steel rope between the drum and the clamp also increased with the increase in torque values. Thus, according to the result graph of the flat type rope clamp given in Figure 10, it is observed that the rope stripping force increases in direct proportion to the number of clamps and torque value.

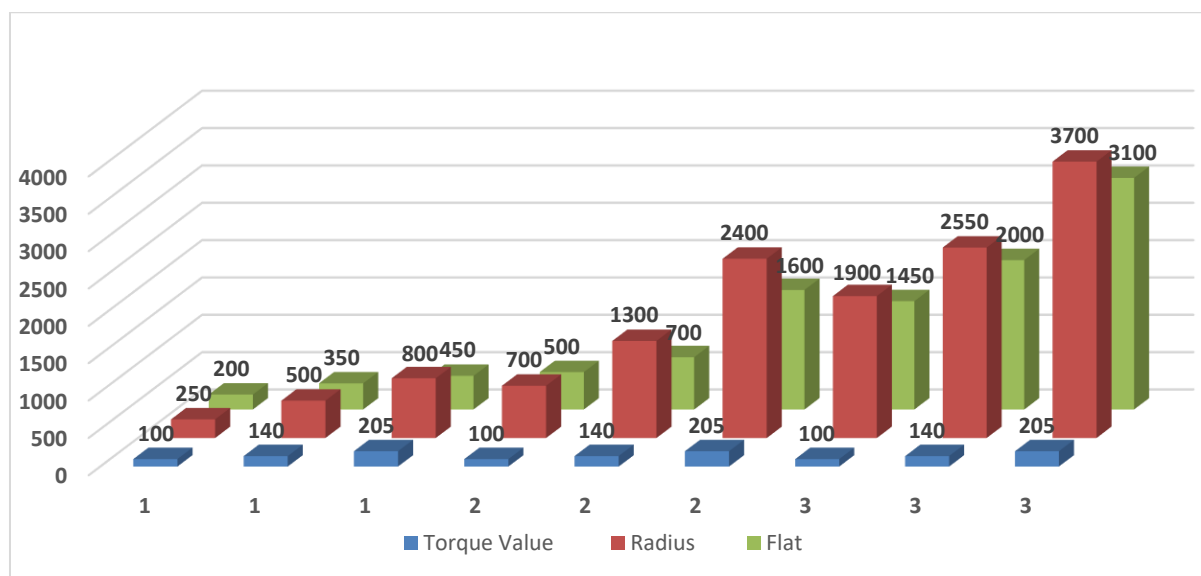


Figure 11. Comparison of radius and flat type rope clamps

Depending on the varying number of clamps and torque force, the rope stripping forces of two different types of rope clamps were tested under each condition. Figure 11 represents the comparison graph of the radius and flat type rope clamps. From Figure 11, it is seen that under the same conditions, the radius type rope clamp holds the steel rope more tightly and the stripping force is higher than the flat

type rope clamp. It is determined that this situation is due to the fact that the radius type rope clamp contacts the drum at every point, while the flat type rope clamp contacts the drum at a single point.

4. Conclusion

This paper focused on the effect of the design of the rope stripping forces obtained as a result of the tensile force applied to the rope clamps, which prevent the stripping of steel ropes, under variable clamp number and torque values, were investigated by means of experiments. The results obtained from these experiments and the conclusions reached in the light of the evaluations can be summarised as follows:

- Radius type rope clamp has approximately 20% more rope stripping force than flat type rope clamp.
- Radius rope clamp has high production cost and low operational efficiency (mass production possibility, time, equipment used, etc.). Flat type rope clamp is more advantageous in terms of cost and efficiency.
- In drum rope connections, it has been determined that the most effective rope clamp in terms of cost, standardisation and mass production is the flat type rope clamp, since 3 winding grooves are generally left as safety grooves.
- The rope clamps counterbalance a 5 tonne rope load with a load 19.75 times less in the three safety grooves. This provided a smooth load carrying for the flat type rope clamp. Thus, the manufacturing difficulties, costs and time losses of the radius type rope clamp are eliminated.
- As a result of the research, it was seen that this study is a new topic in the literature. There is no study on the clamps mounted on the drum.

Acknowledgements

The authors would like thanks to KM Kumsan Crane System Company in Kocaeli / Turkey.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] I. Ridge, C. R. Chaplin, and J. Zheng, "Effect of degradation and impaired quality on wire rope bending over sheave fatigue endurance," *Engineering Failure Analysis*, pp. 173-187, 2001.
- [2] L. Xiang, H. Wang, Y. Chen, Y. Guan, and L. Dai, "Elastic-plastic modeling of metallic strands and wire ropes under axial tension and torsion loads," *Int. J. Solid Struct.*, pp. 103-118, 2017. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.09.008
- [3] G. Kutay, "Nasil Vinç Yaparım", *guven-kutay.com*, 2009. [Online]. Available: <https://www.guven-kutay.ch/>. [Accessed: Aug. 14, 2024].
- [4] H. Adatepe and T. Güneş, "Cıvatalı Bağlantılarda Emniyetli Tork Değerinin Teorik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi," *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, vol. 53, no. 633, pp. 43-51, 2012.
- [5] H. Ernst, "Untersuchungen über die Beanspruchung der Seiltrommeln von Kranen und Winden," *Mitteilung der Forschungsanstalten des GHH-Konzerns*, pp. 195-215, 1938.
- [6] X. Chang, H. Huang, Y. Peng, and S. Li, "Friction, wear and residual strength properties of steel wire rope with different corrosion types," *Wear*, Vol. 458-459, 203425, 2020. doi: 10.1016/j.wear.2020.203425
- [7] X. Chang, Y. Peng, Z. Zhu, D. Cheng, H. Lu, W. Tang, and G. Chen, "Tribological Behavior and Mechanical Properties of Transmission Wire Rope Bending Over Sheaves Under Different Sliding Conditions," *Wear*, Vol. 514-515, 204582, 2022. doi: 10.1016/j.wear.2022.204582
- [8] H. Ye, W. Li, H. Zhang, S. Lin, D. Zhang, Y. Ge, and Z. Li, "Experimental evaluation of dimension-stable synthetic fibre rope under

- investigation of spooling test on the multilayer winch drum," *Ocean Engineering*, vol. 279, 114585, 2023. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.114585
- [9] Z. Hu, E. Wang, F. Jia, and M. Dong, "Experimental study on effect of additional torsional load on bending fatigue behavior and failure mechanism of steel wire rope," *International Journal of Fatigue*, vol. 167, 107399, 2023. doi:10.1016/j.ijfatigue.2022.107399
- [10] Y. Onur, C. İmrak, and T. Onur, "Discarding lifetime investigation of a rotation resistant rope subjected to bending over sheave fatigue," *Measurement*, vol. 142, pp. 163-169, 2019. doi:10.1016/j.measurement.2019.04.078
- [11] J. Brandon, C. Chaplin, and N. Ermolaeva, "Modelling the cabling of rope systems," *Engineering Failure Analysis*, pp. 920-934, 2007. 10.1016/j.engfailanal.2006.11.032
- [12] Q. Zhang, Y. Peng, Z. Zhu, X. Chang, H. Lu, Z. Zhou, G. Cao, W. Tang, and G. Chen, "Influence of longitudinal vibration on the friction and wear characteristics of multi-layer winding hoisting wire rope," *Wear*, vol. 492-493, 204211, 2022. doi:10.1016/j.wear.2021.204211
- [13] X. Chang, Y. Peng, and Z. Zhu, "Effects of strand lay direction and crossing angle on tribological behavior of winding hoist rope," *Materials*, vol. 10, no. 6, 630, 2018. doi:10.3390/ma10060630
- [14] A. Wahid, N. Mouhib, A. Kartouni, H. Chakir, and M. Elghorba, "Energy method for experimental life prediction of central core strand constituting a steel wire rope," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 97, pp. 61-71, 2019. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.12.005
- [15] Y. Peng, X. Chang, Z. Zhu, D. Wang, X. Gong, S. Zou, S. Sun, and W. Xu, "Sliding friction and wear behavior of winding hoist rope in ultra-deep coal mine under different conditions," *Wear*, vol. 368-369, pp. 423-434, 2016. doi:10.1016/j.wear.2016.10.012
- [16] L. Qiong, X. Haifeng, and L. Xiande, "Analysis of communication protocol in the infrared control system of intelligent home," *Control and Automation*, vol. 23, pp. 28-30, 2007.
- [17] I. Gerdemeli, "Krenlerde Kullanılan Elemanlar ve Hesap Esasları". [Online]. Available: <https://transport.itu.edu.tr/docs/librariesprovider99/dersnotlari/dersnotlarimak625/sunum/ek-a4-krenlerde-kullan%C4%B1lan-elemanlar-ve-hesap-esaslar%C4%B1.pdf?sfvrsn=2>. [Accessed: Aug. 14, 2024].

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

A Review on Cobalt Recovery from Waste Lithium Ion Batteries

Damla Nur Birlik^a, Aysun Özkan^b, Zerrin Günkaya^c, Müfide Banar^{*d}

Submitted: 23.02.2024 Revised: 28.04.2024 Accepted: 01.06.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A04

ABSTRACT

With the increasing usage rates of lithium ion batteries used in energy storage, the management of the resulting waste has also increasingly important. The short lifespan of lithium ion batteries and the precious metals they contain require careful management of these wastes from a technical, environmental and economic perspective. Therefore, in the context of the recovery of precious metals such as cobalt from waste lithium ion batteries, in this article, literature studies on the recovery of cobalt from commonly used types of lithium ion batteries in the form of Nickel Manganese Cobalt and Lithium Cobalt Oxide have been evaluated. The literature review shows that the most commonly used methods are hydrometallurgical, pyrometallurgical and direct recovery methods. As the demand for lithium ion batteries increases in the coming years, the need to develop and optimize innovative methods for cobalt recovery will become even more important in achieving sustainability goals within energy storage systems.

Keywords: Recovery, Hydrometallurgy, Cobalt, Lithium Ion Batteries, Pyrometallurgy

^a Eskişehir Technical University, Engineering Faculty, Dept. of Environmental Engineering 26555 - Eskişehir, Türkiye
Orcid: 0009-0005-3891-9762
e mail: damlanurbirlik@ogr.eskisehir.edu.tr

^b Eskişehir Technical University, Engineering Faculty, Dept. of Environmental Engineering 26555 - Eskişehir Türkiye
Orcid: 0000-0002-1036-7570

^c Eskişehir Technical University, Engineering Faculty, Dept. of Environmental Engineering 26555 - Eskişehir Türkiye
Orcid: 0000-0002-7553-9129

^d Eskişehir Technical University, Engineering Faculty, Dept. of Environmental Engineering 26555 - Eskişehir Türkiye
Orcid: 0000-0003-2795-6208

*Corresponding author: mbanar@eskisehir.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Geri kazanım, Hidrometalurji, Kobalt, Lityum iyon piler, Pirometalurji

Atık Lityum İyon Pillerden Kobalt Geri Kazanımı Üzerine Bir Değerlendirme

ÖZ

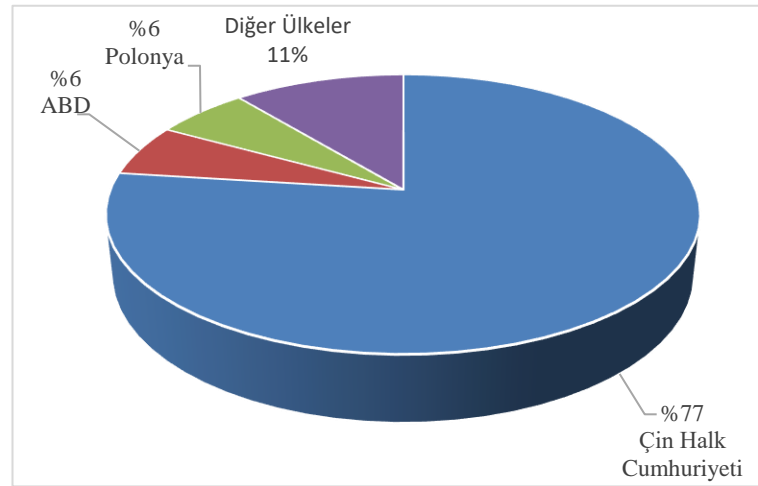
Enerji depolama alanında kullanılan lityum iyon pillerin kullanım oranlarının artmasıyla birlikte, ortaya çıkan atıkların yönetimi de giderek daha önemli hale gelmiştir. Lityum iyon pillerin kısa ömürlü olmaları ve içerdikleri değerli metaller, bu atıkların, teknik, çevresel ve ekonomik açıdan dikkatli bir şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla, tükür lityum iyon pillerden kobalt gibi değerli metallerin geri kazanımı bağlamında bu makalede, yaygın olarak kullanılan Nikel Manganez Kobalt ve Lityum Kobalt Oksit formundaki lityum iyon pillerden kobalt geri kazanımıyla ilgili literatür çalışmaları incelenmiştir. Yapılan literatür taramasında en çok başvurulan yöntemlerin, hidrometalurjik, pirometalurjik ve doğrudan geri kazanım yöntemleri olduğu görülmüştür. Önümüzdeki yıllarda lityum iyon pillere olan talep arttıkça, kobalt geri kazanımı için inovatif yöntemlerin geliştirilmesi ve optimize edilmesi ihtiyacının, enerji depolama sistemleri içerisinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmek açısından daha da önemli hale geleceği düşünülmektedir.

1. Giriş (Introduction)

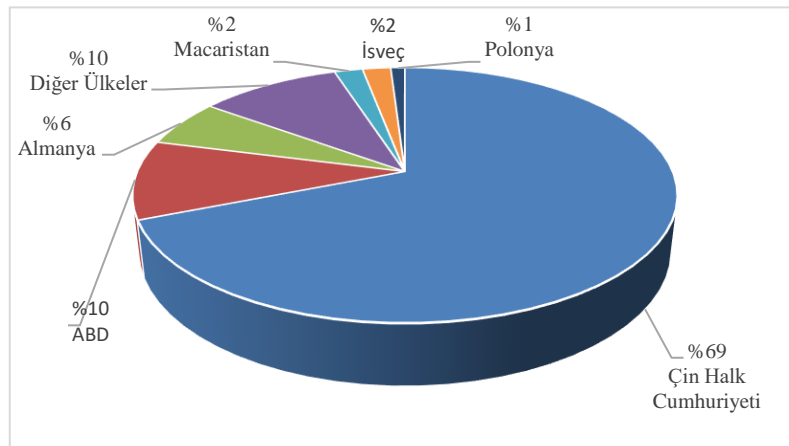
Son yıllarda dünyanın gündeminde olan küresel enerji krizi ve iklim değişikliği sonucunda meydana gelen sorunlar, insanları sürdürülebilir enerji kullanımına ve döngüsel ekonomi modeline geçmeye yönlendirmiştir. Bu yönelim sonucunda, fosil yakıtlara alternatif olmak üzere güneş, biyokütle, rüzgâr, dalga ve jeotermal gibi farklı tür yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun da ötesinde enerjinin taşınabilir elektronikler ve elektrikli araçlar gibi diğer uygulama alanlarına verimli bir şekilde aktarılabilmesi ve kullanılabilmesi için de güç üretiminde enerji depolama sistemlerine olan talep artmıştır [1].

30 yıl önce dünyaya tanıtılan ve günümüze kadar çeşitli alanlarda kullanılan "lityum iyon piller (lithium ion batteries (LIB))", enerji depolama sistemleri arasında en yaygın kullanılan sistemlerdir [1]. LIB'ler, yüksek enerji kapasiteleri, yüksek açık devre voltajları, düşük deşarj oranları ve kullanılmadıklarında yavaş şarj kaybı özellikleri sayesinde elektrikli araçların (EVs) yanısıra, taşınabilir elektronik pazarı için de önemli hale gelmişlerdir [2]. Küresel pazarda üretilen LIB'lerin depolama kapasitesi 2019 yılı verilerine göre 1,2 milyon tonun üzerine (~218 GWh) çıkmıştır. Bu değer 2009 yılındaki 134.000 ton (25,6 GWh) kapasiteden 9 kat daha fazladır ve bu sayının yıllar içerisinde 12,7 milyon tonun (2500 GWh) üzerine çıkması beklenmektedir [1].

LIB'lerin dünyada en çok üretildiği ülkeler incelendiğinde, 2022 yılı verilerine göre Çin Halk Cumhuriyeti'nin %77'lik (893 GWh) bir üretim kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bunu %6 oranla Polonya ve ABD takip etmektedir (Şekil 1a). 2027 yılında ise LIB üretiminde Çin Halk Cumhuriyeti'nin %69 (6197 GWh), ABD'nin %10 (908 GWh), Almanya'nın ise %6'lık (503 GWh) bir paya sahip olacağı öngörülmektedir (Şekil 1b).



(a)



(b)

Şekil 1. Dünyadaki LIB üretim miktarları [3] (a) 2022 yılı (b) 2027 yılı
(Amount of LIB production in the world (a) 2022 year (b) 2027 year)

LIB'lerin kullanım ömürleri diğer pillerin kullanım ömürlerine göre daha kısadır. Küçük bir elektrikli ve elektronik cihaz içerisinde kullanılan LIB'nin ömrü 3-5 yıldır. Daha büyük cihazlarda ise bu ömür 5 - 10 yıl arasında değişmektedir. LIB'lerin diğer pil türlerine göre daha kısa ömürlü olmaları atık LIB oluşumunu da arttırmaktadır. Nitekim, 2012 yılında Dünya'da 10,7 ton olan atık LIB miktarı, 2020 yılında 250 tona yükselmiş olup, 2025 yılında ise 464 ton olacağı öngörülmektedir [4]. Dünya genelinde, hükümetler tarafından geri dönüşüm endüstrisine büyük yatırımlar yapılmasına rağmen, LIB'lerin geri dönüşüm oranı çok düşüktür. 2017 yılında atık LIB'lerin sadece %32'si geri dönüştürülebilmştir. Bu geri dönüşüm oranının düşük olmasında,

- Etkili yasal bir düzenlemenin olmaması
- Etkin toplama sistemlerinin olmaması ve
- Atık lityum iyon pillerin geri dönüştürülmesinde eski ve çevre dostu olmayan teknolojilerin kullanılması gibi nedenler etkili olmaktadır [5,6].

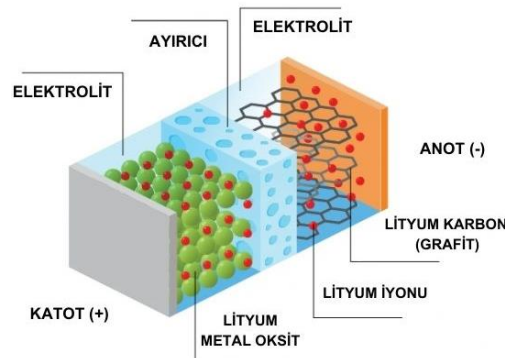
Ülkeler arasında değişiklik gösterse de LIB'lerin güvenilir, verimli ve ekonomik yönden etkin bir şekilde toplanıp, taşınıp tekrar kullanılmak üzere geri dönüştürülmesi ve değerli metallerin geri kazanım yöntemlerinde, hammadde ve bu alanda yapılan yatırımlar üzerinde değişiklikler gerekmektedir. Bu değişikliklerden birisi de "döngüsel ekonomi modeli"dir [4,7]. Döngüsel ekonomi modeli, hiçbir atık oluşumunun olmadığı doğal süreçleri taklit etmek üzerine kurulu bir ekonomi modelidir. Model içerisindeki aşamalar ve süreç içerisindeki çevresel, siyasi ve finansal koşullar birbirleriyle bağlantı içerisinde [6]. Atık LIB'lerin geri dönüşümünde döngüsel ekonomi modelinin uygulanması halinde birincil hammadde ihtiyacı, dolayısıyla birincil hammadde üretimiyle ilişkili kaynak tüketimi de azalacaktır [6].

2. Lityum İyon Pillerin Yapısı ve Türleri (Structures and Types of Lithium Ion Batteries)

LIB'ler, üreticilerine ve kullanım alanlarına bağlı olarak silindirik, prizmatik veya hücresel şekilde üretilirler. Genel olarak yapılarına bakıldığında;

- %20-26 oranında dış katmanı oluşturan demir nikel alaşımlı veya alüminyum içerikli kasa,
- ~%17 oranında grafitten oluşan "anot",
- ~%27 oranında lityum ve metal oksitlerden oluşan "katot",
- %10-15 oranında dipolar çözücüler içerisinde çözülmüş olan yüksek lityum tuzları içeren "sıvı elektrolit",
- ~%13 oranında bakır, alüminyum folyo akım toplayıcı,
- %4-10 oranında katot ve anot kısmı birbirinden ayıran mikro boyutlu polimerik ayırıcı ve
- ~%4 oranında genellikle polivindendiflorit (PVDF) olarak tercih edilen "bağlayıcı"

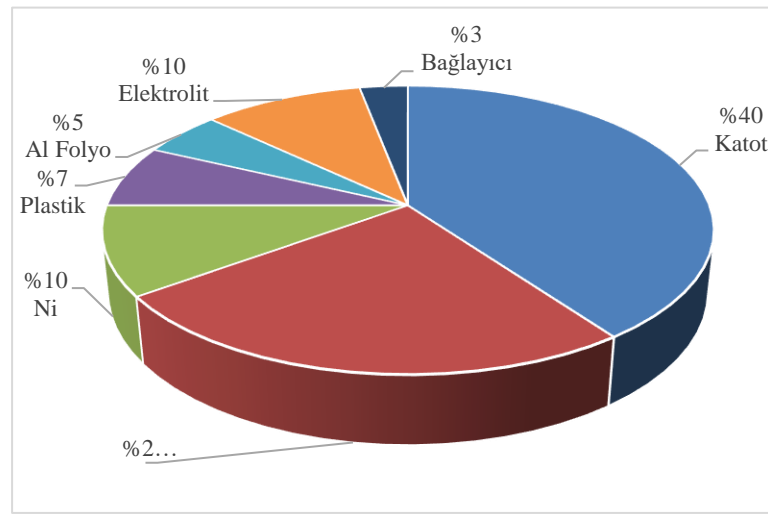
bulunur [4,8]. Anot, katot, sıvı elektrolit ve bağlayıcının bir lityum iyon pil içerisindeki görünüşleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Lityum tuzları, verilen akım ile deşarj yoluyla (+) değerlikli lityum iyonlarını anottan katoda doğru hareket ettirir. Bu süreçte oluşan tepkime ile elektron akışı devam eder. Kullanım sonucunda içi boşalmış olan LIB'lerin tekrar kullanılabilmesi için şarj edilmesi durumunda da katottan anota ve anottan katoda doğru iyonların hareketi gerçekleşmektedir.



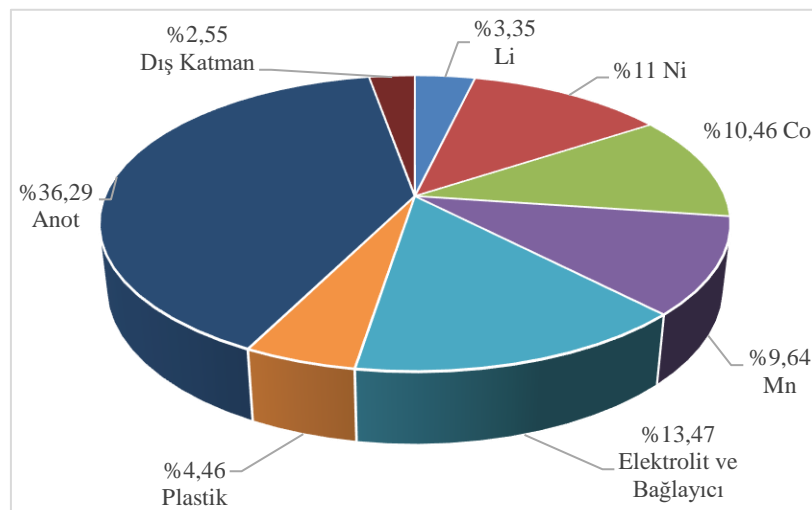
Şekil 2. Bir LIB'nin yapısı [9] (Structure of a LIB)

LIB'ler üzerine çalışan araştırmacıların zorlandıkları konulardan birisi "pillerin gruplandırılması" olmakla birlikte bu konudaki yaygın yaklaşım, "katot malzemelerine göre" gruplandırılmalarıdır. Buna göre LIB'ler, Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Demir Fosfat (LFP), Nikel Manganez Kobalt (NMC), Lityum Manganez Oksit (LMO) ve Nikel Manganez Alüminyum (NCA) olarak gruplandırılmaktadırlar [8]. Şekil 3'te en çok tercih edilen pillerden ikisi olan LCO ve NMC'nin içerikleri verilmiştir [7]. LCO tipi LIB'ler, LiCoO_2 formülüne sahip olup ilk üretilen LIB türlerindedir. Katmanlı yapıya sahip olan LCO piller, düşük maliyetlidirler ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Daha çok akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve elde taşınması kolay olan aletlerde tercih edilirler [8].

NMC tipi lityum iyon piller ise $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ kimyasal formülüne sahip lityum iyon pillerdir. Kimyasal formülündeki x, y ve z değerleri, içerisinde bulundurduğu element konsantrasyonlarına göre değişiklik göstermektedir. Diğer pil türlerine göre daha fazla enerji depolamaları, uzun süre dayanıklı olmaları ve az bakım gerektirmeleri nedeniyle NMC tipi LIB'ler elektrikli araçlar, güneş panelleri ve akıllı telefonlarda tercih edilen başlıca pil türlerindedir. Pazarda payı giderek artış göstermekte olan bu LIB türleri de LCO piller gibi katmanlı yapıya sahiptir [8].



Şekil 3. LCO Tipi LIB içerikleri [5,10,11,16] (LCO Type LIB Components)



Şekil 4. NMC Tipi LIB içerikleri [12] (NMC Type LIB Components)

3. Lityum İyon Piller ve Kobalt (Lithium Ion Batteries and Cobalt)

Kobaltın küresel bazda kullanımı, öncelikli olarak şarj edilebilir batarya elektrotlarında görülmektedir.

Ayrıca gaz türbini motorları için süper alaşımlar, otomobiller için hava yastığı, petrol ve kimya endüstrisi katalizörler, elmas aletler, manyetik kayıt ortamları, mıknatıslar, çelik kuşaklı radyal lastikler, diş protezleri ve özel çelikler gibi üretim süreçlerinde de kobalt kullanılmaktadır [15].

Kobalt (Co), atom numarası 27 ve atom ağırlığı 58,93 g/mol olan bir elementtir. Kristal yapıya sahip olup genel olarak kübik, masif, kompakt ve tanesel olarak bulunmaktadır. Erime noktası 1495°C, kaynama noktası 2927°C, oksitlenme sıcaklığı ise 300°C olmakla birlikte oksitlenme kabiliyeti demirden düşüktür [13]. Kobaltın iki tür allotropik özelliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki 417°C'nin altında baskın olup Hekzagonal Sıkı Paket (HSP) yapısına sahip olan β formudur. Bir diğer formu ise Yüzey Merkezli Kübik (YMK) yapıya sahip α -formu olup, 417°C ile kobaltın erime noktası olan 1495°C sıcaklıkta baskın olmaktadır [14]. Yer kabuğunda 25 ppm düzeyinde bulunan kobalt; demir (Fe), nikel (Ni), bakır (Cu), çinko (Zn) ve manganez (Mn) minerallerinin bulunduğu yerlerde mevcuttur. Saf kobalt, maden olarak çok az alanda görülürken, alaşımların bileşimlerinde yüksek oranda bulunmaktadır. Kobaltın en bilinen kaynakları derin deniz nodül tabanları, tortul kaya Cu - Co yatakları, Ni - Co lateritleri, magmatik Ni - Co sülfid yatakları, deniz tabanı masif sülfid yatakları, demir oksit Cu - Au yatakları, meta sedimanter Co - Cu - Au yatakları olarak sıralanmaktadır [15]. Kobaltın endüstriyel ürün olarak kullanılabilmesini sağlayan hidrometalurji, pirometalurji, elektro geri kazanım ve vapometalurji olmak üzere başlıca 4 ekstraktif metalurji yöntemi bulunmaktadır. Hidrometalurji yönteminde, düşük miktarda asit kullanımı ile liç yaygın olarak tercih edilmektedir. Liçe çıkarılan cevherler; belirli sıcaklıkta ısıtılarak inorganik asitler (sülfürik asit, hidroklorik asit, nitrik asit) ile karıştırılmakta ve oksit içerikli kimyasallar ile çöktürülerek endüstriyel alanlarda kullanılabilir hale getirilmektedir. Pirometalurji yönteminde, cevherlerin içerisindeki metallerin ısı yoluyla ayrılarak elde edilmesi gerçekleştirilir. Yaygın olarak eritme yoluyla geri kazanımın mümkün olduğu sülfür cevherlerinde, karbonatlı ve oksit bazlı kobaltlar üzerinde uygulanabilen bir yöntemdir. Elektro geri kazanım yönteminde, metal bakımından zengin çözeltinin süzülmesi işlemi gerçekleştirilir. Süzme işleminden sonra ısıtma ve elektroliz işlemleri ile kobaltın çelik tabaka üzerine çökmesi sağlanır. Vapometalurji yönteminde ise laterit cevherlerindeki kobaltın atmosfer basıncında çıkarılması sağlanmaktadır. İçerisinde metal içeriği bulunan cevher CO ve diğer gazlardan geçirilerek buharlaştırılır ve gazlar, kobalt birikimi için başka bir haznede toplanır [16].

Kobaltın batarya sektöründeki başlıca önemi, diğer metallerin kullanılmasıyla üretilen bataryalarda oluşan sorunların çözülmesidir. Örnek olarak nikel-metal hidrit bataryaların sahip olduğu aşınma ve kısa ömür döngüsü sorunları, batarya içerisine kobaltın eklenmesiyle çözülmüştür. Benzer bir şekilde, LIB'lerin sahip olduğu yüksek reaktivite özelliğinden kaynaklanabilecek yangın riski, LIB'lerin içeriğindeki %60 oranında kobalt ile azaltılmıştır [15].

Küresel olarak, 2019 yılında elektrikli araçların üretiminde 19.000 ton kobalt tüketildiği, 2030 yılına kadar 245 milyon elektrikli araç üretimi öngörüsüyle gerekli olacak kobalt talebinin ise yaklaşık 180.000 ton/yıl olacağı tahmin edilmektedir [17].

Dünya genelinde gerçekleştirilen kobalt üretiminin %98'i bakır ve nikel madenciliğinin yan üretimi olduğu için, kobalta olan talepte gözlemlenen artış, arzda sıkıntıya ve 2016 ile 2018 yılları arasında %311 oranında fiyat artışına neden olmuştur [17]. 2021 yılında ABD İçişleri Bakanlığı'nın yayımladığı Jeoloji Araştırması Maden Emtia Raporu ile kobalt "en kritik 83 hammadde" arasında ilk on sırada yer almıştır [8]. Kobaltın en yaygın tüketicileri arasında ilk sırayı %32 oranıyla Çin Halk Cumhuriyeti almaktadır. Çin Halk Cumhuriyeti'ni %23 oranında Avrupa ülkeleri takip ederken, üçüncü sırada ise %18 ile ABD gelmektedir [18].

Kobaltın üretim verilerine bakıldığında, ABD'nin yayınladığı rapora göre Demokratik Kongo Cumhuriyeti %48,72 oranıyla dünyadaki en büyük kobalt rezervine sahiptir ve dünyadaki kobalt üretiminin %68,42'sini sağlamaktadır. Demokratik Kongo Cumhuriyeti'ni ikinci sırada Avustralya takip etmektedir. Avustralya %18,07 rezerve ve %3,1 oranında üretime sahiptir. Rusya Federasyonu, %3,01 kobalt rezervi ve %4,68 üretim yüzdesi ile üçüncü sırada yer almaktadır [19]. Türkiye'de ise kobalt daha çok laterit ve sülfid yatakları halinde yaygın olarak bulunmaktadır. Rezerv olarak çok düşük olarak bulunmakta olan kobalt, Bursa, Gümüşhane, Kastamonu, Manisa, Sivas ve Uşak'ta bulunmakta ve dünya rezervinin %0,43'ünü oluştururken; Türkiye %1,42 oranında bir üretime sahiptir. Türkiye'de kobaltın ithalat ve ihracat verileri düşük seviyelerdedir. 2020 yılı verileri incelendiğinde 991 kg kobalt ithalatına karşılık 7 kg ihracat gerçekleştirilmiştir. Bu değerler 2021 yılında 1000 kg kobalt ithalatı ve 2 kg kobalt ihracatı şeklinde olmuştur [13].

4. Kobalt Geri Kazanım Yöntemleri (Cobalt Recovery Methods)

Günümüzde kobalta olan talep, oldukça büyük bir artış göstermiştir. Artan talebe karşılık maden olarak neredeyse tek bir ülke tarafından çıkarılmakta olan kobalt, kritik bir hammaddedir ve sürekli tedarik edilebilmesi için LIB'ler gibi kullanıldığı tüm kaynaklardan geri kazanılması üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmada LIB'lerdeki kobaltın geri kazanım yöntemlerine odaklanılmış olup, özellikle LCO ve NMC tipi pillerde en fazla tercih edilen hidrometalurjik ve pirometalurjik geri kazanım yöntemleri ve son dönemde üzerinde çalışılan doğrudan geri kazanım yöntemleri ile ilgili çalışmalar incelenmiş olup, yöntemlerin her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de verilmiştir [1].

Tablo 1. LIB geri kazanım yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [8,20-22]
(Advantages and disadvantages of LIB recovery methods)

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Hidrometalurji	Yüksek geri kazanım oranı Yüksek saflık Düşük enerji gereksinimi Az atık gaz oluşumu	Uzun işlem süresi Atık su oluşumu Atık su oluşumundan kaynaklı maliyet artışı Yüksek enerji tüketimi
Pirometalurji	Her türlü LIB üzerinde uygulanabilmesi Basit işlem Yüksek verim	Zehirli gaz oluşumu Li ve Mn'in geri kazanılamaması Yüksek enerji gereksinimi
Doğrudan Geri Kazanım	Süreç sonunda elde edilen malzemenin direkt kullanılabilmesi Diğer yöntemlere göre daha az çevresel etki Düşük enerji tüketimi	Çalışmaların henüz laboratuvar ölçekli olması Her LIB türünde uygulanamaması Yüksek saflıkta ürün elde etme zorluğu

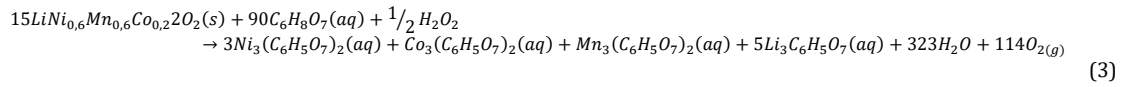
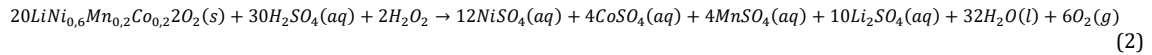
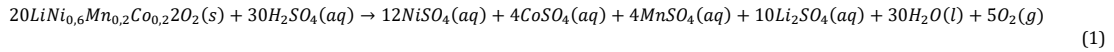
Atık LIB'lerin geri dönüşümünde öncelikle fiziksel olarak ayırım gerçekleştirilir. Mekanik arıtım denilen bu aşamada piller katot, anot ve çelik kasa gibi kısımlarına ayrılır ve çalışmalar, değerli metallerin en yaygın olarak bulunduğu katot üzerinde yapılır. Katot malzeme içerisinde bulunan değerli metallerin geri kazanımı için hazırlanan literatür çalışmaları incelendiğinde en çok "hidrometalurjik" ve "pirometalurjik" yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür.

4.1. Hidrometalurjik yöntemler (Hydrometallurgical methods)

Atık LIB'lerden değerli geçiş metallerini geri kazanabilmek için liç, ekstraksiyon, kristalizasyon ve çökeltme gibi hidrometalurjik işlemler tercih edilmektedir. Kobaltın geri kazanımında en yaygın olarak organik ve inorganik asitler yardımıyla liç yöntemi tercih edilmektedir. Liç işlemi metallerin geri kazanımının yanı sıra, aynı zamanda geri kazanılan değerli metalin kinetiğinde artışı da sağlamaktadır [8]. Santosh vd. (2021)'nin çalışmasında incelendiği üzere +3 değerlikteki Co'nun, liç işlemi sonunda +2 değerliğe sahip olduğu ve kinetiğinde artış gerçekleştiği gözlemlenmiştir [23]. Liç işlemlerinin verimliliğini etkileyen faktörler; sıcaklık, zaman, kullanılan asit ve indirgeyici maddenin türü, hacmi ve miktarı, katı - sıvı oranı olarak listelenebilir [4, 22]. Liç yönteminde, mekanik olarak ayırımı gerçekleştirilen atık pillerin katot malzemeleri alınarak organik veya inorganik asitler yardımıyla sıcaklık, katı - sıvı oranı (eğer kullanılacaksa indirgeyici madde hacmi ve miktarı) ve zaman faktörleri belirlenerek deneye tabi tutulan katot malzeme içerisinden Co'nun geri kazanımı gerçekleştirilmektedir (Şekil 5). İnorganik asit olarak en çok tercih edilen asitler sülfürik asit (H_2SO_4) (1), nitrik asit (HNO_3), hidroklorik asit (HCl) olup, liç kinetiğinin artması için indirgeyici maddeler de kullanılmaktadır (2). Tercih edilen organik asitler ise sitrik asit, malik asit ve askorbik asittir (3). En yaygın kullanılan indirgeyici madde "hidrojen peroksit (H_2O_2)" tir. $H_2O_2 + 3$ değerliğe sahip Co'nun +2'ye indirgenmesini sağlayarak liç verimini artırmaktadır. Hidrojen peroksit dışında indirgeyici olarak askorbik asit, laktoz ve glikoz da tercih edilmektedir.



Şekil 5. Liç yöntemi genel akış şeması (General flowchart of leaching method)



Hidrometalurjik yöntemlerle atık LIB'lerden kobalt geri kazanım çalışmalarındaki koşullar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Hidrometalurjik yöntemlerle kobalt geri kazanımı ile ilgili çalışmalar (Studies on cobalt recovery by hydrometallurgical methods)

Asit	İndirgeyici	Liç Süresi, saat	Katı/Sıvı Oranı (S/L), g/L	Sıcaklık, °C	Co Geri Kazanım Verimi, %	Referans
1,5 mol/L p-toluen sülfonik asit	%0,9 (v/v) H ₂ O ₂	1	80	80	94	[24]
1 M asetik asit 20 g/L tanik asit	-	4	20	25	94	[25]
0,02 M askorbik asit	0,5 M laktik asit	6	2	90	98	[23]
2,5 M H ₂ SO ₄	-	1	0,02	50	90	[26]
2 M H ₂ SO ₄	30 g/L hidrazin sülfat (N ₂ H ₆ SO ₄)	1	50	80	96	[27]
1,5 M sitrik asit 1 M malik asit		0,5	20	95	95 (1,5 M sitrik asit) 98 (1 M malik asit)	[28]
1 M H ₂ SO ₄	%4 (v/v) H ₂ O ₂	1,5	30	70	98,5	[29]
1,5 M malik asit	0,6 g/g üzüm çekirdeği	3	20	80	92	[30]

Tablo 2'deki literatür çalışmaları incelendiğinde, hidrometalurjik yöntemle kobalt geri kazanım sürecinde inorganik asit kullanımında daha çok H₂SO₄ kullanıldığı, indirgeyici madde olarak ise yaygın olarak H₂O₂ tercih edildiği görülmüştür. Farklı sıcaklık koşulları ve çözelti hacimleri ve katı-sıvı oranları ile yapılan çalışmalarda %90'ın üzerinde geri kazanım veriminin elde edildiği görülmüştür. Organik asit kullanılarak gerçekleştirilen hidrometalurjik yöntemle geri kazanımda ise asit türleri çeşitlilik göstermekte olup, farklı çözelti hacimleri ve sıcaklıklarda %90'ın üzerinde geri kazanım verimi elde edildiği görülmektedir.

4.2. Pirometalurjik Yöntemler (Pyrometallurgical methods)

Pirometalurjik proseslerde, redoks reaksiyonlarını tetiklemek ve değerli metalleri saflaştırarak organik bileşenleri ve karbonu yakmak için yüksek sıcaklıklar (400°C – 900°C) kullanılır [31]. Yakma, kalsinasyon ve piroliz, katot malzemelerini geri kazanım için gerçekleştirilen ısı işlemlerinden birkaçıdır [5]. Kimyasal reaksiyonları engelleyen ve metal geri kazanım etkinliğini azaltan PVDF ve grafit gibi organik bileşenleri ortamdan uzaklaştırmak için hidrometalurjik işlemlerden önce de termal ön işlem uygulanabilir. Ayrıca ısı işlem sırasında organik bağlayıcının uzaklaştırılması, aktif maddenin akım toplayıcıdan mekanik bir işlemle ayrılmasını kolaylaştırır. Literatürde, PVDF bağlayıcının ve organik bileşenlerin uzaklaştırılabilmesi için alternatif yöntemler araştırılmış ve n-metil-2-pirolidon (NMP) ve benzeri iyonik sıvılar gibi bazı organik çözücülerle uzaklaştırılabileceği gözlemlenmiştir. Ancak kullanılan kimyasalların yüksek maliyeti ve meydana getirdiği olumsuz çevresel etkiler kullanımda kısıtlamalara neden olmaktadır [32].

Atık LIB'lerde pirometalurjik yöntemler, kolay ölçeklendirme ve işlem süresinin kısa olması nedeniyle daha fazla tercih edilmektedir. Ayrıca atık pillerden oluşabilecek sızıntı şeklinde güvenlik problemi de yoktur. Yakma ve piroliz süreçlerinde meydana gelebilecek gaz oluşumu emisyonlara neden olmaktadır; ancak meydana gelen gaz toplanabilir [31, 32]. Pirometalurjik yöntemler kullanılarak Co

geri kazanımı için yapılmış olan çalışmalar ve ilave işlemler Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. Pirometalurjik yöntemlerle kobalt geri kazanımı ile ilgili çalışmalar (Studies on cobalt recovery by pyrometallurgical methods)

Yöntem	Sıcaklık, °C	Süre, dk	Isıtma hızı, °C/dk	İlave işlem	Co Geri Kazanım Verimi, %	Referans
Tavlama	500	120	10	4 M H ₂ SO ₄ 0,1 g/mL S/L 80°C, 30 dk liç	99	[33]
Karbotermal indirgeme	700	60	10	Saf su 0°C	100	[34]
Kalsinasyon	600	240	-	20 g/L, 90 dk liç 0,65 M Glisin %5 H ₂ O ₂ 30 g/L S/L 62,5°C, 2 saat liç	89	[35]
Piroliz	450	60	10	0,4 mol/L H ₂ SO ₄ 20 g/L S/L 80°C, 1 saat liç	99,5	[12]
Piroliz	500	15	10	Ultrasonik temizleme 40 g/L S/L 2 L/dk havalandırma hızında yüzdürme	%96,88 katot geri kazanım verimi	[36]
Piroliz	550	15	10	1800 rpm hız, 28°C sıcaklık 40 g/L katı-sıvı oranı 2 L/dk havalandırma hızı n-Dodekan ve Metil İzobütl Karbinol (MIBC) ile yüzdürme	%98 katot geri kazanım verimi	[37]
Kalsinasyon	700	120	-	1,2 M Malik Asit 40 g/L S/L %1,5 (v/v) H ₂ O ₂ 90°C, 30 dk liç	94,3	[38]
Kalsinasyon	610	300	-	1,5 M laktik asit %0,5 (v/v) H ₂ O ₂ 20 g/L S/L 70°C, 20 dk liç	98,9	[39]

Tablo 3'teki çalışmalar incelendiğinde, katot malzeme içerisinde bulunan PVDF bağlayıcının katot malzemeden uzaklaştırılması için piroliz, kalsinasyon, tavlama ve karbotermal indirgeme yöntemlerinin tercih edildiği görülmektedir. Piroliz uygulanan çalışmalara bakıldığında ise yaygın olarak 10°C/dk ısıtma hızında N₂ atmosferinde çalışıldığı görülmüştür. İncelenen diğer literatür çalışmaları içerisinde PVDF bağlayıcının, n-metil-2-pirolidon (NMP) ve iyonik sıvılar ile çözünebileceğinden bahsedilmiştir [31]. Ancak tercih edilebilecek çözeltilerin yüksek maliyetleri ve safsızlıkları giderme konusundaki eksiklikleri nedeniyle süreç içerisinde giderimi ölçeklendirmek zor olmaktadır. Ayrıca NMP gibi organik çözücülerin kullanımı beraberinde olumsuz çevresel etkiler meydana getirmektedir. Bu nedenle termal işlemlerin varlığı önem kazanmaktadır.

4.3. Doğrudan geri kazanım (Direct recovery)

Doğrudan geri kazanım, orijinal bileşik yapılarını koruyarak LIB'lerin aktif malzemelerini doğrudan toplamak ve geri kazanım için önerilen bir geri kazanım yöntemi olup, pil malzemelerinin orijinal kimyasal yapısını ve işlem değerini doğrudan geri kazanarak ve yeniden kullanarak korumak için bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Bu süreçte, ana geri kazanım "hedefi" olan aktif malzemelerin kimyasal olarak parçalanmasını önlemek için pil bileşenleri öncelikle fiziksel ayırma yöntemleri, manyetik ayırma ve ılımlı bir termal işlem kullanılarak ayrıştırılır. Doğrudan geri kazanım yaklaşımının başlıca avantajları şunlardır:

- Nispeten basit bir süreç,
- Aktif malzemelerin rejenerasyondan sonra doğrudan yeniden kullanılabilmesi,
- Pirometalurji ve hidrometalurjik yöntemlere oranla daha düşük emisyonlar ve daha az ikincil kirliliğe sahip olmasıdır.

Doğrudan geri kazanım sürecinin başlıca dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir:

- Tam aktif malzeme kimyasına dayalı titiz bir ayıklama/ön işleme gerektirmesi,

- Tutarlı yüksek saflık ve bozulmamış kristal yapıyı garanti etmenin zor olması ve bu durumun akü endüstrisinin gerektirdiği titiz standartları karşılayamaması,
- Şimdiye kadar sadece laboratuvar ölçeğinde var olan kanıtlanmamış bir teknoloji olması,
- Girdi akışı değişikliklerine karşı önemli ölçüde hassas olması,
- Esnek olmayan bir süreç olmasıdır [40].

Genel olarak, doğrudan geri kazanım süreci pirometalurjik ve hidrometalurjik süreçlere oranla hem ekonomik faydalara hem de daha az sera gazı emisyonuna sahiptir. Üretim atıklarını geri kazanmak için düşük enerji tüketimli doğrudan geri kazanım süreci kullanılabilir [41].

Doğrudan geri kazanım yöntemi, ön arıtım, geri kazanım ve rejenerasyon olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, iki adımlı bir ön arıtım gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamanın ilk adımında pillerin oluşturabileceği kısa devre gibi riskli durumların önlenmesi için çözelti içerisinde bekletilerek pillerin boşaltılması sağlanır. İkinci adımda ise boşaltılmış olan pilin içerisinden katot aktif malzemenin alınabilmesi için manuel olarak ayırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Manuel olarak ayırma işleminde ortaya çıkabilecek gaz sorunlarının oluşmaması için süperkritik sıvı olarak CO₂ kullanımıyla elektrolit ekstraksiyonu uygulanabilmektedir [42].

Bir diğer ön arıtım yöntemi olarak kabul edilen delaminasyon yönteminde ise katot malzeme diğer pil elemanlarından manuel olarak ayrılır. Ancak bu süreç içerisinde de PVDF bağlayıcı engel olarak çıkar. Bu yöntem içerisinde de amaç katot malzemenin içerisinden PVDF ve Al folyonun uzaklaştırılmasıdır. PVDF termal olarak 350–600°C sıcaklık aralığında katot malzemedan uzaklaşır. Yapılan literatür taramalarında 550°C'de azot gazı atmosferinde gerçekleştirilen piroliz işlemlerinde bu ayrılmanın başarılı olduğu görülmüştür [42].

Geri kazanım aşamasında ise piroliz sonunda elde edilen ürünün köpük ile yüzdürülmesi sağlanarak işlem sonunda katot malzemedeki hidrofilik ve grafit tozları hidrofobik hale gelir. Köpük yüzdürme yöntemiyle hidrofobik olan grafit tozları hava kabarcıklarına tutunarak köpük ürünü oluştururken, katot malzeme hidrofil kısımda kalır. Bu süreç iki malzemenin birbirinden ayrılmasını kolaylaştırır ve ilerleyen aşamalarda katot aktif malzemenin saflığında artış sağlar [43].

Rejenerasyon aşamasında, süreç içerisinde geri kazanılan katot malzemenin elektriksel temas ve kapasite kaybına uğraması nedeniyle kapasitesinin eski haline getirilmesi için işlemler yapılmaktadır. Bu işlemler katı hal (solid-state), hidrotermal, redoks aracı, iyonotermal ve elektrokimyasal relithitasyon (yeniden işleme) gibi rejenerasyon işlemleridir. Katı hal relithitasyon işleminde, katot malzemenin yeniden oluşturulabilmesi için lityum karbonat (Li₂CO₃) ve lityum nitrat (LiNO₃) reaktifleri kullanılmaktadır. Reaktiflerin yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile toz parçacıkları yoğunlaşarak katot malzemenin yeniden oluşumu sağlanır [44]. Hidrotermal relithitasyonda ise kapalı bir hidrotermal reaktör içerisinde lityum içerikli çözeltiler kullanılmaktadır. Katı hal yöntemiyle karşılaştırıldığında bu yöntemde daha düşük sıcaklıkla işlem yapılabilir [45]. Redoks aracı relithitasyonda, süreçte kullanılan lityum kaynakları ile katot malzeme arasında yük değişimi gerçekleştirilir. Sıcaklık, basınç gereksinimini azaltmak ve malzemenin kinetiğini iyileştirebilmek için hidrotermal relithitasyon ile birleştirilerek de uygulanabilmektedir [46]. İyonotermal relithitasyonda, lityum kaynağı olarak iyonik sıvıların içerisindeki lityum tuzları kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemde katot malzemesinin iyileştirilebilmesi için ek işlemlere gerek duyulabilir [47]. Elektrokimyasal relithitasyonda ise lityum içerikli çözelti içerisinde katot malzeme, platin anot ve gümüş (Ag) ya da gümüş klorür (AgCl) referans elektrotlu üçlü bir sistem kurulmasıyla katot malzeme içerisine lityum iyonlarının yerleştirilmesi sağlanır [48].

Doğrudan geri kazanım yöntemlerinin uygulanmış olduğu çalışmalar Tablo 4'te verilmiştir. Çalışmalara bakıldığında sonuçların metal geri kazanımı olarak değil var olan malzemenin kapasitesinin iyileştirilmesi yönünde uygulamalar yapıldığı görülmüştür. Çalışmalarda doğrudan geri kazanım yönteminin daha çok, daha basit yapılı piller üzerinde uygulandığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Doğrudan geri kazanım yöntemleri ile ilgili çalışmalar (Studies on direct recovery methods)

Pil Türü	Yöntem	Sıcaklık	Zaman	Verim	Referans
NMC	Termal Relithitasyon	950°C	-	114 mAh/g kapasite	[49]
LCO	Hidrotermal Relithitasyon	180°C	2 saat	98 mAh/g kapasite	[50]
LCO	Hidrotermal	220°C	4 saat	141,9 mAh/g kapasite	[45]
	Tavlama	800°C	4 saat		
NMC	Hidrotermal	220°C	4 saat	122,6 mAh/g kapasite	[51]
	Tavlama	850°C O ₂	4 saat		
		atmosferi			
LCO	Li ₂ CO ₃ ile Katı Faz Sinterleme	850°C	-	140,1 mAh/g kapasite	[52]
LCO	Hidrotermal	80°C	6 saat	132,9 mAh/g kapasite	[53]

3. Sonuç (Conclusion)

Önümüzdeki yıllarda bataryalar ve LIB'lerin kullanım oranlarının daha da fazlaşması, gerek Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı gerekse Döngüsel Ekonomi Eylem Planları kapsamında değerli metal geri kazanımının öneminin de artacağı anlamına gelmektedir. Bu artış beraberinde hammadde tedariği, atık oluşumu ve maliyet gibi birtakım sorunları da getirmekte dolayısıyla hem ülkeler hem de araştırmacılar LIB'lerin içindeki değerli metallerin geri kazanımı ile ilgili çalışmalarını artırmaktadırlar.

LIB'lerin katot malzemelerindeki metaller hem ekonomik hem de miktar olarak oldukça önemlidir. Katot malzeme içerisindeki değerli metallerden birisi olan kobalt, dünya çapında kritik metal olarak ilk 10 element arasında yer almaktadır. Kobaltın çıkarıldığı bölgelerin politik durumları, miktar olarak da sınırlı olması, hammadde tedariği ve ekonomik açıdan kobaltı ithal eden ülkelere zorluk oluşturabilmektedir. LIB'lerden kobalt geri kazanımı, sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından önemlidir.

Bu kapsamda, Avrupa Birliği'nde 28 Temmuz 2023 tarihinde yayımlanan Bataryalar ve Atık Bataryalara İlişkin Yönetmelik ile aktif malzemelerde bulunan ve batarya üretim atıklarından veya tüketim sonrası atıklardan geri kazanılan kobalt, lityum, kurşun veya nikelin yüzdelere içeren dokümanın batarya ile birlikte sunulma yükümlülüğü gelmiştir. Ayrıca, üreticilerin endüstriyel, elektrikli araçlar ve belirli otomotiv bataryalarında geri dönüştürülmüş metal için minimum yüzde eşiklerini de karşılaması gerekecektir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında önemli bir başarı olan bu yönetmelik, bataryaları, malzemelerin tedarik edilmesinden toplanmasına, geri dönüştürülmesine ve yeniden kullanılmasına kadar tüm yaşam döngüleri boyunca sürdürülebilir hale getirerek AB'nin hem döngüsel ekonomiyi hem de sıfır kirlilik hedeflerini öne çıkarmaktadır. Yeni kurallar, Avrupa'nın temiz enerjiye geçişini destekleyen ve yakıt ithalatına bağımlılığı azaltan, rekabetçi ve sürdürülebilir batarya endüstrisinin geliştirilmesini teşvik eden temel bir çerçeve oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, toplanan tüm bataryalarda özellikle bakır, kobalt, lityum, nikel ve kurşun gibi değerli metallerin geri kazanımı sağlanmalı ve daha verimli ve inovatif çözüm önerileri geliştirilmelidir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Komisyonu 23LÖT177 No'lu proje ve TÜBİTAK 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı 1649B022314782 No'lu proje kapsamında desteklenmektedir

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] R. Zhang, X. Shi, O. C. Esan, and L. An "Organic Electrolytes Recycling From Spent Lithium-Ion Batteries," *John Wiley and Sons Inc. in Global Challenges* vol. 6, no. 12, June 2022. doi:10.1002/gch2.202200050
- [2] S. Windisch-Kern, E. Gerold, T. Nigl, A. Jandric, M. Altendorfer, B. Rutrecht, S. Scherhauser, H. Raupenstrauch, R. Pomberger, H. Antrekowitsch, and F. Part "Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies," *Waste Management*, vol. 138, pp. 125–139, February 2022. doi:10.1016/j.wasman.2021.11.038
- [3] V. Henze, "China's Battery Supply Chain Tops BNEF Ranking for Third Consecutive Time, with Canada a Close Second," *BloombergNEF*, Nov. 12, 2022. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/chinas-battery-supply-chain-tops-bnef-ranking-for-thirdconsecutive-time-with-canada-a-close-second/> [Accessed: Sept. 10, 2023].
- [4] M. Kaya, "State-of-the-art lithium-ion battery recycling Technologies," *Circular Economy*, vol. 1, no. 2, pp. 100015, December 2022. doi:10.1016/j.cec.2022.100015
- [5] G. Mishra, R. Jha, A. Meshram and K. K. Singh "A review on recycling of lithium-ion batteries to recover critical metals," *Journal of Environmental Chemical Engineering* vol. 10, no. 6, pp. 108354, December 2022. doi:10.1016/j.jece.2022.108534
- [6] O. Velázquez-Martínez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter and R. Serna-Guerrero, "A critical review of lithium-ion battery recycling processes from a circular economy perspective," *MDPI In Batteries* vol. 5, no. 4, pp. 60-93, November 2019. doi:10.3390/batteries5040068
- [7] Y. Shen, "Recycling cathode materials of spent lithium-ion batteries for advanced catalysts production," *Journal of Power Sources* vol. 528, April 2022. doi:10.1016/j.jpowsour.2022.231220
- [8] A. B. Botelho Junior, S. Stopic, B. Friedrich, J. A. Soares Tenório and D. C. R. Espinosa, "Cobalt recovery from li-ion battery recycling: A critical review," *MDPI In Metals*, vol. 11, no. 12, December 2021. doi:10.3390/met11121999
- [9] B. Chapman "How Does a Lithium-Ion Battery Work?" Let's Talk Science," Sept. 23, 2019 [Online]. Available: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-incontext/how-does-a-lithium-ion-battery-work> [Accessed: Mar. 29, 2023].
- [10] A. W. Golubkov, D. Fuchs, J. Wagner, H. Wiltsche, C. Stangl, G. Fauler, G. Voitic, A. Thaler and V. Hacker "Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metaloxide and olivin-type cathodes," *RSC Advances*, vol. 4, no. 7, pp. 3633–3642, November 2013. doi:10.1039/c3ra45748f
- [11] J. J. Roy, B. Cao and S. Madhavi "A review on the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs) by the bioleaching approach," *Chemosphere*, vol. 282, November 2021. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130944
- [12] R. Tao, P. Xing, H. Li, Y. Wu, S. Li and Z. Sun "Full-component pyrolysis coupled with reduction of cathode material for recovery of spent LiNi_xCo_yMn_zO₂ lithium-ion batteries," *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 9, no. 18, pp. 6318–6328, April 2021. doi:10.1021/acssuschemeng.1c00210
- [13] F. Arıkan, "Dünyada ve Türkiye’de Kobalt," Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTA), 2022. [Online]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/madenserisi/kobalt.pdf> [Accessed: Mar. 24, 2023].
- [14] S. Ndlovu, "The wear properties of tungsten carbide-cobalt hardmetals from the nanoscale up to the macroscopic scale," Ph.D. dissertation, Erlangen-Nürnberg Univ., Erlangen, Deutschland, 2009.
- [15] İstanbul Maden İhracatçıları Birliği "Kobalt Yataklarının Durumu, İşletmeciliği ve Geleceği," 2023. [Online] Available: <https://imib.org.tr/maden/kobalt/> [Accessed: Feb. 20, 2024]
- [16] S. H. Farjana, N. Huda and M. A. P. Mahmud, "Life cycle assessment of cobalt extraction process," *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, no. 3, pp. 150-161, August 2019. doi:10.1016/j.jsm.2019.03.002
- [17] J. C. Y. Jung, P. C. Sui, and J. Zhang "A review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments," *Journal of Energy Storage*, vol. 35, March 2021. doi:10.1016/j.est.2020.102217
- [18] U.S. Department of Interior, "Mineral Commodity Summaries," *U.S. Geological Survey*, January 2022. doi:10.3133/mcs2022
- [19] U.S. Department of Interior, "Mineral Commodity Summaries," *U.S. Geological Survey*, January 2023. doi:10.3133/mcs2023
- [20] E. Asadi Dalini, Gh. Karimi, S. Zandevakili and M. Goodarzi "A review on environmental, economic and hydrometallurgical processes of recycling spent lithium-ion batteries," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 42, no. 7, pp. 451-472, July 2020. doi:10.1080/08827508.2020.1781628
- [21] M. B. Mansur, A. S. Guimaraes and M. Petranikova, "An overview on the recovery of cobalt from end-of-life lithium ion batteries," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 43, no. 4, pp. 489-509, February 2021. doi:10.1080/08827508.2021.1883014

- [22] L. F. Zhou, D. Yang, T. Du, H. Gong, and W. B. Luo "The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries," *Frontiers in Chemistry* vol. 8, December 2020. doi:10.3389/fchem.2020.578044
- [23] G. Santhosh, and G. P. Nayaka "Cobalt recovery from spent Li-ion batteries using lactic acid as dissolution agent," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 3, pp. 100122, July 2021. doi:10.1016/j.clet.2021.100122
- [24] J. Liu, T. Y. Mak, Z. Meng, X. Wang, Y. Cao, Z. Lu, D. W. Suen, X. Lu and Y. Tang "Efficient recovery of lithium as Li_2CO_3 and cobalt as Co_3O_4 from spent lithium-ion batteries after leaching with p-toluene sulfonic acid," *Hydrometallurgy*, vol. 216, pp. 106012, February 2023. doi:10.1016/hydromet.2022.106012
- [25] E. Prasetyo, W. A. Muryanta, A. G. Anggraini, S. Sudibyo, M. Amin and M. Al Muttaqii, M. "Tannic acid as a novel and green leaching reagent for cobalt and lithium recycling from spent lithium-ion batteries," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 24, no. 3, pp. 927-938, February 2022. doi:10.1007/s10163-022-01368-y
- [26] N. Vieceli, R. Casasola, G. Lombardo, B. Ebin and M. Petranikova "Hydrometallurgical recycling of EV lithium-ion batteries: Effects of incineration on the leaching efficiency of metals using sulfuric acid," *Waste Management*, vol. 125, pp. 192-203, April 2021. doi:10.1016/j.wasman.2021.02.039
- [27] J. Yang, L. Xing Jiang, F. Yang Liu, M. Jia and Y. Qing Lai "Reductive acid leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries using hydrazine sulfate as reductant," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 30, no. 8, pp. 2256-2264, August 2020. doi:10.1016/S1003-6326(20)65376-6
- [28] B. Musariri, G. Akdogan, C. Dorfling and S. Bradshaw, S. "Evaluating organic acids as alternative leaching reagents for metal recovery from lithium ion batteries," *Minerals Engineering*, vol. 137, pp. 108-117, June 2019. doi:10.1016/j.mineng.2019.03.027
- [29] X. Chen, C. Guo, H. Ma, J. Li, T. Zhou, L. Cao and D. Kang "Organic reductants based leaching: A sustainable process for the recovery of valuable metals from spent lithium ion batteries," *Waste Management*, vol. 75, pp. 459-468, May 2018. doi:10.1016/j.wasman.2018.01.021
- [30] Y. Zhang, Q. Meng, P. Dong, J. Duan and Y. Lin "Use of grape seed as reductant for leaching of cobalt from spent lithium-ion batteries," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 66, pp. 86-93, October 2018. doi:10.1016/j.jiec.2018.05.004
- [31] G. Lombardo, B. Ebin, B. M. Steenari, M. Alemrajabi, I. Karlsson and M. Petranikova "Comparison of the effects of incineration, vacuum pyrolysis and dynamic pyrolysis on the composition of NMC-lithium battery cathode-material production scraps and separation of the current collector," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, pp. 105142 January 2021. doi:10.1016/j.resconrec.2020.105142
- [32] C. Liu, J. Lin, H. Cao, Y. Zhang and Z. Sun, "Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, pp. 801-813, August 2019. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.304
- [33] N. Wei, Y. He, G. Zhang, Y. Feng, J. Li, Q. Lu and Y. Fu, "Recycling of valuable metals from spent lithium-ion batteries by self-supplied reductant roasting," *Journal of Environmental Management*, vol. 329, pp. 117107, March 2023. doi:10.1016/j.jenvman.2022.117107
- [34] T. Rostami, B. Khoshandam and S. Maroufi "Recovery of lithium, cobalt, nickel, and manganese from spent lithium-ion batteries through a wet-thermal process," *Materials Research Bulletin*, vol. 153, pp. 111897, September 2022. doi:10.1016/j.materresbull.2022.111897
- [35] M. Sethurajan, M. G. P. Shirodker, E. R. Rene and E. D. van Hullebusch "Hydrometallurgical leaching and recovery of cobalt from lithium ion battery," *Environmental Technology and Innovation*, vol. 28, pp. 102915, November 2022. doi:10.1016/j.eti.2022.102915
- [36] G. Zhang, Z. Du, Y. He, H. Wang, W. Xie and T. Zhang "A sustainable process for the recovery of anode and cathode materials derived from spent lithium-ion batteries," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 8, April 2019. doi:10.3390/su11082363
- [37] G. Zhang, Y. He, H. Wang, Y. Feng, W. Xie and X. Zhu "Application of mechanical crushing combined with pyrolysis-enhanced flotation technology to recover graphite and LiCoO_2 from spent lithium-ion batteries," *Journal of Cleaner Production*, vol. 231, pp. 1418-1427, September 2019. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.279
- [38] C. Sun, L. Xu, X. Chen, T. Qiu, & T. Zhou "Sustainable recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using DL-malic acid: Leaching and kinetics aspect," *Waste Management & Research*, vol. 36, no. 2, pp. 113-120, February 2018. doi:10.1177/0734242X1774427
- [39] L. Li, E. Fan, Y. Guan, X. Zhang, Q. Xue, L. Wei, F. Wu and R. Chen "Sustainable recovery of cathode materials from spent lithium-ion batteries using lactic acid leaching system," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 5224-5233, May 2017. doi:10.1021/acssuschemeng.7b00571
- [40] M. Chen, X. Ma, B. Chen, R. Arsenault, P. Karlson, N. Simon and Y. Wang "Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries," *Joule*, vol. 3, no. 11, pp. 2622-2646, November 2019. doi:10.1016/j.joule.2019.09.014
- [41] C. P. Makwarimba, M. Tang, Y. Peng, S. Lu, L. Zheng, Z. Zhao and A. G. Zhen "Assessment of recycling methods and processes for lithium-ion batteries," *iScience*, vol. 25, no. 5, pp. 104321, May 2022. doi:10.1016/j.isci.2022.104321

- [42] T. W. Wang, T. Liu and H. Sun "Direct Recycling for Advancing Sustainable Battery Solutions," *Materials Today Energy*, vol. 38, pp.101434, December 2023. doi:10.1016/j.mtener.2023.101434
- [43] S. Sloop, L. Crandon, M. Allen, K. Koetje, L. Reed, L. Gaines, W. Sirisaksoontorn and M. Lerner "A direct recycling case study from a lithium-ion battery recall," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 25, pp. e00152, September 2020. doi:10.1016/j.susmat.2020.e00152
- [44] J. Yang, W. Wang, H. Yang and D. Wang "One-pot compositional and structural regeneration of degraded LiCoO₂ for directly reusing it as a high-performance lithium-ion battery cathode," *Green Chemistry*, vol. 22, no. 19, pp. 6489-6496, September 2020. doi:10.1039/d0gc02662j
- [45] Y. Shi, G. Chen and Z. Chen "Effective regeneration of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries: a direct approach towards high-performance active particles," *Green Chemistry*, vol. 20, no. 4, pp. 851-862, January 2018. doi:10.1039/c7gc02831h
- [46] X. Yu, S. Yu, Z. Yang, H. Gao, P. Xu, G. Cai, S. Rose, C. Brooks, P. Liu and Z. Chen "Achieving low-temperature hydrothermal relithiation by redox mediation for direct recycling of spent lithium-ion battery cathodes," *Energy Storage*, vol. 51, pp. 54-62, October 2022. doi:10.1016/j.ensm.2022.06.017
- [47] T. Wang, H. Luo, Y. Bai, J. Li, I. Belharouak and S. Dai "Direct recycling of spent NCM cathodes through ionothermal lithiation," *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 30, June 2020. doi:10.1002/aenm.202001204
- [48] L. Zhang, Z. Xu and Z. He, "Electrochemical relithiation for direct regeneration of LiCoO₂ materials from spent lithium-ion battery electrodes," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 8, no. 31, pp. 11596-11605, July 2020. doi:10.1021/acsschemeng.0c02854
- [49] Y. Han, Y. You, C. Hou, X. Xiao, Y. Xing and Y. Zhao "Regeneration of single-crystal LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ cathode materials from spent power lithium-ion batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 168, no. 4, April 2021. doi:10.1149/1945-7111/abf4e8
- [50] Y. Gao, Y. Li, J. Li, H. Xie and Y. Chen "Direct recovery of LiCoO₂ from the recycled lithium-ion batteries via structure restoration," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 845, pp. 156234, December 2020. doi:10.1016/j.jallcom.2020.156234
- [51] Y. Shi, G. Chen, F. Liu, X. Yue and Z. Chen "Resolving the compositional and structural defects of degraded LiNi_xCo_yMn_zO₂ particles to directly regenerate high-performance lithium-ion battery cathodes," *ACS Energy Letters*, vol. 3, no. 7, pp. 1683-1692, June 2018. doi:10.1021/acsenerylett.8b0083
- [52] S. Chen, T. He, Y. Lu, Y. Su, J. Tian, Li, N. Li, G. Chen, L. Bao and F. Wu "Renovation of LiCoO₂ with outstanding cycling stability by thermal treatment with Li₂CO₃ from spent Li-ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 8, pp. 262-273, November 2016. doi:10.1016/j.est.2016.10.008
- [53] Z. Zhang, W. He, G. Li, J. Xia, H. Hu and J. Huang, "Ultrasound-assisted hydrothermal renovation of LiCoO₂ from the cathode of spent lithium-ion batteries," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 9, no. 7, pp. 3691-3700, July 2014. doi:10.1016/S14523981(23)08042-2

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Sustainable Wood Plastic Composite Materials: Raw Materials, Structural Properties, Production Processes and Current Trends

Gözde Çolak Bayram^{a,b}, Gamzenur Özsin^c, Burçin Atılgan Türkmen^d

Submitted: 13.03.2024 Revised: 03.06.2024 Accepted: 23.08.2024 doi:10.30855/gmbd.075A09

ABSTRACT

Keywords: Composite, polymer, wood, production technologies, sustainability.

^aBilecik Şeyh Edebali University, Graduate School, Chemical Engineering 11230 - Bilecik, Türkiye
^bİşıksöy Textile Inc. Demirtaş Dumlupınar Organized Industrial Zone 16245 Bursa/Türkiye
Orcid: 0000-0002-2170-4838

^cBilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering 11230 - Bilecik, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5091-5485
e mail: gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr

^dBilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering 11230 - Bilecik, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3220-3817

^{*}Corresponding author:
gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Kompozit, polimer, ahşap, üretim teknolojileri, sürdürülebilirlik.

In parallel with technological developments, the need for affordable, functional and sustainable materials is increasing day by day. At this point, wood composite materials, which provide many economic and environmental advantages compared to traditional polymer matrix composites, attract great interest due to their functionality in a variety of engineering applications. In this study, the structural properties of functional wood plastic composites were examined before the sustainability analysis and the current market analysis was made by evaluating the usage areas of these materials. Furthermore, information about these materials' production methods is presented, and approaches for improving material properties are evaluated. The literature review compiled integrated information on the recent progress of these composites and the development of material properties. Thus, by emphasizing the importance of wood-plastic composite materials in terms of sustainability, it is aimed to provide researchers with a basis for the structural properties, production technologies and sectoral trends of these materials.

Sürdürülebilir Ahşap Plastik Kompozit Malzemeler: Hammaddeler, Yapısal Özellikler, Üretim Süreçleri ve Güncel Eğilimler

ÖZ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, ucuz, fonksiyonel ve sürdürülebilir malzemelere olan ihtiyaç gün geçtikçe daha artmaktadır. Bu noktada, geleneksel polimer matris kompozitlere oranla hem ekonomik hem de çevresel yönden pek çok avantaj sağlayan ahşap kompozit malzemeler, farklı mühendislik uygulamalarında işlevselliklerinden ötürü yoğun bir ilgi çekmektedir. Bu çalışmada, sürdürülebilirlik analizi öncesinde fonksiyonel ahşap plastik kompozitlerin yapısal özellikleri incelenmiş ve bu malzemelerin kullanım alanları değerlendirilerek güncel pazar analizi yapılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin üretim yöntemleri hakkında bilgiler sunulmuş, malzeme özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak kullanılabilecek yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Yapılan literatür taraması ile bu kompozitlerin güncel gelişimi ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesi konularında ulaşılan bütünlük bilgileri derlenmiştir.

1. Giriş (Introduction)

Çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik kavramlarının günümüzde gitgide önem kazanması nedeniyle kompozit malzemeler alanında da sürdürülebilirlik çalışmalarına odaklanılarak bu konuda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Basitçe, önemli ölçüde farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşen malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan, çeşitli kombinasyonlarla kendi yapısını oluşturan bileşenlerden farklı benzersiz özelliklere sahip bir malzeme olarak tanımlanabilen [1] kompozit malzemeler, yoğun günlük ve endüstriyel kullanım talebine paralel olarak sürdürülebilir üretim teknolojileri ve hammadde gereksinimi göstermektedir. Bu nedenle, malzeme yapısı ile, sürdürülebilirlik yaklaşımlarının analiz edilmesi bir zorunluluk olarak göze çarpmaktadır.

Kompozit malzemelerin üretiminde, bu malzemeleri oluşturan her bir bileşenin tek başına sahip olduğu özelliklerden daha fazla üstün özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanıp, üretilmesi ya da maliyet avantajı sağlayacak şekilde üretimi amaçlanmaktadır [2-4]. Böylelikle geleneksel malzemelerin özelliklerinin yetersiz kaldığı durumlarda bileşenlerin sinerjik etkilerinden de faydalanarak pek çok gelişmiş fiziksel ve kimyasal özellikler elde edilebilmektedir [5,6]. Örneğin, tokluk, hafiflik, korozyon direnci gibi malzeme özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan pek çok kompozit malzeme tasarımları yapılarak, farklı uygulamalar için bu fonksiyonel malzemeler tercih edilmektedir [1-6].

Kompozit malzemeler özelinde, bu çalışmada odaklanılan ahşap-plastik kompozit (APK) malzemeler, plastik malzemeler veya masif ahşap gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında birçok avantaj sunmaktadırlar. Örneğin, bu malzemelerin üretim sürecine ikincil atıkların, ağaç liflerinin, yenilmeyen biyokütle parçalarının katılması ile yerel kaynakların kullanımı sağlanarak, karbon ayak izi azaltılabilmekte, enerji verimliliği artırılarak, uzun kullanım ömrüne sahip olan, dayanıklı fonksiyonel malzemeler elde edilebilmektedir. Fakat bu malzemelerin sürdürülebilirlik performanslarının malzemelerin tedariki, üretim süreçleri, yapıda kullanılan ahşap ve polimer fazları, katkı maddeleri, kullanım ömrü sonu bertaraf seçenekleri, ürün tasarımı ve bu kompozitlerin nihai uygulama alanları gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değiştiği de bilinmektedir. Bu nedenle, herhangi bir malzeme grubunda olduğu gibi, APK'lerin çevresel etkilerini ve faydalarını tam olarak anlamak için bu malzemelerin yapısı, özellikleri ve üretim yöntemleri incelenerek kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirilmesi yapılması son derece önem arz etmektedir. Bu çalışmada, hammaddeler, üretim süreci, uygulama alanı ve alandaki gelişmeler ve yenilikler de dahil olmak üzere APK malzemeler hakkında güncel bilgiler derlenerek sunulmuştur. Böylece, hammadde tedarikinden, üretim sürecine, uygulama alanlarına ve pazar eğilimlerine kadar sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesi, Ar-Ge yoluyla inovasyonun teşvik edilmesine katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

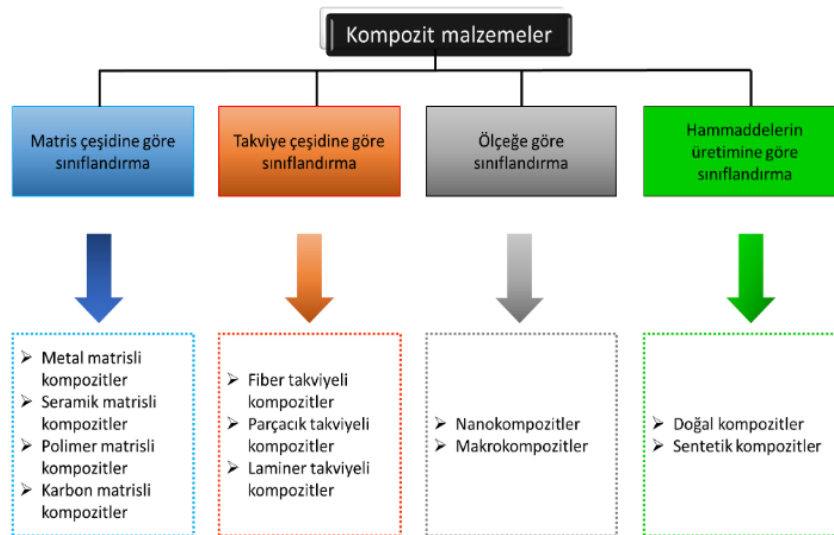
2. Kompozit Malzemeler ve APK Malzemeler (Composite Materials and WPC Materials)

Teknolojik ilerlemeler, malzemelerin özelliklerinin, dayanıklılığının, işlevselliğinin ve geliştirilmesine ve çeşitlendirilmesini gerektirmektedir. Bu noktada, fonksiyonel kompozit malzemelerin, malzeme niteliklerini iyileştirme kapasitesinden dolayı bu çeşit malzemelere olan talep günden güne artmaktadır. Geleneksel malzemelerle kıyaslandığında daha geniş uygulama alanları için uygulanabilir kompozit malzemeler, temel olarak, kompozit malzemeler matris (reçine) ve takviye edici malzeme olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Matris yapı (faz) elemanı (materyal) uygulanan bir kuvveti ara yüzey bağı yoluyla takviye edici faza iletir ve dağıtır. Böylece kompozit içinde bulunan takviye fazını planlanan şekilde tutarak uygulamalar esnasında karşılaşılabilecek olası tahribatı önleyebilmektedir. Matris genellikle süneklik, şekillendirilebilirlik ve termal iletkenlik gibi belirli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip nispeten yumuşak bir faz olarak görülmektedir ve kompozit içerisinde hacimsel olarak çoğunlukta olan bileşen olup, konumlarını koruyarak takviye malzemelerini çevrelemektedir [7]. Takviyeler ise matris özelliklerini geliştirmek için yapıda yer almaktadır ve sahip olduğu özelliklerini tasarlanan kompozit malzemeye taşımaktadır [8, 9]. Kompozit içerisinde bulunan takviye malzemeleri elyaf ve partikül gibi farklı morfolojik özelliklere sahip olabilirken, kompozit malzemelerin sınıflandırılması matris fazı da göz önünde bulundurularak

yapılabilmektedir. Kompozit malzemelerde kullanılacak takviye ile uyumlu olarak kullanılması gereken matris, temel olarak takviye malzemelerini hasardan koruyabilecek uygun düşük yoğunluğa ve mukavemete sahip malzeme gruplarından seçilmektedir [10-12].

Yapılarında farklı malzeme grupları barındıran kompozit malzemelerin sınıflandırılması farklı kriterler göz önünde bulundurularak yapılabilmektedir [13,14]. Şekil 1'de verildiği üzere bu konudaki en temel sınıflandırma, kompozitte kullanılan matris malzemesinin çeşidine göre yapılmaktadır. Buna göre kompozitler metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler gibi alt gruplara ayrılmaktadır. Takviye çeşidine göre yapılan sınıflandırmada ise, fiber takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler ve lamina takviyeli kompozitler gibi kompozit grupları yer almaktadır. Ayrıca, nanoteknolojideki gelişmelere paralel olarak, nano ölçekli takviyelerden oluşan kompozitler de ayrı bir sınıflandırmaya tabi tutularak nanokompozitler olarak adlandırılmaktadır. Bu sınıftaki nanokompozitler bile geleneksel kompozitler gibi matris ve takviye tiplerine göre ayrı bir sınıflandırma içine katılabilmektedir [15]. Son olarak ise, doğada kolayca bulunabilen "doğal kompozitler" olarak adlandırılan başka bir sınıflandırma da literatürde sıklıkla karşılaşılan bir başka terminolojidir [13]. Bu tanım aslında, sentetik olarak endüstriyel işlemlerden geçerek insan eliyle üretilmeyen, doğada kendiliğinden bulunan doğal malzemelerin matris ve takviye olarak kullanıldığı kompozitleri içine alarak, ahşap, kemik, biyolojik lifler gibi farklı malzemeleri yapısında bulundurabilir [16].

Kompozit malzemeler içinde önemli bir grubu oluşturan polimer matris kompozitler karbon, cam, Kevlar, metal fiberlerin gibi farklı takviyelerin termoset veya termoplastik matrise dağıtılması ile elde edilmektedir [17,18]. Bu kompozitler kolay kullanım teknikleri ve basit imalat yöntemleri nedeniyle düşük maliyetli olarak üretilmekte ve pek çok uygulamalarda kullanılabilir [19, 20]. Polimer matrisler hafif, yumuşak ve viskoelastik malzemeler olduğu için yapıda özellikle yük azaltma amacıyla önemli avantajlar sağlamaktadır [21]. Bu kompozit malzemelerin içinde yer alan APK'ler ise lignoselülozik yapıdaki doğal malzemeler ile plastiklerin kombinasyonları ile elde edilmektedir.

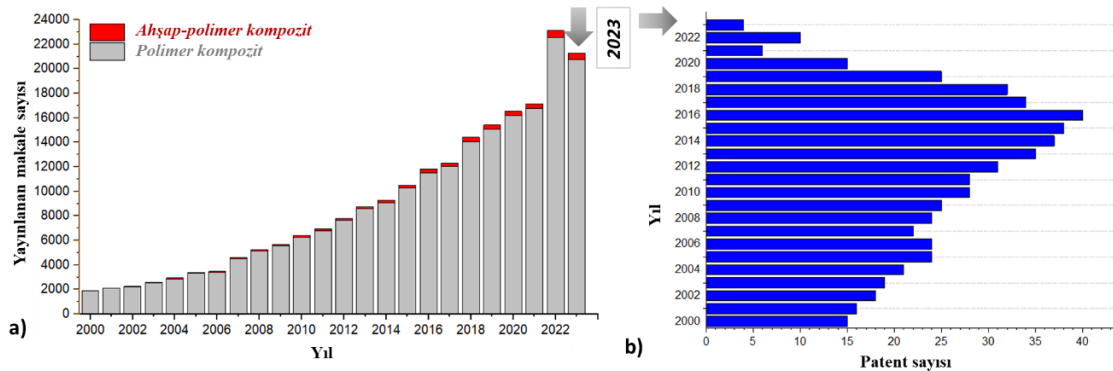


Şekil 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Classification of composite materials)

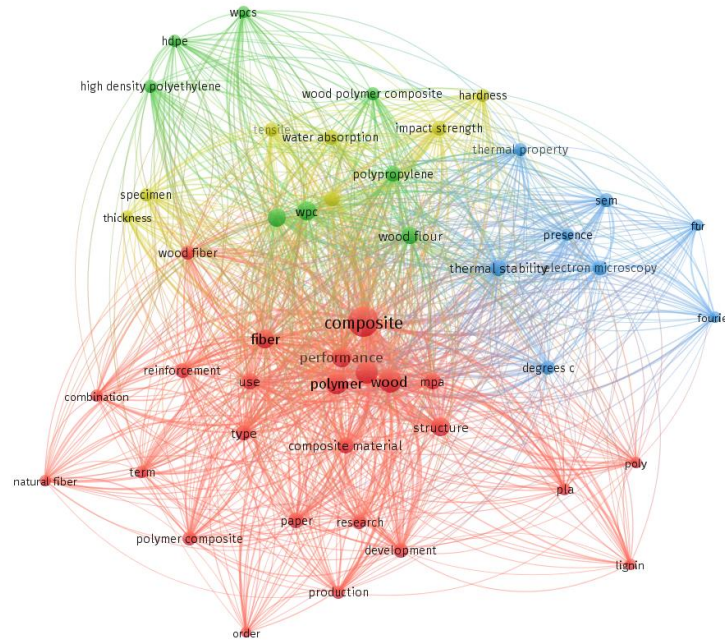
3. APK Malzemeler (WPC Materials)

APK terimi bitki lifleri ve termosetler veya termoplastikler içeren kompozit malzemeyi ifade etmektedir. Yaygın olarak bu kompozitlerin üretiminde, odun ya da ahşap unlarının veya fiberleri ile termoplastik esaslı polietilen (PE), polipropilen (PP), polilaktik asit (PLA), polivinilklorür (PVC), polietilen tereftalat (PET) ve polistiren (PS) polimerleri kullanılabilir [22]. Ayrıca APK'lerin üretiminde geri dönüştürülmüş polimerlerin de kullanılması ile hem çevresel hem de ekonomik bakımdan büyük bir avantaj elde

edilebilmektedir [23]. APK, kendisini oluşturan plastik ve ahşaba kıyasla daha üstün özelliklere sahip olması dolayısıyla tüm dünyada geniş kullanım alanlarına sahiptir. Bu üstün özellikler arasında plastik malzemeye kıyasla daha düşük maliyetli olmaları ve doğada daha kolay bozularak çevre dostu olmaları, ahşap malzemeye kıyasla ise daha iyi boyutsal dayanıklılığa sahip olmaları yer almaktadır. Ayrıca bu malzemeler istenilen boyut ve şekilde, farklı renk ve dokuda üretilebilmeleri, çatlamalara, mantarlara ve böceklere karşı daha dayanıklı olmaları ve geri dönüştürülmüş ve/veya atık malzemelerden üretilebilmeleri nedeniyle de pek çok uygulama için önemli avantajlar sağlamaktadır [24, 25]. Bu nedenle APK'ler üzerine günümüzde yoğun araştırmalar yürütülerek bu yapıların özelliklerinin geliştirilmesi, yeni reçeteler hazırlanarak hedeflenen bileşimin endüstriyel üretim sürecine katılması ve mevcut APK malzemelerin üretiminin optimizasyonunu hedeflenmektedir. Şekil 2'de son yıllarda APK malzemeler hakkında yürütülen bilimsel çalışmalar ve alınan patent sayıları verilmiştir. Sayısal sonuçlar incelendiğinde, polimer kompozitlere oranla, bu APK'ler hakkında yürütülen çalışmaların günümüzde halen yeterli seviyeye ulaşmadığı belirtilebilir. Özellikle bu APK'lerin geleceği hakkında yapılan tahminlemelere göre talep ve üretiminin artacağı da göz önüne alınarak araştırmacıların bu konuda daha sürdürülebilir üretim teknolojilerine, hammadde kullanımına ve çevre-dostu üretim proseslerine odaklanmaları gerekmektedir. Örneğin Fortune Business Insights tarafından yapılan pazar araştırmaları, APK pazar büyüklüğünün 2019'da 4,77 milyar ABD Doları olduğunu ve bu pazarın tahmin döneminde yaklaşık %8,6'lık bir bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) sergileyerek 2027 yılına kadar 9,03 milyar ABD Dolarına ulaşacağını göstermiştir [26]. Precedence Research tarafından yapılan bir başka araştırmaya göre ise küresel APK pazar büyüklüğünün 2030 yılına kadar yaklaşık 17,56 milyar ABD dolara ulaşacağı tahmin edilmekte ve 2022 ve 2030'dan itibaren %12,38'lik birleşik yıllık büyüme oranı sergileyeceği öngörülmektedir [27]. Pazar hacmindeki artış tahminlemelere paralel olarak, bu konuda yapılacak araştırma-geliştirme çalışmalarının da artacağı beklenmektedir. Bu noktada kaçınılmaz olarak hem araştırmacıların hem de sanayicilerin endüstriyel ve çevresel sürdürülebilirlik kısıtlarına odaklanması bir zorunluluk haline gelmiştir. Şekil 3'te ise APK malzemeler hakkında yürütülen bilimsel çalışmaların bibliyometrik analizini gerçekleştirebilmek için 2020-2024 (Şubat) arasında Web of Science'da bulunan tüm veri tabanlarından elde edilen bilgiler işlenerek bir kelime ağ haritası oluşturularak, son yıllarda bu konularda çalışılan anahtar kelimeler analiz edilmiştir. Şekilde bu konulardaki yapılan çalışmaların malzemenin performansını geliştirmek üzere yoğunlaştığı saptanmıştır.



Şekil 2. Yıllara göre polimer kompozit (PK) ve APK içerikli yayınlanan makale sayıları (a) ve APK malzemeler hakkındaki patent sayıları [28-30](Number of articles published on polymer composite (PK) and APK content by years (a) and number of patents on APK materials)



Şekil 3. 2020-2024 yılları arasında veri tabanlarında bulunan APK malzemelere ilişkin kelime madenciliği analizi (Word mining analysis of APK materials found in databases between 2020-2024)

3.1. APK malzemelerin uygulama alanları (Application fields of WPC materials)

APK malzemelerden imal edilen endüstriyel parçalar son derece geniş uygulama alanına sahiptir. Bu malzemeler, geleneksel kompozitler, polimer malzemeler ve ham ahşap esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında, sürdürülebilirlik, kalite ve maliyet bakımından önemli avantajlar sağladığı için, birçok alanda geleneksel malzemelere ve geleneksel kompozitlere ikame olarak kullanılabilir. Aynı zamanda APK malzemelerin, koruyucu maddelerle işlenmiş masif ahşap veya çürümeye dayanıklı türlerden masif ahşap malzemelere daha az bakım gerektirdiği bilinmektedir. Bu nedenle, inşaat, mobilya, otomotiv, elektronik endüstrilerde ve kaplama ile paketleme uygulamalarında APK malzemeler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunların yanı sıra, spor ve müzik aletleri yapımında da APK parçalar sıklıkla kullanılabilir. Örneğin, lamine kayak malzemeleri, golf malzemeleri, hokey ve beyzbol sopalarının üretiminde APK malzemeler yer almaktadır. Müzik aletlerine örnek olarak ise, nefesli ve telli çalgıların imalatında bu kompozitlerin kullanımı sıralanabilir. Yapı malzemelerinde ahşap plastik kullanımına yönelik uygulamalar arasında ise, elektrik direkleri, çitler, güverteler ve bina dış cephe kaplamaları gibi uygulamalar yer almaktadır [31-36].

APK üretim teknolojilerinin sürdürülebilirliği ve üretim maliyeti; teknolojik gelişmelere paralel bir şekilde düşük maliyetli üretim yöntemleri ve talaş artıklarının kullanımının artması ile giderek artmaktadır. Ayrıca, endüstriyel malzeme üretim tesisleri üzerinde sürekli artan petrol fiyatları nedeniyle ve petrol-esaslı polimer malzemelerin kullanımının azaltılması yönünde baskılar oluşturmaktadır. Özellikle otomotiv ve ulaşım araçlarının imalatında yenilenebilir biyokütle malzemelerin hammadde olarak kullanımı ile daha çevre dostu ve düşük maliyetli APK malzemelerin geliştirildiği dikkat çekmektedir. Bu sektörlerde daha yüksek performans, daha üstün güvenlik, daha yüksek konfor, daha çok yakıt tasarrufu ve daha düşük üretim maliyetlerine ulaşılması istenilirken, çevre dostu teknolojilerin daha çok kullanılması yönünde toplumsal baskılar da gün geçtikçe artmaktadır. Otomotiv sektöründe ahşap kompozit malzemeler kontrol panellerinde, kapı panellerinde, raflarda, koltuk minderlerinde, koltuk sırtlıklarında, kabin kaplamalarında, bagaj halılarında, bagaj yan giydirme ve şapkalıktaki gibi trim parçalarının imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. Teknik açıdan bakıldığında, bu kompozitler araçta mekanik mukavemeti ve akustik performansı artırmakta, malzeme ağırlığını ve yakıt tüketimini azaltmaktadır. Ayrıca, geliştirilen malzeme yapılarıyla cam elyaf ve karbon esaslı kompozit ve hatta metal parçaların yerini alma potansiyeline sahiptir.

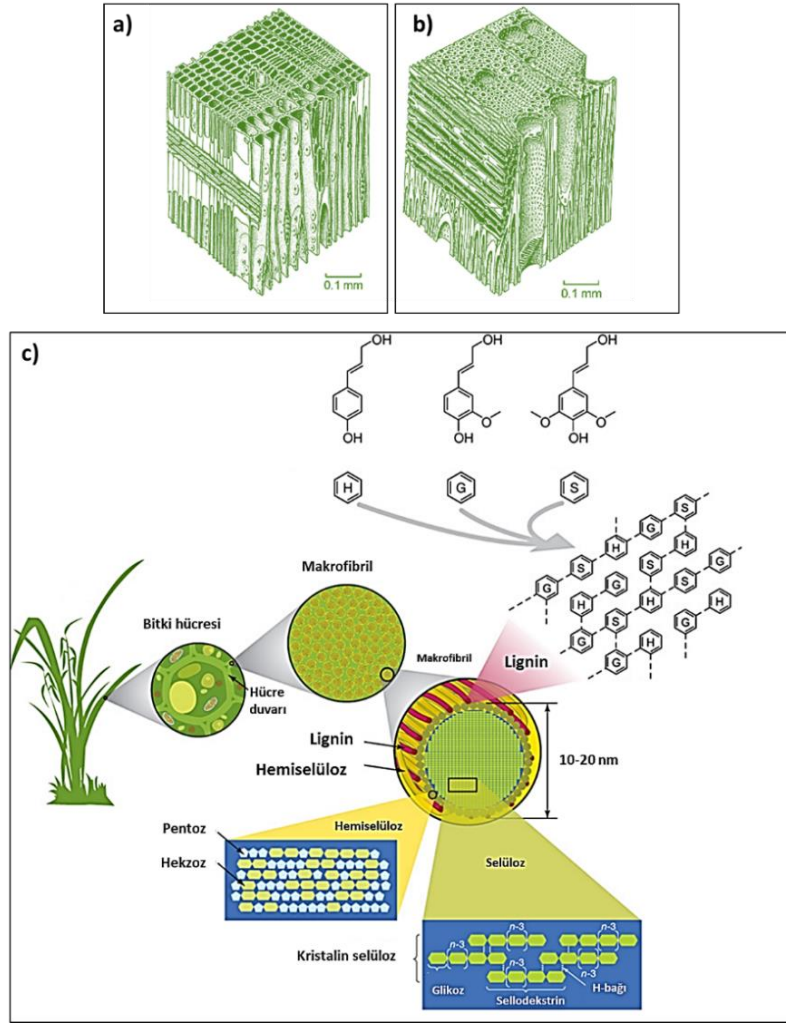
APK kompozit malzemelerin, katma değere sahip teknolojik ürünlerde kullanımının gün geçtikçe yaygınlaşması ile hem endüstriyel imalat sektöründe hem de kırsal alanlarda çalışan insanlar için de ekonomik kalkınmaya önemli bir katkı sağlanmaktadır. Bu nedenle, APK malzemelerin kullanımının günden güne artması ve yeni kullanım alanlarının yaratması hem modern yaşamda sağladığı avantajlar hem de çevresel ve sosyoekonomik faydaları nedeniyle son derece önem arz etmektedir [25, 37].

3.2. APK üretiminde kullanılan hammaddeler (Raw materials used in WPC production)

APK malzemeler temelde iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar termoplastik ya da termosetlerden polimerler ve lignoselülozik biyokütledir. Bunların yanında, malzeme özelliklerini geliştirmek için çeşitli katkılar ve dolgular da yapıya eklenmektedir. Lignoselülozik biyokütle, adından da anlaşılacağı gibi lignin, selüloz ve hemiselülozdan oluşan doğal bir kompozit malzeme yapısındadır. Ahşap terimi ise genel olarak ağaç gövdesinden elde edilen sert odunumsu biyokütleri tanımlayan bir terim olarak kullanılmaktadır. Fakat APK üretiminde hem sert odunumsu (hardwood) hem de yumuşak odunumsu (softwood) biyokütle kaynakları kullanılmaktadır. Bu nedenle literatürde bu konuda bir ikilem meydana gelmesine rağmen günlük pratik kullanıma uygunluğundan dolayı APK terimi sıklıkla tercih edilmektedir. Sert ve yumuşak odunsu biyokütle tanımları doğrudan biyokütlenin mekanik sağlamlığını tanımlamasa da genel olarak biyokütlenin özelliklerini yansıtmaktadır. Yumuşak odunsular, iğne ve iğnemesi yapraklara sahip biyokütledir ve genellikle daha düşük yoğunluklara sahiptir, açık renkli yapıdadır. Yumuşak odunsular, genellikle sert odunsulardan daha hızlı büyürler ve daha kolay işlenebilirler. Örneğin, çam, köknar, ladin, karaçam ve sedir ağaçları yumuşak odunsular arasında yer alır. Sert odunsular ise genellikle geniş yaprakları ve koyu renklidir. Sert odunsular, yumuşaklardan daha yüksek yoğunluklara ve daha kalın hücre duvarlarına sahiptirler. Örneğin, meşe, dişbudak, karaağaç, kayın, huş ağacı gibi kaynaklar sert odunsular arasında yer almaktadır [38]. Sert veya yumuşak sınıflandırmasından bağımsız olarak tüm biyokütle kaynakları heterojen ve anizotrop yapıdadır. Kimyasal olarak lignin, selüloz ve hemiselüloz temel bileşenlerinin yanı sıra biyokütle kaynakları yapısında çok az miktarda su, düşük molekül ağırlıklı organik ekstraktifler ve inorganikler de içermektedir. Şekil 4'de yumuşak odunsu ve sert odunsu biyokütlenin yapısal farklılıkları ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi gösterilmiştir.

Biyokütlenin yapısında lignin ve hemiselüloz mikrofibrilleri, kristalin selüloz tarafından çevrelenmiş bir şekilde bulunur. Selüloz ağsı bir yapıda olan ve biyokütlerde mikrofibriller halinde olan bir biyopolimerdir. Hemiselüloz ise heterojen ve amorf bir yapıda olan dallanmış bir moleküldür. Hemiselüloz, her bir selüloz mikrofibrilinin yüzeyine kovalent olmayan bağlarla sıkıca bağlanmış bir şekilde bulunur. Lignin ise büyük ve çapraz bağlı, amorf polimerik yapı olup, hemiselüloz moleküllerine kovalent bağlarla bağlıdır [39-42].

APK'lerin üretiminde odun partikül ve liflerinin yanında çeşitli türlerde tarımsal bitki atıkları, kenevir ve kenaf gibi tabii lifler de kullanılabilir. Çoğunlukla lifsi yapıdaki biyokütle kaynakları; çeşitli meyvelerden (pamuk, hindistan cevizi lifi), bitki saplarından (jüt, kenevir, kenaf) ya da yapraklarından (sisal, kendir) elde edilmektedir [43,44]. Günümüzde farklı atık biyokütle kaynaklarının APK yapısında hem endüstriyel ölçekte hem de araştırma amacıyla kullanım örnekleri bulunmaktadır. Tablo 1'de de görülebileceği gibi malzeme üretiminde biyokütle kullanımı, geleneksel fosil yakıt bazlı malzeme üretimine sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Fakat endüstriyel uygulanabilirlik açısından, biyokütle kaynağının kompozit içerisindeki performansının yanı sıra bu kaynağın ucuz bir şekilde tedariğinin sürdürülebilmesi göz önünde bulundurulması gereken en önemli kriter olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, endüstriyel üretim tesislerinde bölgesel olarak temininde sıkıntı yaşanmayacak biyokütlerin işlenmesi tercih edilmektedir.



Şekil 4. Yumuşak odunsu (a) ve sert odunsu (b) biyokütle yapısı ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi (c) [39].
(Softwoody (a) and hardwoody (b) biomass structure and biochemical composition of biomass)

APK üretiminde kullanılan lignoselülozik biyokütle kimyasal yapısı nedeniyle tipik olarak polar, hidrofiliktirler. Polimer matrisi ise genellikle polar olmayan ve hidrofobik bileşiklerdir. Sonuç olarak, bu temel farklılık nedeniyle biyokütlenin ıslanabilirliğini geliştirmek için çok sayıda modifikasyon yöntemi de APK'lerin geliştirilmesi sürecinde araştırılmaktadır. Dolgu maddelerinin ve polimer matrislerin yüzeylerini iyileştirmek için uygulanabilecek modifikasyon yöntemleri fiziksel ve kimyasal yöntemler olarak sınıflandırılır [45-47]. Ahşap ile polimer matris arasındaki uyumluluğu arttırmak, mekanik özellikleri geliştirmek, dayanıklılığı arttırmak ve istenilen performans özelliklerine ulaşmak modifikasyon tekniklerinin amacıdır. Kurutma, öğütme, yüzey pürüzlendirme gibi uygulanacak fiziksel ön işlemler, biyokütlenin nem içeriğini azaltma, biyokütlenin matris içindeki dağılımını artırma ve biyokütlenin yüzey alanı artırılarak polimer ile daha iyi yapışmayı sağlamayı amaçlamaktadır. Kimyasal modifikasyon, modifiye edici kimyasalın ahşabın mikro yapısına nüfuz etmesini gerektirir. Uygulanabilecek kimyasal işlemler sonucu, kimyasalların hücre duvarlarında ve/veya ahşabın lümenlerinde birikmesi ve lignoselülozik yapı ile etkileşmesi gerçekleşir [48]. Alkali işlemler, silanlama, asetilasyon, peroksit işlemi gibi kimyasal modifikasyon işlemleri gibi biyokütlenin yüzey kimyasına etki ederek matrisle daha iyi etkileşim sağlamayı amaçlamaktadır [49-54].

Tablo 1. Lignoselülozik biyokütlenin APK malzeme üretim süreçlerine katılmasının sunacağı avantajlar
(Advantages of incorporating lignocellulosic biomass into WPC material production processes)

Yenilenebilir olması	Sonlu olan ve sonunda tükenen fosil kaynakların aksine, biyokütle sürekli olarak büyütülebilir ve hasat edilebilir.
Biyobozunur olması	Mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanabilmesi nedeniyle biyokütle çevre dostu bir malzemedir.
Karbon nötr olması	Biyokütle, büyüdükçe atmosferdeki karbondioksiti emer ve bu da kullanımı sırasında oluşan emisyonları dengelemeye yardımcı olur. Dolayısıyla, biyokütle üretimi ve kullanımı, geleneksel fosil yakıt bazlı malzeme üretimine kıyasla sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir.
Çok yönlü ve çok çeşitli olması	Farklı biyokütle çeşitleri malzeme üretimi için hammadde olarak veya doğrudan kullanımı ile çok yönlü bir malzeme kaynağıdır. Böylece geleneksel malzemelere sürdürülebilir alternatiflerin üretilmesine olanak tanır ve mevcut malzeme teknolojilerine uyum sağlar.
Yerel kalkınmayı desteklemesi	Biyokütle, yerel olarak yetiştirilebilir ve hasat edilebilir, bu da uzun mesafeli nakliye ihtiyacını ve buna bağlı emisyonları azaltır. Bu aynı zamanda yerel ekonomik kalkınma ve iş yaratma için fırsatlar yaratır.
Eldesinde düşük enerji gerektirmesi	Biyokütle esaslı malzemelerin fosil kaynaklı ürünlerin üretiminden daha az enerji gerektirir, bu da sera gazı emisyonlarını ve yenilenemeyen kaynakların kullanımını azaltır.
Atık minimizasyonuna katkı sağlaması	Düzenli depolama alanlarına gönderilecek olan gıda, tarımsal ve ormancılık atıklarının malzeme üretim kullanılabilir değerli bir kaynak yaratılması bu atıkların çevresel etkisini azaltır.

APK malzemelerin üretiminde polimer hammaddeleri açısından, termoplastikler, termosetler ve elastomerleri içeren birçok farklı polimer türü kullanılabilir. Ancak dikkate alınması gereken temel husus kullanılacak polimerin çalışma sıcaklığıdır. Ahşabın kompozit içinde işlenmesiyle getirilen sınırlamalar nedeniyle, APK'lerin üretimi için yalnızca 200 °C'in altındaki sıcaklıklarda işlenebilen polimerler üretimde kullanılabilir [55]. Yaygın olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), Poliamid (PA), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS), APK malzemelerin üretiminde kullanılabilir [56, 57]. Sıcaklık karşısında sergilediği davranış bakımından termoplastikler sıklıkla üretimde kullanılmasına rağmen termosetlerin kullanıldığı APK üretimlerine de rastlanmaktadır. Termoset polimerler ısıtıldığında erimeyen veya yumuşamayan yapıya sahiptirler ve bu yapıların çok yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla polimer yapısı bozunur. Epoksi, polivinil ester, polyester, poliüretanlar, fenolik, formaldehit gibi ısı ile sertleşen polimerler, ahşap kompozit uygulamalarında kullanılarak elde edilen malzemeye dayanıklılık, termal kararlılık, dolgu maddesinin ıslanabilirliği, elektrik ve ısı yalıtımı, sürünme direnci, kimyasal direnç, viskozite ve moleküler çapraz bağlanma açısından avantajlar sağlayabilmektedir. Epoksi polimer reçineler ise dolgu maddeleriyle iyi arayüzeyde bağlanması, düşük viskoziteye sahip olması, daha yüksek ıslanabilirlik, termal kararlılık ve mekanik performans göstermesinin yanı sıra kürlenmeden sonra düşük çekme ve daha iyi kimyasal direnç göstermesi gibi sergilediği avantajlar nedeniyle mevcut termosetler arasında tercih edilebilmektedir [58]. Özetle üretilecek kompozit yapının nihai kullanım amacı doğrultusunda polimer tercihi ve malzeme tasarımı yapılmaktadır. Ayrıca yine nihai ürün özellikleri göz önünde bulundurularak farklı polimerlerin sentezi ve ahşap polimer kompozitlerdeki performansının incelenmesi çalışmaları da yürütülmektedir. Geri dönüştürülmüş polimerlerin kompozitlerdeki performanslarının incelenmesi ise son yıllarda ahşap kompozit malzeme üretiminde odaklanılan konular arasında yer almaktadır [59-61]. Bu çalışmalar atık polimerlerin ürün döngüsüne geri katılarak döngüsel ekonomiye katkı sağlanmasını ve endüstriyel simbiyozun desteklenmesini hedeflemektedir.

APK malzemelerinde kullanılacak dolgu maddeleri organik ve inorganik yapıda olabilmesine rağmen, üretimde genellikle inorganik dolgu materyalleri tercih edilmektedir. Dolgular, son ürün maliyetini azaltmanın yanı sıra ilave edildikleri ürünlerin özelliklerinin yapısını bozmayacak şekilde tercih edilmektedir. Bu maddeler, genel olarak kompozit bileşimine katılarak özgül ağırlık, elastik modül, basma direnci, eğme direnci, sertlik gibi değerlere mekanik özellikleri etkiler. Kalsiyum, talk, kalsiyum karbonat, alüminyum silikat, kil, cam dolgu, metal oksit benzeri maddeler, sıklıkla kullanılan dolgu maddelerine örnek verilebilir. Katkı maddeleri ise APK'lerin çeşitli amaçlar için kullanılabilmesini sağlayan oldukça önemli bileşenleridir.

APK malzemelerde kullanılan katkı maddeleri arasında yağlayıcılar, reoloji kontrol katkıları, bağlayıcılar, stabilize ediciler, yoğunluk azaltıcılar, biyositler, alev geciktiriciler, duman bastırıcılar, renklendiriciler gibi farklı amaçlarla kullanılan malzemeler yer almaktadır. Yapıya çok az miktarda etkilenen bu katkıları, nihai ürün özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilecek niteliktedirler. Özellikle uyumlaştırıcılar olarak da bilinen bağlayıcı ajanlar, farklı yapıda olan polimerik ve lignoselülozik malzemelerin homojen bir şekilde karışımını sağlayarak nihai üründe istenen yapıyı sağlamak açısından son derece önem taşımaktadır. Günümüzde maleik anhidrit grafted polipropilen (MAPP) ve maleik anhidrit grafted polietilen (MAPE) bu amaçla yaygın olarak kullanılan kimyasallardandır [62-64].

3.3 APK malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler (Methods used in the production of WPC materials)

Genel olarak APK malzemelerin üretimi eriyik polimerin lignoselülozik biyokütle ve uygun katkı ve dolgu malzemelerin karıştırılması ile üretilir. Fakat üretim öncesinde biyokütle ve polimer arasındaki ara yüzey özelliklerini iyileştirmek ve biyokütlenin hidrofilik yapısını modifiye etmek için biyokütle bazı ön işleme tabi tutulmaktadır. Bu ön işlemler kimyasal, mekanik ve termal yöntemler olabilmektedir. Bu ön işlemlerden, kimyasal işlemlerin çevresel etkileri nedeniyle gerekmedikçe tercih edilmezken, mekanik ve ısıl yöntemlerin uygulanması ana işlem basamaklarından önce genellikle yapılmaktadır.

Kimyasal ön işlemler bitkisel lifler ve polimer arasındaki ıslanma özelliklerini iyileştirmeyi, esnek ve sert bir ara yüzey tabakası oluşturmayı, gelişmiş çapraz bağlı ara yüzey geliştirmeyi, polimer/lif ıslanmasını artırmayı ve liflerin yüzey enerjisini değiştirmeyi amaçlayabilir. Bu amaçlar doğrultusunda kimyasallar ya polimerdeki fonksiyonel gruplarla ya da biyokütle üzerindeki hidroksil gibi fonksiyonel gruplarla tepkimeye girer. Mekanik işlem yöntemleri ise liflerin polimer matris ile bağlanma özelliklerini geliştirmek için ağaç liflerinin yüzey ve yapısal özelliklerinin değiştirilmesini amaçlamaktadır [65]. Hidrofilik gözenekli bir yapıya sahip olan biyokütle yapısında hidroksilin de olduğu farklı fonksiyonel grupları bulundurur ve hidrojen bağı ile su molekülleri ile etkileşir. Bu nedenle, nemli ortamlarda ham biyokütle su tutabilir ve oluşturulacak nihai kompozit yapısını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle ana işlemler öncesi uygulanacak termal yöntemler ile biyokütle ısıtılarak yapının boyutsal kararlılığı sağlanır ve nihai kompozitin yıllar içinde bozunma ve çürümesinin önüne geçilir [66-68].

APK malzemeler için birincil üretim teknolojileri; ekstrüzyon, basınçlı kalıplama ve enjeksiyonlu kalıplama olarak sıralanabilir. Bu geleneksel yöntemlerin yanı sıra termoforming ve lazer sinterleme, üç boyutlu yazıcı ile üretim gibi farklı inovatif yöntemlerde kompozitlerin eldesi için uygulanabilmektedir. APK'ler için uygun imalat yönteminin seçimi, polimer çeşidine, ürün bileşimine ve geometrisine, çevre koşullarına, maliyete bağlı olarak yapılmaktadır. Fakat kullanılacak polimerin çeşidi ve termoset veya termoplastik yapısı, imalat yönteminin seçimindeki en önemli parametredir [58].

Ekstrüzyon yöntemi, APK malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntemde polimer eritilerek, ahşap ve katkı maddeleri ile seçilen kompozisyona göre karıştırılmaktadır. Uygulanan ısı ve basınç ile akışkan hale getirilen polimerik ham madde, ahşap, dolgu ve katkı maddeleri sisteme eklendikten sonra şekil verilip katılaştırılır. Başka bir deyişle ısıtılan kompozit bileşenleri bir metal bloğunun içerisinde sıkıştırılarak, daha küçük kesit alanına sahip kalıp boşluğundan akmaya zorlanır ve bu sırada deformasyona uğrar. Ekstrüzyon işleminde farklı geometrilerdeki vidalı ekstrüder, çift vidalı ekstrüder ve ortak yoğurucu ekstrüderler kullanılabilir [65,70,71]. Ekstrüzyon yönteminde vidanın hızı (devir sayısı) ve eriyik polimer sıcaklığı, işlem basıncı, ekstrüder vidasının uzunluk/çap oranı, heliks şekli ve açısı, ekstrüderden malzeme çıkış süresi gibi işlem parametreleri sürece etki etmektedir. Sürekli olarak yürütülen ekstrüzyon proseslerindeki temel hedef, en uygun kalitedeki kompozitin fire vermeden üretmektir. Ayrıca, ekstrüzyon yöntemleri; malzemenin akış yönü ve kuvvetin iletiliş biçimine göre dört sınıfta incelenebilir. Bunlar temel olarak; direkt ekstrüzyon, indirekt ekstrüzyon, püskürtmeli ekstrüzyon ve hidrostatik ekstrüzyondur. Bununla birlikte günümüzde en çok direkt ve indirekt ekstrüzyon yöntemlerinin kullanıldığı bilinmektedir. Ekstrüzyon yönteminde birçok parametrenin profil kalitesine etkisi bulunmaktadır. Bu parametrelerden biri sıcaklıktır. Ekstrüzyon sıcaklığının ürün kalitesine ve matris ömrüne iki farklı açıdan etkisi söz konusudur.

Ürün kalitesi açısından, çıkış sıcaklığı ısıtım proseslerini ve boyut kararlılığını etkilemektedir, aynı zamanda ekstrüzyon hatalarına da yol açabilmektedir. Ekstrüzyon sıcaklığı matris ömrü açısından da kritik bir konudur. Ürünün matristen çıkış sıcaklığı sonuç itibarıyla matris kanalındaki sıcaklık artışıyla ilintilidir, bu nedenle ürün çıkış sıcaklığı matris aşınması ve matris performansı için de bir kistas olabilmektedir [71]. Bir diğer parametre ise sürtünmedir. Sürtünme, gerekli ekstrüzyon kuvvetini yükseltmekte, daha güçlü preslerin kullanılmasını gerekli kılmakta ve takım boyutlarının büyümesine neden olmaktadır [73,74].

APK üretiminde yaygın olarak kullanılan bir diğer teknoloji ise basınçlı kalıplamadır. Bu yöntemde, kalıplama tozu, pul, granül veya pelet formundaki malzemenin aynı anda ısıtılıp, belirli bir şekle sıkıştırıldığı sıcak presleme olarak da bilinmektedir [69]. İşlem sırasında, ısıtılmış bir kalıbın iki yarısı arasında deforme olabilen kompozit karışımı preslenip, soğuma veya kürleşmeden sonra kalıplanmış bir kompozite elde edilmektedir [74]. Basınçlı kalıplama prosesleri, otomotiv endüstrisi de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel sektörlerde çeşitli uygulamaların nedeni olan hem termoplastikler hem de termosetler için yüksek derecede otomasyon, kısa çevrim süreleri, iyi tekrar üretilebilirlik ve mükemmel boyutsal kararlılık sunması bakımından son derece avantajlı bir üretim yöntemidir [75]. Özellikle, termoset polimerlere kıyasla termoplastik polimerlerin kullanıldığı APK'lerin üretimi için bu yöntemin uygun olduğu kanıtlanmıştır. Çünkü bu yöntemde hammaddelerin, kontrollü basınç ile farklı katman yönelimlerinin böylece kalıplamadan sonra korunması sağlanabilmektedir [76].

Enjeksiyonlu kalıplama tekniği daha karmaşık kompozit malzeme şekillerinin ve geometrilerin üretilmesi için tercih edilen, bir başka APK üretim tekniğidir [77]. Bu yöntemde hammadde genellikle enjeksiyon kalıplama makinesine granüller halinde eklenir ve sıvı bir kütle halinde eritilir ve ardından yüksek basınç altında kalıba yerleştirilir. Enjeksiyonlu kalıplama, basınçlı kalıplamaya kıyasla ölçek ekonomisi, minimum bükülme ve çekme, yüksek işlev entegrasyonu olasılığı, geri dönüştürülmüş malzeme kullanım olasılığı ve neredeyse hiç son işlem gerektirmemesi gibi bir dizi avantaja sahiptir. Enjeksiyonlu kalıplama prosesleri düşük viskoziteyi korumak için düşük moleküler ağırlığa sahip bir polimerik yapı gerektirirken; ekstrüzyonda daha iyi erime mukavemeti için daha yüksek moleküler ağırlığa sahip polimerler kullanılabilir [76].

APK malzemeler için en uygun üretim yönteminin seçilmesi, nihai ürünün istenen özellikleri, üretim ölçeği, mevcut kaynaklar ve maliyet hususları dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olarak yapılmalıdır. Bu amaçla öncelikle ürünün gereksinimlerinin doğru bir şekilde tanımlanması, buna uygun olacak şekilde biyokütle ve polimerik fazların seçimi, en uygun katkı maddesi ile yapı-özellik ilişkisini sağlayacak optimum karışım oranlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Ardından, ekipman, işçilik, malzeme ve bakım maliyetleri dahil olmak üzere her bir üretim yönteminin maliyeti ve üretim ölçeği değerlendirilmelidir. Bu noktada, farklı üretim yöntemlerinin, nihai ürünün kalitesinde ve performansında farklılıklara neden olabileceği göz ardı edilmemelidir. Hedef malzeme üretiminde seçilen yöntemin ürün gereksinimlerini tamamen karşıladığından emin olmak için proses sırasında ölçümler testler yapılarak mekanik özellikler, dayanıklılık gibi hedeflenen malzeme özellikleri hakkında veri toplanması da ürün kalitesi bakımından son derece büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda, sürece ilişkin enerji tüketimi, atık üretimi ve emisyonlar dahil olmak üzere her bir üretim yönteminin çevresel etkisi de sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Belirtilen faktörler, bir bütün olarak dikkatlice değerlendirilerek ve kapsamlı bir araştırma yaparak, hedef APK malzemeler için en uygun üretim prosesi seçimi yapılmalıdır.

4. APK Malzemelerin Üretimindeki Güncel Gelişmeler, Fırsatlar ve Hedefler (Current Developments, Opportunities and Goals in the Production of WPC Materials)

APK malzemelerin tüm avantaj ve dezavantajları ele alındığında farklı malzeme gruplarının sinerjistik etkilerinin aynı yapı içerisinde basit bir şekilde son ürüne kazandırılabilmesi ve hedef uygulamaya yönelik tasarım esnekliğine sahip olması sebebiyle bu malzeme grubunun üretiminde kullanılabilecek yeni teknolojilere ve yoğunlaşılması gerekliliği göze çarpmaktadır. Örneğin modern üretim yöntemlerinin gelişmesiyle, birlikte ve sürekli ekstrüzyon, *in-situ* polimerizasyon, eklemeli imalat gibi yenilikçi üretim

tekniklerindeki gelişmeler, fonksiyonel APK malzemelerin daha verimli ve uygun maliyetli üretimi ile sonuçlanabilir. Ayrıca bu üretim yöntemlerinin mevcut endüstriyel süreçlere dahil edilmesi ile ürünlerin performans ve yapı özellikleri de artırılabilir gibi süreçteki zaman ve maliyet kaybının önüne geçebilir.

APK malzeme sektörünün güncel durumu ve gelecekteki eğilimleri daha doğru bir şekilde anlamak için polimer bilimindeki en son araştırmalardan ve endüstriyel gelişmelerinden haberdar olmak büyük önem taşımaktadır. APK malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi için yoğun deneysel test ve analizlerin yanı sıra, modelleme ve simülasyon tekniklerinin de paralel bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Malzeme karakterizasyonu çalışmalarında ahşap ve plastik bileşenlerin ayrı ayrı ve kompozit içindeki davranışlarını belirleyebilmek için mekanik, termal ve fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi için çeşitli testler yürütülmelidir. Bu testlerde mekanik özellikler (çekme dayanımı ve modülü, eğilme dayanımı ve modülü, sıkıştırma dayanımı, darbe dayanımı vb.), termal özelliklerin yanı sıra (termal bozunma, termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı vb.) malzemenin kullanım amacına göre çeşitli fiziksel özellikler (yoğunluk, nem içeriği, su emme davranışı, kalınlık şişme oranı, elektriksel iletkenlik, vb.) ve farklı kimyasal ortamlardaki davranışı ve mikroyapısı da incelenmektedir. Ayrıca nihai ürünün alev dayanımı, UV dayanımı, fungal ve insektisit dayanımı ve hızlandırılmış yaşlandırma testleri de farklı dış uyaranlara, çevresel faktörlere ve zamana göre malzeme performansını tahmin etmek için kullanılabilir [79-83]. Bu noktada, hedef amaca yönelik en iyi kompozit formülasyonlarının belirlenmesi de kritik öneme sahiptir. Örneğin, en uygun ahşap/polimer oranının belirlenmesi, ürün içerisinde kullanılacak yeni katkı maddelerinin geliştirilmesi, sentezi ve kompozit içindeki uygun dağılımı sağlayabilecek teknolojilerin belirlenmesi de bu malzemelerin sürdürülebilirlik avantajlarını korumanın yanı sıra malzeme performansını ve kullanım ömrünü artıracaktır. Özellikle nanoteknoloji alanındaki son gelişmelere paralel olarak nano boyutlu katkıların üretim sürecine dahil edilmesi, çok daha gelişmiş mekanik özelliklere, boyutsal kararlılığa ve bozulmaya karşı dirençli kompozitlerin üretilmesine neden olacaktır.

Yapay zekâ temelli tahminlemeler ile inovatif teknolojilerin de üretim sürecine entegrasyonu ile gelişmiş işlevselliğe, benzersiz estetik özelliklere ve iyileştirilmiş dayanıklılığa sahip ürünler elde edilecektir. Özellikle sonlu elemanlar analizi farklı yüklem koşulları altında APK malzemelerin yapısal davranışını tahmin etmek için kullanılabilir uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle kompozit malzemenin tasarımın güç, sertlik ve dayanıklılık açısından optimize edilmesine yardımcı olur ve yorulma davranışı ile malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı verilecek tepkilerin öngörülmesine olanak sağlar [84-88]. Bu konuda yürütülen çalışmalar temelde matris ve takviyenin özelliklerini girdi olarak atayarak son kompozit malzemenin belirli özelliklerini matematiksel olarak hesaplanabilmesi esasına dayanır. Temsili hacim elemanları yöntemi, mikro yapıların kompozit özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için sonlu elemanlar analizinde kullanılan en popüler çok ölçekli kurucu yöntem olarak göze çarpmaktadır. Analiz sonucunda yüksek doğrulukta ve optimize edilmiş sonuçlar elde edilerek ürün geliştirme süresi azaltılarak ve nihai ürünün kullanım ömrü artırılabilir. ANSYS, SDRC/IDEAS, NASTRAN/PATRAN, HYPERMESH, LS DYNA, ABAQUS, SIEMENS PLM NX, NISA, COMSOL, KEBIR gibi yazılım paketleri bu analizde kullanılabilir işlevsel araçlar olarak öne çıkmaktadır. [88, 89]. Modelleme aşamasında ise çok ölçekli modelleme veya yapısal modelleme yaklaşımları uygulanabilir. Çok ölçekli modelleme yaklaşımında ahşap parçacıklarının genel malzeme özellikleri üzerindeki mikroskobik düzeydeki etkisini yakalamak için kompozitlerin mikro ve makro ölçeklerini dikkate alan modeller geliştirilirken, yapısal modellemede APK malzemelerin çeşitli koşullar altında malzeme davranışını tanımlamak için matematiksel modelleri kullanılarak hem ahşap hem de plastik bileşenler için gerçekçi modeller kurulur. Ardından optimizasyon araçları ve yöntemleri ile belirli performans kriterleri için en iyi parametre kombinasyonunu bulmak amacıyla simülasyon sonuçları optimizasyon algoritmalarıyla birleştirilir ve iyileştirilmiş performans özelliklerine sahip APK malzemelerin geliştirilmesini kolaylaştırılır. Ayrıca malzeme üretim süreçlerine ilişkin giriş parametrelerine dayalı olarak APK özelliklerine yönelik tahmine dayalı modeller geliştirmek için makine öğrenimi algoritmaları ve veri analitiği çalışmaları da ürün geliştirme sürecinde optimizasyon ve verimliliğe önemli katkılar sağlayacaktır [90-93]. Böylece yeni ürünlere ve hali hazırda pazarda mevcut olan ürünlere tasarım ve uygulama esnekliği gibi avantajlar sağlanacaktır. Sonuç olarak, gelecekteki sektörel eğilimler, malzeme talebi de ahşap plastik malzemelerin daha yenilikçi tasarımını destekleyecektir.

Küresel olarak sürdürülebilirliğe yönelik eğilim, muhtemelen daha da sürdürülebilir ham maddelerin kullanımını şüphesiz ki destekleyecektir. Bu noktada birincil ve geri dönüştürülmüş hammaddelere ait özelliklerin üretim öncesinde doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve hatta son tüketiciden kaynakların tekrar toplanarak üretim sürecine geri dönüştürülmesi gibi çabalar, hammadde bağımlılığı azaltmak ve ürünlerin çevresel etkisini azaltmak noktasında odaklanılması gereken bir nokta olarak göze çarpmaktadır. Bu noktada, hedef malzemeye ait yapısal özellikler ile hammadde ve geri dönüştürülmüş olası hammadde akımlarının sürdürülebilir şekilde tedarikinin sağlanması için geliştirilebilecek ağlar ve bu konuda yapılacak ekonomik ve çevresel analiz uygulamaları önemli bir yere sahip olacaktır. Ayrıca kompozit üreticileri, döngüsel bir ekonomi yaklaşımını teşvik ederek, bu ürünlerinin kolay sökülüp geri dönüştürülecek şekilde tasarlandığı kapalı devre sistemler geliştirmeye odaklanabilir. APK malzeme yelpazesi genişledikçe, üreticilerin de daha sürdürülebilir sistemlere yönelmesi ve bu konuda son kullanıcıları da sürece dahil etmesi beklenilmektedir. Geri dönüştürülmüş ahşap ve geri dönüştürülmüş plastik kullanarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunulmasının yanı sıra, nihai ürünün kullanım ömrünün artırılması da başlıca odaklanılan noktalardan biri olarak göze çarpmaktadır. Bu noktada sürdürülen araştırma ve geliştirme çalışmaları APK'lerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olup dayanıklılığın, çürümeye karşı direncin ve yangına dayanımının artırılması çalışmaların başlıca odak noktaları olarak sıralanabilmektedir. Bu nedenle çevresel etki ve ürün güvenliğine ilişkin düzenleyici standartların tam anlamıyla belirlenmesi ve karşılanması önemli bir hedeftir.

5. Değerlendirme (Conclusion)

APK malzemeler, çevresel ve ekonomik yönlerden avantajlar sunan fonksiyonel kompozit malzemeler olup, ticari uygulamalarda hem polimer malzemelere hem de ahşaba oranla pek çok avantajı bünyesinde barındıracak şekilde tasarlanabilmektedirler. Ayrıca uygun üretim yöntemleriyle elde edilen APK malzemeleri hedeflenen kullanım alanına göre sahip olacağı üstün özellikler, farklı son işlemler veya katkı maddeleri ile de geliştirilebilmektedir. Bu malzemelerin bileşim ve üretim koşullarının hedef uygulamaya göre optimizasyonu ile, geleneksel polimer matris kompozitlerin üretiminde gözlemlenen çevresel etkilerin (küresel ısınma, hammadde ve enerji kullanımı, asidifikasyon, toksisite, kimyasal duman oluşumu, ozon tabakası incilmesi ve ötrofikasyon gibi) azaltılarak, daha ekolojik bir üretim yaklaşımı sunması mümkündür. Bu konuda yürütülen araştırmalar APK malzemelere olan ilgiyi her geçen gün arttırmasına rağmen, daha sürdürülebilir üretim yöntemleri ve hammadde kaynaklarının farklı kombinasyonlarının kullanılmasını içeren süreçlerin, malzeme performansları ve ekonomik ömür gibi kıstasları da göz önünde bulundurularak, bütünlük bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Destekleri için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne (Proje no: 2022-01.BŞEÜ.03-07) teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] T. W. Clyne and D. Hull, *An introduction to composite materials*, 3rd Edition, UK: Cambridge University Press, 2019.
- [2] A. Thule and R. Shanks, *Natural fibre composites: materials, processes and properties*, USA: Woodhead Publishing, 2014.
- [3] H. Ehrlich, D. Janussen, P. Simon, V. V. Bazhenov, N. P. Shapkin, C. Erler, M. Mertig, R. Born, S. Heinemann, T. Hanke and H. Worch, "Nanostructural organization of naturally occurring composites—part II: silica-chitin-based biocomposites," *Journal of*

Nanomaterials, vol. 2008, pp. 1-8, February 2008. doi:10.1155/2008/670235

[4] S. Kangishwar, N. Radhika, A.A. Sheik, A. Chavali and S. Hariharan, "A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application," *Polymer Bulletin*, vol.80, pp.47-87, January 2022. doi:10.1007/s00289-022-04087-4

[5] D. K. Hale, "The physical properties of composite materials," *Journal of Materials Science*, vol.11, pp. 2105-2141, November 1976. doi:10.1007/PL00020339

[6] G. Özsin, M. Kılıç, Ç. Kırbıyık Kurukavak, E. Varol, "Thermal Characteristics, Stability, and Degradation of PVC Composites and Nanocomposites," in: H. A. Sabu, T. (eds) Poly(Vinyl Chloride) Based Composites and Nanocomposites. Engineering Materials. Cham, Switzerland: Springer, 2024.

[7] D. Kumlutaş, İ.H. Tavman and M. Turhan Çoban, "Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 113-117, January 2003. doi:10.1016/S0266-3538(02)00194-X

[8] S. Dixit, R. Goel, A. Dubey, P. R. Shivhare and T. Bhalavi, "Natural fibre reinforced polymer composite materials-A review," *Polymers from Renewable Resources*, vol.8, pp. 71-78, May 2017. Doi: 10.1177/204124791700800203

[9] D. K. Rajak, D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu, "Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol.8, pp.6354-6374, November 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.068

[10] A.K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar and R. Rimašauskienė, "Matrix materials used in composites: A comprehensive study," *Materials Today: Proceedings*, vol.21, pp.1559-1562, November 2020. doi:10.1016/j.matpr.2019.11.086

[11] M. De Araújo, "Natural and man-made fibres: physical and mechanical properties. In Fibrous and composite materials for civil engineering applications," USA: Woodhead Publishing, 2014.

[12] D. C. Davis, J. W. Wilkerson, J. Zhu and D. O. Ayewah, "Improvements in mechanical properties of a carbon fiber epoxy composite using nanotube science and technology," *Composite Structures*, vol.92, pp.2653-2662. October 2010. doi:10.1016/j.compstruct.2010.03.019

[13] S. S. Wicks, R. G.de Villoria, and B. L. Wardle, "Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes," *Composites Science and Technology*, vol.70, pp.20-28, January 2010. doi:10.1016/j.compscitech.2009.09.001

[14] R. Teti, "Machining of Composite Materials," *CIRP Annals*, vol.51, pp. 611-634, July 2002. doi:10.1016/S0007-8506(07)61703-X

[15] E. Omanović-Miklićanin, A. Badnjević, A., A. Kazlagić and M. Hajlovac, "Nanocomposites: A brief review," *Health and Technology*, vol.10, pp.51-59, January 2020. doi:10.1007/s12553-019-00380-x

[16] Singh, S. and Singh, S., *Fabrication and Machining of Advanced Materials and Composites*, USA: CRC Press, 2022.

[17] B. C. Ray, "Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, pp. 111-117, June 2006. doi:10.1016/j.jcis.2005.12.023

[18] M. Mukherjee, C.K. Das and A.P. Kharitonov, "Fluorinated and oxyfluorinated short Kevlar fiber-reinforced ethylene propylene polymer," *Polymer Composites*, vol.27, pp. 205-212, March 2006. doi:10.1002/pc.20195

[19] S.D. Thoppul, J. Finegan, and R.F. Gibson, "Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures – A review," *Composites Science and Technology*, vol.69, pp. 301-329, March 2009. doi:10.1016/j.compscitech.2008.09.037

[20] M. R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, and K.D. Potter, "Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.37, pp.522-529. April 2006. doi:10.1016/j.compositesa.2005.05.019,

[21] M. Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook*, NJ: Wiley 2015.

[22] S. K. Najafi, "Use of recycled plastics in wood plastic composites–A review," *Waste management*, vol.33, pp. 1898-1905, September 2013. doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017

[23] M. J. Taufiq, M.R. Mansor, and Z. Mustafa, "Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend," *Composite Structures*, vol.189, pp. 510-515, April 2018. doi:10.1016/j.compstruct.2018.01.090

- [24] K. Karakuş, "Üniversitemizdeki polietilen ve polipropilen atıkların polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi," MSc. Dissertation, Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Kahramanmaraş, Türkiye, 2008.
- [25] A. Ashori, "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!" *Bioresource Technology*, vol.99, pp. 4661-4667, July 2008. doi:10.1016/j.biortech.2007.09.043
- [26] Fortune Business Insights. "Wood Plastic Composite Market Size, Share & Industry Analysis, By Material (Polyethylene, Polypropylene, Polyvinyl Chloride and Others), By Application (Decking, Automotive, Sliding & fencing, Technical Application, Furniture, Consumer Goods and Others), and Regional Forecast, 2020-2027". Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/enquiry/request-sample-pdf/wood-plastic-composite-market-102821>. [Accessed: December 12, 2022].
- [27] Precedence Research. "Wood plastic composites". Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-plastic-composites-market>. [Accessed: December 7, 2022].
- [28] Google Analytics. "Google Analytics 2023". Available: <https://analytics.google.com/analytics/web/>. [Accessed: December 10, 2023].
- [29] Google Patents, "Google Patents 2023. Available: <https://www.google.com/patents>. [Accessed: December 14 2023].
- [30] Clarivate, "Web of Science 2022". 2023, Available: <https://clarivate.com/>. [Accessed: December 14 2023].
- [31] Y. Feng, H. Hao, H. Lu, C. L. Chow, and D. Lau, "Exploring the development and applications of sustainable natural fiber composites: A review from a nanoscale perspective," *Composites Part B: Engineering*, vol. 276, pp.111369, May 2024. doi:10.1016/j.compositesb.2024.111369
- [32] G. Martins, F. Antunes, A. Mateus, A. and C. Malça, "Optimization of a wood plastic composite for architectural applications," *Procedia Manufacturing*, vol.12, pp.203-220, September 2017. doi:10.1016/j.promfg.2017.08.025
- [33] A. Jacob, "WPC industry focuses on performance and cost," *Reinforced Plastics*, vol. 50, pp. 32-33, May 2006. doi:10.1016/S0034-3617(06)71010-4
- [34] A.K., Bledzki, P. Franciszczak, Z. Osman, and M. Elbadawi, "Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute, and kenaf fibers," *Industrial Crops and Products*, vol.70, pp.91-99, August 2015. doi:10.1016/j.indcrop.2015.03.013
- [35] L. Kristak, I. Kubovský, and R. Réh, "New challenges in wood and wood-based materials," *Polymers*, vol. 13, pp.1-5, July 2021. doi:10.3390/polym13152538
- [36] A. Gubana, and M. Melotto, "Experimental tests on wood-based in-plane strengthening solutions for the seismic retrofit of traditional timber floors," *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 290-299, December 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.177
- [37] G. Pritchard, "Two technologies merge: wood plastic composites," *Plastics, Additives and Compounding*, vol.6, , pp. 18-21, July 2004. doi:10.1016/S1464-391X(04)00234-X
- [38] M. Asif, "Sustainability of timber, wood and bamboo in construction, in Sustainability of Construction Materials," Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2009.
- [39] A. Faik, "Plant Cell Wall Structure-Pretreatment," the Critical Relationship in Biomass Conversion to Fermentable Sugars. In: Green Biomass Pretreatment for Biofuels Production" Dordrecht, Holland: Springer, 2013.
- [40] D. N. S. Hon and N. Shiraiishi, "Wood and Cellulosic Chemistry Revised, and Expanded". London, UK: CRC Press, 2000.
- [41] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 37-46, May 2002. doi:10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- [42] F.X. Collard, and J. Blin, "A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 594-608, October

2014. doi:10.1016/j.rser.2014.06.013

[43] B. Yuca, Ş. Kurt., M. Korkmaz and S. Aysal, "Determination of the influence of some boric acid added adhesives on combustion properties of beech wood," *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, vol.14, pp. 182-190, March 2014.

[44] A. A. Klyosov, "Wood-plastic composites". New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

[45] M. Akter, M. H. Uddin, and H. R. Anik "Plant fiber-reinforced polymer composites: a review on modification, fabrication, properties, and applications," *Polymer Bulletin*, vol. 81, pp. 1-85, February 2024. Doi:10.1007/s00289-023-04733-5

[46] R. Prem Kumar, M. Muthukrishnan and A. Felix Sahayaraj, "Effect of hybridization on natural fiber reinforced polymer composite materials–A review," *Polymer Composites*, vol. 44, pp.4459-4479, February 2023. doi:10.1002/pc.27489

[47] M. S. Mendis, P.A.U. Ishani, and R.U. Halwatura, "Impacts of chemical modification of wood on water absorption: a review," *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, vol.20, pp. 73-88, March 2023. doi:10.1007/s13196-023-00309-y

[48] P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg. "Springer handbook of wood science and technology," Heidelberg, Germany: Springer, 2023.

[49] E. Sarioğlu, E.A.Turhan, S. Karaz, B. Bengü, A. Biçer, T. Yarıcı, C. Erkey and E. Senses, E., "A facile method for cross-linking of methacrylated wood fibers for engineered wood composites," *Industrial Crops and Products*, vol. 193, p.116296, March 2023. doi:10.1016/j.indcrop.2023.116296

[50] Y. Mohd Aref, R. Othaman, F. H. Anuar, K. Z. K. Ahmad, and A. Baharum, "Superhydrophobic modification of *Sansevieria trifasciata* natural fibres: a promising reinforcement for wood plastic composites," *Polymers*, vol.15, 1-15, January 2023. doi:10.3390/polym15030594

[51] R Maguteeswaran, P. Prathap, S. Satheeshkumar and S. Madhu, "Effect of alkali treatment on novel natural fiber extracted from the stem of Lankaran acacia for polymer composite applications," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, pp.8091-8091, April 2023. doi:10.1007/s13399-023-04189-7

[52] M. Johansson, M. Skrifvars, N.Kadi, and H. N. Dhakal, "Effect of lignin acetylation on the mechanical properties of lignin-poly-lactic acid biocomposites for advanced applications," *Industrial Crops and Products*, vol.202, pp. 117049, October 2023. doi:10.1016/j.indcrop.2023.117049

[53] Y Liu, L. Guo, W. Wang, Y. Sun and H. Wang, "Modifying wood veneer with silane coupling agent for decorating wood fiber/high-density polyethylene composite," *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp.691-699. November 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.090

[54] W. Harnnarongchai, J. Kaschta, D.W. Schubert, D. W. N. Sombatsompop, "Shear and elongational flow properties of peroxide-modified wood/low-density polyethylene composite melts," *Polymer composites*, vol. 33, pp. 2084-2094, October 2012. doi:10.1002/pc.22351

[55] J. K. Kim and K. Pal, "Recent advances in the processing of wood-plastic composites," Heidelberg, Holland: Springer, 2010.

[56] E. Yilmaz, "Çinko borat maddesinin odun plastik kompozitlerde antifungal etkisinin incelenmesi," Msc. dissertation, Kahramanmaraş Sütçü İmam University., Kahramanmaraş, Türkiye, 2018.

[57] G. Yilmaz, "Termal işlem uygulanmış mısır saplarından üretilen odun plastik kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri," Msc. dissertation, Düzce University., Düzce, Türkiye, 2020.

[58] M. Z. Khan, S. K. Srivastava and M. K. Gupta, "A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications," *Polymer Testing*, vol. 89, pp.106721, September 2020. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106721

[59] S. K. Najafi, "Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review," *Waste Management*, vol.33, pp. 1898-1905, September 2013, doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017

[60] A. Kaymakçı, N. Ayrılmış and T. Akbulut, "Dış cephe kaplamalarına ekolojik bir yaklaşım: ahşap polimer kompozitler" in 7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, April 3-4, 2014. İstanbul, Türkiye [Online]. Available: https://catider.org.tr/pdf/sempozyum7/8_%20Bildiri%20kaymakci.pdf [Accessed: 12 June. 2023].

[61] M. Y. Çelik and E. Kılıç, "Bitkisel Kaynaklı Biyopolietilenin Biyokompozit Üretiminde ve Polimer Karışımlarında Kullanımı,"

Journal of Textile Engineering, vol.27, pp. 197-215, September 2020. doi:10.7216/1300759920202711908

- [62] J. Chen, Y. Wang, C. Gu, J. Liu, Y. Liu, M. Li, and Y. Lu, "Enhancement of the mechanical properties of basalt fiber-wood-plastic composites via maleic anhydride grafted high-density polyethylene (MAPE) addition," *Materials*, vol.6, pp.2483-2496, June 2013. doi:10.3390/ma6062483
- [63] Y. Kazemi, A. Cloutier, and D. Rodrigue, "Mechanical and morphological properties of wood plastic composites based on municipal plastic waste," *Polymer composites*, vol.34, pp. 487-493, March 2013. doi:10.1002/pc.22442
- [64] R. M. Rowell, "Advances and challenges of wood polymer composites," in Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, November 20-23, 2006, USA [Online]. Available: https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2006/fpl_2006_rowell001.pdf [Accessed: 10 June. 2024].
- [65] A. H. Elsheikh, H. Panchal, S. Shanmugan, T. Muthuramalingam, A.M El-Kassas and B. Ramesh, "Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 8, pp. 100450, June 2022. doi:10.1016/j.clet.2022.100450
- [66] N. Ayırlımış, S. Jarusombuti, V. Fueangvivat, and P. Bauchongkol, "Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 96, pp. 818-822, May 2011. doi:10.1016/j.polydegradstab.2011.02.005
- [67] P. H. G. Cademartori, P. S., dos Santos, L. Serrano, J. Labidi and D. A. Gatto, "Effect of thermal treatment on physicochemical properties of Gympie messmate wood," *Industrial Crops and Products*, vol. 45, pp. 360-366. February 2013. doi:10.1016/j.indcrop.2012.12.048
- [68] J. Follrich, U. Mueller, W. Gindl, and N. Mundigler, "Effects of long-term storage on the mechanical characteristics of wood plastic composites produced from thermally modified wood fibers," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol.23, pp.845-853, May 2010. doi:10.1177/0892705710369042
- [69] T. Jiang, G. Zeng, and C.Hu, "Fabrication of highly filled wood plastic composite pallets with extrusion-compression molding technique," *Polymer Composites*, vol. 41, pp. 2724-2731, March 2020. doi:10.1002/pc.25570
- [70] D. J. Gardner, Y. Han and L. Wang, "Wood-Plastic Composite Technology," *Current Forestry Reports*, vol 1, pp. 139-150, June 2015. doi:10.1007/s40725-015-0016-6
- [71] S. Das, A.K. Saha, P. K. Choudhury, R. K. Basak, B. C. Mitra, T. Todd, S. Lang and R.M Rowell, "Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite," *Journal of Applied Polymer Science*, 76, pp.1652-1661, March 2000. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(20000613)76:11<3C1652::AID-APP6>3E3.0.CO;2-X
- [72] H. Bayram, "Ekstrüzyon yönteminde sıcaklık, ekstrüzyon hızı ve sürtünme parametrelerinin profil kalitesine etkisinin araştırılması," PhD.dissertation, Yıldız Teknik University., İstanbul, Türkiye, 2008.
- [73] A. Gallos, G. Paës, F. Allais and J. Beaugrand, "Lignocellulosic fibers: a critical review of the extrusion process for enhancement of the properties of natural fiber composites," *RSC Advances*, vol.7, pp. 34638-34654, July 2017. doi:10.1039/C7RA05240E,
- [74] A. K. Pal, A. K. Mohanty and M. Misra, "Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: recent developments and future prospective," *RSC Advances*, vol.11, pp.36398-36438, November 2021. doi:10.1039/D1RA04060J
- [75] Mitschang, P. and K. Hildebrandt, "Polymer and composite moulding technologies for automotive applications, in *Advanced Materials in Automotive Engineering*," USA: Woodhead Publishing, 2012.
- [76] O. Faruk and A. K. Bledzki, "Wood plastic composite: present and future in Wiley Encyclopedia of Composites," 2nd Edition, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [78] S. S. Raj, "Wood-plastic composite processing and mechanical characteristics—a brief literature review in *Recent Advances in Manufacturing, Automation, Design and Energy Technologies*," Singapore: Springer, 2021.
- [78] M. Chandrasekar, K. Senthilkumar, T. S. M. Kumar, R. Sabarish and S. Siengchin, "Morphological characterization of the wood polymer composites in *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications*," Singapore: Springer, 2021.
- [79] R. Gogoi and G. Manik, "Mechanical properties of wood polymer composites," in *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications*" Singapore: Springer, 2021.

- [80] J. S. Neto, H. F. de Queiroz, R. A. Aguiar and M.D. Banea, "A review on the thermal characterisation of natural and hybrid fiber composites," *Polymers*, vol.13, pp.4425, December 2021. doi:10.3390/polym13244425
- [81] N. Nurazzi, M. R. M. Asyraf, M. Rayung, M. N. F. Norrrahim, S.S. Shazleen, M. S. A. Rani, A. R. Shafi, H. A. Aisyah, M. H. M. Radzi, F. A. Sabaruddin, and R. A. Ilyas, "Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments," *Polymers*, vol.13, pp.2710, August 2021. doi:10.3390/polym13162710
- [82] M. R. Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. Sentharamaikkannan, S. Senthil and S. Pradeep, "Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 566-581, January 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.101
- [83] E. Soury, A.H. Behraves, E.R. Esfahani, and A. Zolfaghari, "Design, optimization and manufacturing of wood-plastic composite pallet," *Materials & Design*, vol.30, pp. 4183-4191, December 2009. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.035
- [84] P. Mackenzie-Helnwein, J. Eberhardsteiner and H.A. Mang, "A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details," *Computational Mechanics*, vol. 3, pp. 204-218, May 2003. doi: 10.1007/s00466-003-0423-6
- [85] K. Aldaş and F. Şen, "Karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol.3, pp.21-30, June 2012.
- [86] T. Dursun and M. Özbay, "Tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerleme modellemesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol.23, pp. 65-69, August 2008.
- [87] M. Alhijazi, Q. Zeeshan, Z. Qin, B. Safaei and M. Asmael, "Finite element analysis of natural fibers composites: A review," *Nanotechnology Reviews*, vol.9, pp. 853-875, September 2020. doi:10.1515/ntrev-2020-0069
- [88] J. Naveen, M. Jawaid, P. Amuthakkannan, M. Chandrasekar, "Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites in Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites," USA: Woodhead Publishing, 2019.
- [89] A. Mujtaba, F. Islam, P. Kaeding, T. Lindemann, B. Gangadhara Prusty, "Machine-learning based process monitoring for automated composites manufacturing," *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-16, December 2023. doi:10.1007/s10845-023-02282-2
- [90] Altarazi, S., R. Allaf, and F. Alhindawi, "Machine Learning Models for Predicting and Classifying the Tensile Strength of Polymeric Films Fabricated via Different Production Processes," *Materials*, vol.12, pp.1475, May 2019. doi:10.3390/ma12091475
- [91] C. Joo, H. Park, H. Kwon, J. Lim, E. Shin, H. Cho, and J. Kim, "Machine learning approach to predict physical properties of polypropylene composites: Application of MLR, DNN, and random forest to industrial data," *Polymers*, vol.14, pp.3500, August 2022. doi:10.3390/polym14173500
- [92] A. Sharma, T. Mukhopadhyay, S.M. Rangappa, S. Siengchin, and V. Kushvaha, "Advances in computational intelligence of polymer composite materials: machine learning assisted modeling, analysis and design," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol.29, pp.3341-3385, January 2022. doi:10.1007/s11831-021-09700-9

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Properties of Foam Concrete Produced Using Liquid Latex

Murat Gökçe^a, Kenan Toklu^{*b},

Submitted: 01.04.2024 Revised: 21.05.2024 Accepted: 23.05.2024 doi: 10.30855/gmbd.0705A05

ABSTRACT

Keywords: Latex, chain bond, thermal conductivity coefficient, thermal insulation material, foam concrete

^a Amasya University,
Faculty Of Architecture,
Dept. of Architecture
05100 - Amasya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8117-0866
e mail: murat.gokce@amasya.edu.tr

^{*b} Tekirdağ Namık Kemal University,
Çorlu Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
59860 - Tekirdağ, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1288-845X

^{*}Corresponding author:
ktoklu@nku.edu.tr

Foam concrete, a type of lightweight concrete, is highly preferred due to its lightness and ease of application. In addition, substitute materials are used in the foam concrete mixture in order to further improve the properties of foam concrete. In this study, the engineering properties of foam concrete produced using liquid latex were analyzed. For this purpose, liquid latex was added to the mixing water. The amount of latex is fixed at 25% of the cement weight. Additionally, the amount of liquid latex added to the mixture was reduced from the amount of mixing water. According to the results, it was determined that liquid latex made positive contributions to the engineering properties of the produced foam concrete. It was found that the water absorption value of latex-added samples decreased significantly compared to the reference sample. In addition, the thermal conductivity coefficient of the samples with latex added was lower than the reference sample. In the microstructural analysis, it was seen that the pores were more homogeneous than the reference sample and no cracks occurred. Finally, the long chain bonds formed by liquid latex in concrete were detected for the first time by SEM image analysis in this study.

Sıvı Lateks Kullanılarak Üretilen Köpük Betonun Özelliklerinin Araştırılması

ÖZ

Hafif beton türü olan köpük beton, hafifliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle oldukça fazla tercih edilmektedir. Ayrıca köpük betonun özelliklerinin daha da iyileştirilmesi amacıyla köpük beton karışımında ikame malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada sıvı lateks kullanılarak üretilen köpük betonun mühendislik özellikleri analiz edilmiştir. Bu amaçla karışım suyuna sıvı lateks eklenmiştir. Lateks miktarı çimento ağırlığının %25'i olarak sabitlenmiştir. Ayrıca karışıma eklenen sıvı lateks miktarı, karışım suyu miktarından azaltılmıştır. Sonuçlara göre sıvı lateksin üretilen köpük betonun mühendislik özelliklerine olumlu katkılar sağladığı tespit edilmiştir. Lateks katkılı numunelerin su emme değerinin referans numuneye göre yüksek oranında azaldığı bulunmuştur. Ayrıca lateks ilave edilen numunelerin ısıl iletkenlik katsayısı referans numuneye göre daha düşük çıkmıştır. Mikroyapısal analizde gözeneklerin referans numuneye göre daha homojen olduğu ve herhangi bir çatlak oluşmadığı görülmüştür. Son olarak sıvı lateksin betonda oluşturduğu uzun zincirli bağlar ilk defa bu çalışmada SEM görüntü analizi ile tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lateks, zincir bağı, ısı iletkenlik katsayısı, ısı yalıtım malzemesi, köpük beton

1. Introduction

Foam concrete (FC) is either a Portland cement paste or mortar whose unit volume weight is reduced by keeping air bubbles in it with suitable foaming agent [1-2]. FC is also called as a light cellular concrete [3]. Unlike structural concrete, FCs are widely used in applications such as thermal and sound insulation in buildings due to their excellent insulation properties, dead load reduction due to their lightweight, [4]. Density, thermal conductivity and compressive strength of FC made for insulating is roughly between 350-600 kg/m³, 0.15-0.2 W/mK and 1-6 MPa, respectively [5]. Today, while energy efficiency gains a lot of importance, interest in lightweight and heat-insulated FCs is also increasing [6]. However, in order to obtain high performances from buildings where FC is used, the density and thermal conductivity for FC should be further decreased [6].

The key factors for the engineering features of FC are the w/c (water to cement proportion), porosity, and nature of foaming agent [2,7]. The density and strength of FC are directly related to each other. [7]. Chung et al. [8] examined the void properties of FC produced at different densities. According to the results obtained, they stated that as the density increases, the size for the voids in the FC decreases and thus the compressive strength increases. In addition, Kearsley and Wainwright [9] stated that the strength is related to porosity and that high air content causes low density, low compressive strength and high porosity. Not only the density but also the foam agents used have a great impact on the strength of FCs [10].

The pores and cement paste are roughly constituents of hardened FC [11,12]. Studies [13-17] in the literature indicate that the volume fraction for solid components and geometric distribution of pores are the most important factors affecting the thermal conductivity properties of a material having the void structures. Chung et al. [18] stated that the thermal permeability property of FC is influenced by its pore properties due to anisotropic effect.

Additives used in concrete are one of the components that significantly affect the properties of concrete [19]. It has been known for many years that latex polymer compounds has been used in the concretes [20-23]. In a study [24], different types of latex were added to the foaming agent separately in order to strength the foam bubble structure. According to result, in general, the expansion rate of the foaming agent modified by the addition of latex to the foaming agent solution was increased at low concentration and the stability of the foam was doubled. In addition, this study also emphasized that the latex type used to modify the foaming agent has very strong effects on FC [24].

The properties of FC produced using liquid latex were investigated in this study. In addition, the analysis of the long chain bond structure, which enables latex to enhance the qualities of FC, has been examined in detail.

2. Material and Method

2.1. Material

2.1.1. Cement

CEM I 52.5 R type cement, shown in Table 1, was used in the study.

Table 1. The properties of the used cement

Oxide	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI*	Density (g/cm ³)
Content (%)	3.31	21.5	4.06	0.25	65.6	1.30	0.3	0.35	3.5	3.05

* LOI: Loss on ignition

2.1.2. Latex

The features of the liquid latex are given in Table 2.

Table 2. The features of the latex (Lateksin özellikleri)

Properties	Density (g/cm ³)	Colour	Total Solid Content (%)	Dry Rubber Content (%)	Non-Rubber Solid (%)	Ammonia Content (Total Weight) (%)	Ammonia Content (Water Phase) (%)	pH	Magnesium Content (In Solid) (ppm)
Description	0.910	Milk white	62	60	1.7	0.71	1.90	10.7	24.3

2.1.3. Synthetic-based foam additive

Table 3 shows the features of the foam.

Table 3. Properties of foam

Density (g/cm ³)	Appearance	pH
1.27	Light brown	6.2

2.2. Method

While producing FC, the slurry consisting of a mixture of cement, water and liquid latex was mixed in a helical type mixer at 60 rpm for 90 seconds. Liquid latex was added to the mixing water and added to the mixture. The amount of latex is fixed as 25% of the cement weight. In addition, the amount of latex added to mixture was reduced equally from the amount of mixing water. Foam was produced in the generator shown in Figure 1 by applying 2.5 bar air pressure to the mixture produced using the foam additive/water ratio given in Table 4 (Figure 1).



Figure 1. Foam production in a foam generator

After the prepared foam was added to the slurry, it was mixed again in a helical type mixer for 90 seconds (Figure 2). It was observed that the foam added at the end of the mixing process was completely surrounded by the slurry.



Figure 2. Adding the produced foam to the mixture in a helical type mixer

The foam produced was taken into containers with a certain volume and by adding it to the foam mixture at the calculated scale, FC was produced at the targeted density (240 kg/m^3). Mixing ratios of FC are given in Table 4.

Table 4. Mixing Ratios (Karışım Oranları)

Specimens	Density (kg/m^3)	Cement (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	Lateks (kg/m^3)	Foam Mixture ratio (Foam additive/water)	Volume of foam (%)
FC (Reference)	240	200	100	0	1 / 50	82
LFC	240	200	50	50	1 / 50	82

Abbreviations:FC: Foam concrete; L: Lateks

Fresh FC was taken into molds of $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ for compressive strength test and $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}$ molds for determination of thermal conductivity coefficient. All specimens were subjected to air curing at room conditions until the test days. The compressive strengths of the specimens on days of 1,3,7 and 28 were tested according to TS EN 12390-3 [25]. In addition, the thermal conductivity coefficients of the $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}$ specimens aged 28 days were measured according to ASTM C-5218-21 [26].

In order to test the water absorption of all the pores forming in the FC, the specimens were left in the water for 1 day. A weight was placed on the FC in order to allow it to sink in water. With this test method, the water absorption ability of all closed-cell pores forming the LFC could be measured. Water absorption test results were found according to the following formula in TS EN 1097-6 [27].

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{M_2} \quad (1)$$

where,

M_1 = Saturated dry surface weight of FC removed from water after 24 hours (g),

M_2 = Initial dry weight of FC (g).

Finally, microscope image analyzes (at 10x, 22x, and 100x magnification) and SEM image analyzes, which are commonly used to view the microstructure of cement-based materials [28], were performed on 28 day age specimens.

3. Experimental Result and Discussion

The results for the compressive strength of the specimens produced in the study are given in Table 5. As can be seen from the Table 5, the lowest compressive strength of the foam concretes produced was obtained on the 1st day and the highest compressive strength was obtained on the 28th day. It was also observed that the 1-day and 28-day compressive strengths of LFC increased by approximately 86% and 41%, respectively, compared to FC.

The thermal conductivity coefficient of the LFC was found to be 0.062 W/mK, as seen in Table 5. The thermal conductivity coefficient of the LFC was approximately 15% better than the FC. In order for a material to be a thermal insulation material, the thermal conductivity coefficient of that material must be less than 0.065 W/mK [29,30]. According to the thermal conductivity coefficients obtained from the specimens, LFC can be used as a thermal insulation material with a thermal conductivity coefficient of 0.062 W/mK. Murat and Şeker [1] emphasized in their study that if foam concrete with a specific mass density below 250 kg/m³ is produced, the thermal conductivity coefficient of this foam concrete will be below 0.065 W/mK. A similar result was obtained in this study.

Table 5. The results of test for the hardened FC (Sertleşmiş köpük betonun deney sonuçları)

Specimens	Fresh density (kg/m ³)	Hardened density (kg/m ³)	Thermal conductivity coefficient (W/mK)	Compressive Strength (kPa)			
				1 day	3 days	7 days	28 days
FC	290	240	0.073	110	218	365	485
LFC	295	242	0.062	205	384	530	685

Water absorption values of FCs are given in Table 6. After the reference and LFC were kept in water for 24 hours, the water absorption values were measured as 69% and 28%, respectively. The water absorption value of the LFC decreased by about 59% compared to the FC. It is thought that the long chain bonds formed by the latex form a thin membrane by wrapping the entire body of the FC like a net, and this reduces the water absorption value.

Table 6. Water absorption test results of FC (Köpük betonun su emme deney sonuçları)

Specimens	M ₁ (gr)	M ₂ (gr)	Water Absorption (%)
FC	405	240	69
LFC	310	242	28

Microscope images were taken at 10x, 22x and 100x magnifications for the analysis of the diameter, cell wall and thickness of the pores formed in the FC.

When the image of the FC (Figure 3) at 10 times magnification is examined under the microscope, inhomogeneous closed pores are observed. These pores, which have different diameters, are smaller than 1 micron in some regions and larger than 1 millimeter in some regions (Figure 3). It was determined in the microscope analyzes that the reference FCs produced with the foam additive used in this study formed closed cells in their pores.

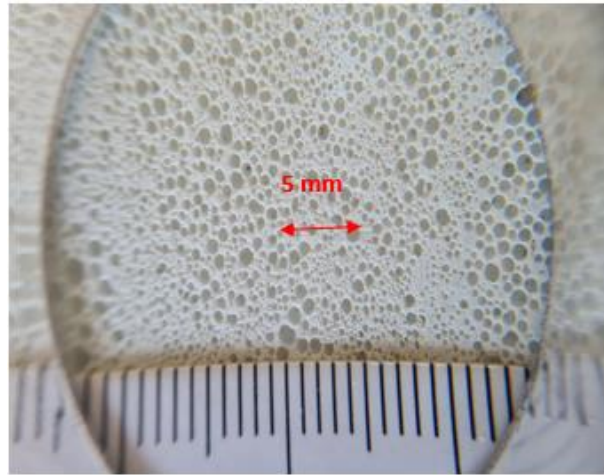


Figure 3. Microscope images belonging to FC (10x magnification)

When the microscope images of the FC were examined at 22 times magnification, most of the closed cell pores formed cells with a diameter of less than 1 mm. In addition, it was observed that the pore diameters formed did not show a homogeneous distribution (Figure 4).

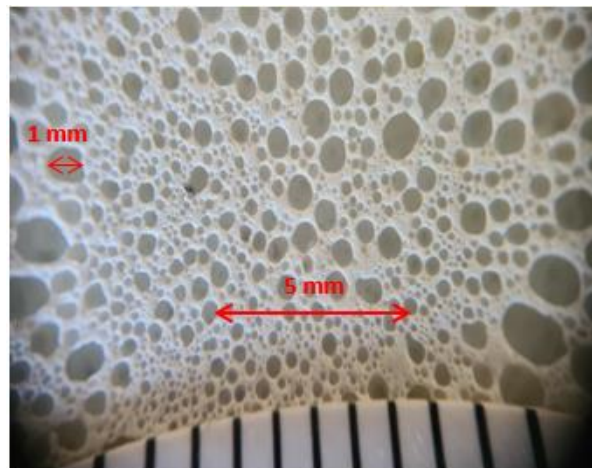


Figure 4. Microscope images belonging to FC (22x magnification)

In Figure 5, it was observed that the closed cell outer walls formed in the FC at 100 x magnification were surrounded by concrete with a thickness of approximately 100 microns. In some pores, the thickness of the outer wall reaches 200 microns. It can be clearly seen at 100 times magnification with a microscope that the pores formed in the FC are completely surrounded by concrete and form closed cells. As a result of its ability to form closed cells, no slump occurred in the FC that was molded fresh.

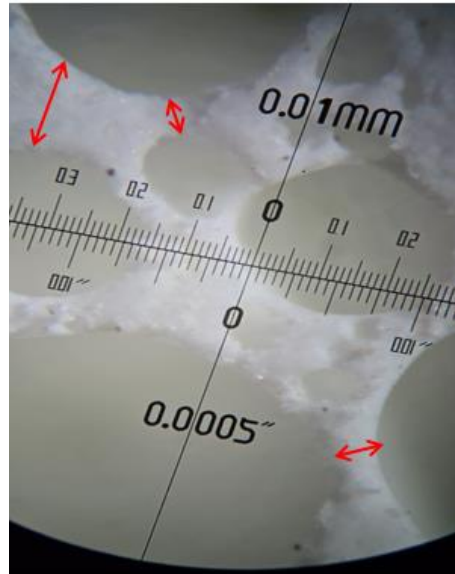


Figure 5. Microscope images belonging to FC (100x magnification)

When the microscope analysis of LFC at 10 times magnification was examined, the pore distribution was more homogeneous compared to the FC (Figure 6). It was observed that all the pores were completely surrounded by concrete.

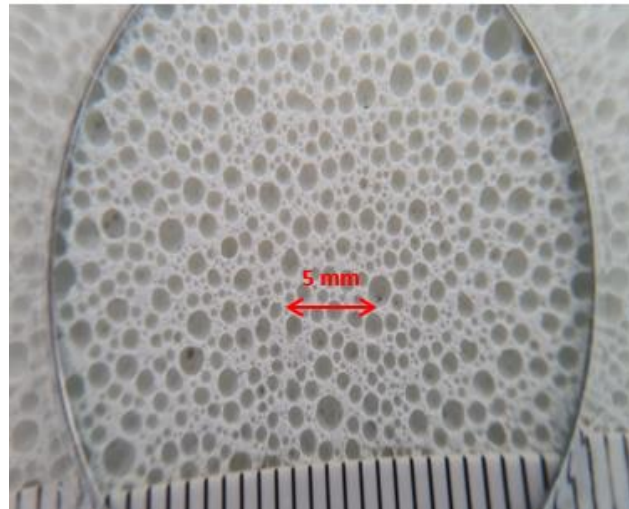


Figure 6. Microscope images belonging to LFC (10x magnification)

When Figure 7 is examined, it is seen that the pore distribution in LFC is more homogeneous than the FC. While cells with a diameter of less than 1 mm form the majority of the pores in the FC, the distribution of cells with a diameter of less than 1 mm and larger in LFC is close to each other.

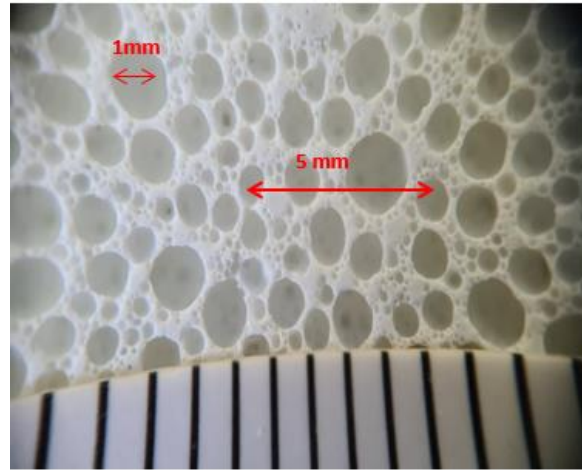


Figure 7. Microscope images belonging to LFC (22x magnification)

It is seen that all the pores formed in the LFC at 100 times magnification are completely enclosed (Figure 8). This indicates the ability of latex to form closed cells. The outer wall thicknesses of the pores that make up the LFC vary between 50 and 100 microns. It was observed that there was a more homogeneous pore distribution compared to the FC (Figure 8).

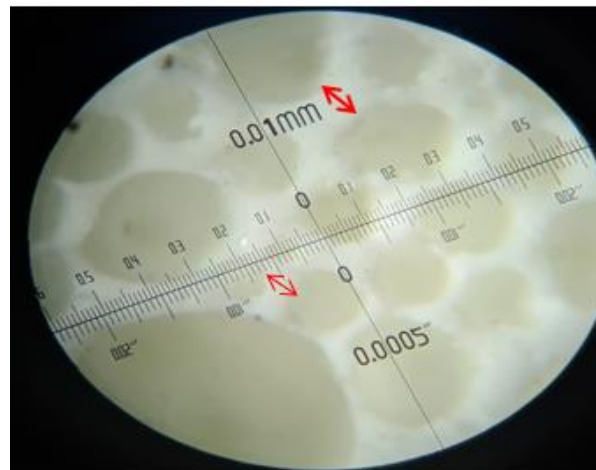


Figure 8. Microscope images belonging to LFC (100x magnification)

SEM analyzes of FC were performed on 28 days. When Figure 9 was examined, it was observed that capillary cracks occurred in the FC. A heat flow bridge was formed from the opening caused by the capillary crack, and as a result, the thermal conductivity coefficient of the FC was adversely affected. It is also thought that this situation has a negative impact on the compressive strength and water absorption value. These capillary cracks could not be detected in eye and microscope analyzes.

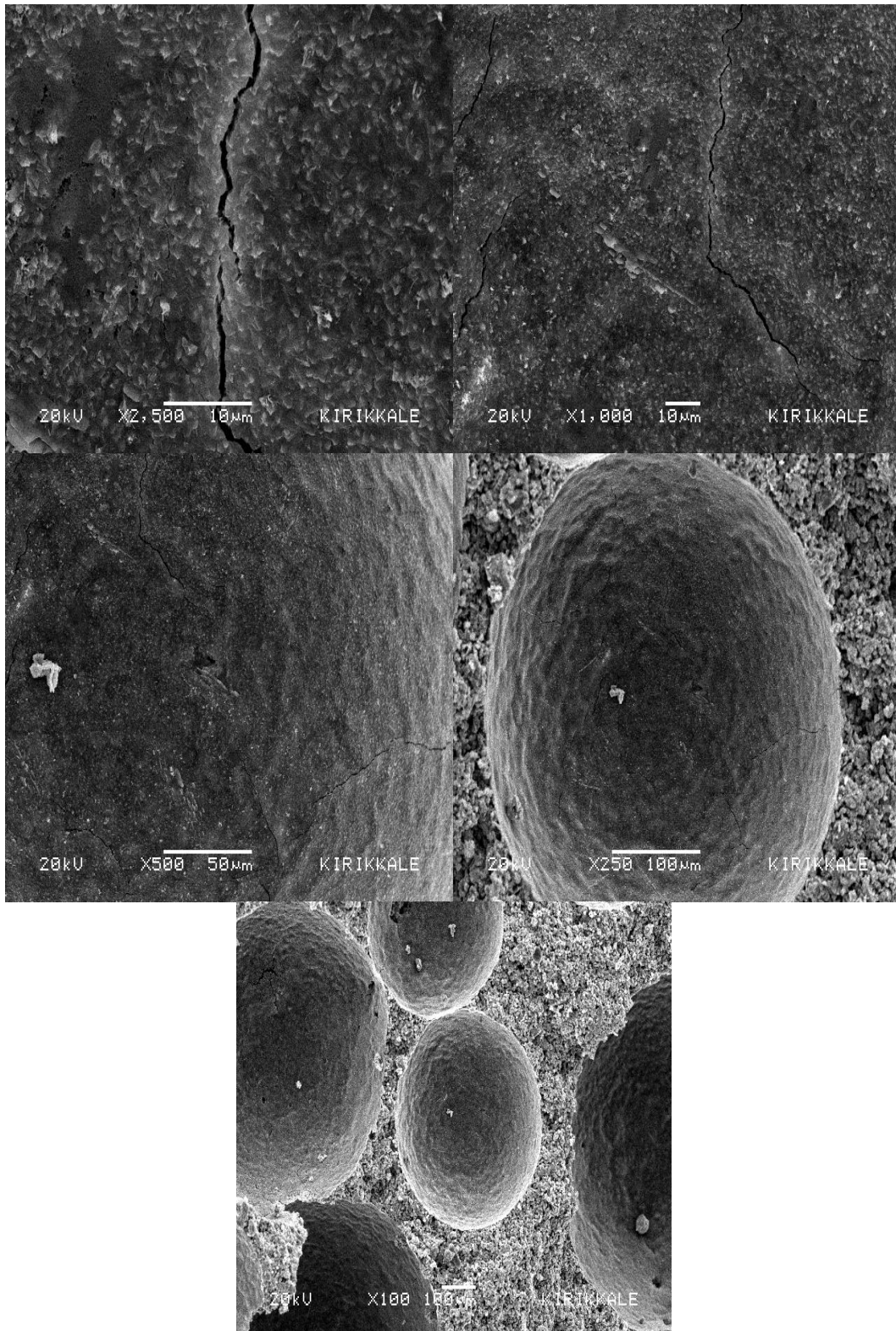


Figure 9. SEM image of FC

When the SEM image analyzes of the LFC were examined, it was seen that there was a chain structure that continues uninterruptedly and envelops it like a net (Figure 10). The long bond structure formed by latex with cement and the formation of a very thin shell enabled the FC to improve its properties. While capillary cracks smaller than 1 micron were detected in the FC, no capillary cracks were found in the latex added FC. It is thought that latex can be used to prevent the formation of capillary cracks in the production of FC. This chain structure formed by latex was clearly seen in SEM analysis at 2500 and 5000 times magnification.

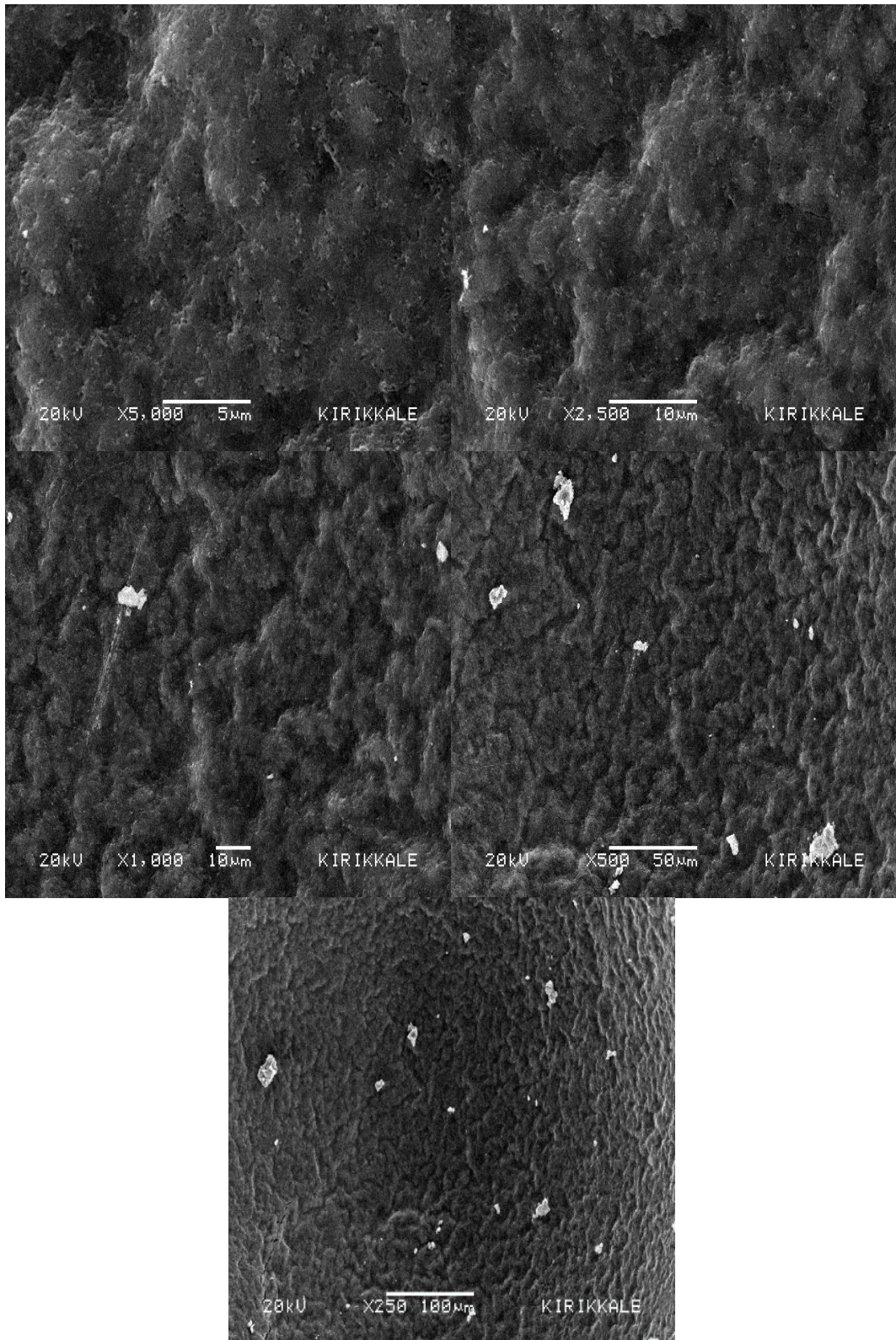


Figure 10. SEM image of LCF

4. Conclusions

In this study, for the first time, long chain bonds formed by latex in concrete were determined by SEM image analysis. Thanks to the long chain bonds made by latex, an impermeable structure has been formed within the FC. As a result of this chain bond formed by latex, the water absorption value of latex added concretes decreased by 59% compared to the FC.

Compared to the FC, the compressive strength of the LFC increased 86% in 1 day and 39% in 28 days. In SEM analysis, while capillary cracks were detected in the FC, it was determined that a stable structure was formed with long chain bonds and no capillary cracks were formed in the LFC.

The thermal conductivity coefficient of the LFC was found to be 0.062 W/mK. Since this value is less than the thermal conductivity value of 0.065 W/mK [29,30], this FC can be used as a thermal insulation material.

As a result, the use of latex in the production of FC contributed positively to the compressive strength and thermal conductivity. In particular, one of the negative aspects of foam concrete, excessive water absorption, has been significantly reduced by adding liquid latex to the mixture.

In future studies, the effect of latex bonding structure on normal and high strength concretes can be investigated. Especially, the effect of latex on early strength of high-strength concrete can be investigated.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] M. Gökçe and B.Ş. Şeker, "Foam concrete," *Journal of New Results in Science*, vol. 9,no.1, pp. 9-18, May 2020.
- [2] K. Ramamurthy, E.K. Nambiar and G.I.S. Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 6, pp. 388-396, 2009. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006
- [3] Y.M. Amran, N. Farzadnia and A.A. Ali, "Properties and applications of foamed concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990-1005, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
- [4] Z. Pan, H. Li and W. Liu, "Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 256-261, 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.078
- [5] E. Namsone, G. Şahmenko and A. Korjajkins, "Durability properties of high performance foamed concrete," *Procedia Engineering*, vol.172 pp. 760-767, 2017. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.120
- [6] P. Li, H. Wu, Y. Liu, J. Yang, Z. Fang and B. Lin, "Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 205, pp. 529-542, 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212
- [7] Z.M. Yaseen, R.C. Deo, A. Hilal, A.M. Abd, L.C. Bueno, S. Salcedo-Sanz and M.L. Nehdi, "Predicting compressive strength of lightweight foamed concrete using extreme learning machine model," *Advances in Engineering Software*, vol. 115, pp. 112-125, 2018. doi:10.1016/j.advengsoft.2017.09.004
- [8] S.Y. Chung, C. Lehmann, M. Abd Elrahman and D. Stephan, "Microstructural characterization of foamed concrete with different densities using microscopic techniques," *Cement Wapno Beton*, vol. 23, no. 3 pp. 216-225, 2018.
- [9] E.P. Kearsley and P.J. Wainwright, "The effect of porosity on the strength of foamed concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 2, pp. 233-239, 2002. doi:10.1016/S0008-8846(01)00665-2
- [10] D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi and E. Gugliandolo, "Key factors affecting the compressive strength of foamed concrete," *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 431, no. 6, pp. 1-8, 2018. doi:10.1088/1757-899X/431/6/062009

- [11] E.P. Kearsley and P.J. Wainwright, "The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 1, pp. 105-112, 2001. doi:10.1016/S0008-8846(00)00430-0
- [12] T. Li, F. Huang, J. Zhu, J. Tang and J. Liu, "Effect of foaming gas and cement type on the thermal conductivity of foamed concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 231, 2020. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117197
- [13] M.S. Goual, A. Bali and M. Queneudec, "Effective thermal conductivity of clayey aerated concrete in the dry state: experimental results and modelling," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 23, 1999. doi:10.1088/0022-3727/32/23/310
- [14] N. Narayanan and K. Ramamurthy, "Structure and properties of aerated concrete: a review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 22 no. 5, pp. 321-329, 2000. doi:10.1016/S0958-9465(00)00016-0
- [15] A. Öchsner, G.E. Murch and M.J. de Lemos (Eds.). "Cellular and porous materials: thermal properties simulation and prediction," John Wiley & Sons, 2008.
- [16] N.C. Balaji, M. Mani and B.V. Reddy, "Discerning heat transfer in building materials," *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 654-668, 2014. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.307
- [17] F. Batool, M.M Rafi and V. Bindiganavile, "Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, pp. 696-704, 2018. doi:10.1016/j.jobbe.2018.09.008
- [18] S.Y. Chung, C. Lehmann, M. Abd Elrahman and D. Stephan, "Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 6, pp. 550, 2017. doi:10.3390/app7060550
- [19] M. Gökçe, "Determining the physical properties of polymer in different admixtures used for self-compacting cement paste by ESEM," *Micron*, vol. 139, 2020. doi:10.1016/j.micron.2020.102953
- [20] K. Wang, V.R. Schaefer, J.T. Kevern and M.T. Suleiman, "Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete," in *NRMCA concrete technology forum: focus on pervious concrete, May 24-25, 2006, Nashville, USA*, 2006, pp. 1-12.
- [21] F. Giustozzi, "Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures," *Construction and Building Materials*, vol. 111, pp. 502-512, 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136
- [22] J.P. Won, J.H. Kim, S.W. Lee and C.G. Park, "Durability of low-heat, ultra rapid-hardening, latex-modified polymer concrete" *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 91-102, 2009. doi:10.1177/147776060902500201
- [23] Z. Bahranifard, F.F. Tabrizi and A.R. Vosoughi, "An investigation on the effect of styrene-butyl acrylate copolymer latex to improve the properties of polymer modified concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 205, pp. 175-185, 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.175
- [24] V.N. Tarasenko, "Impact of foamed matrix components on foamed concrete properties" in *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 327, no. 3, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032054
- [25] TS EN 12390-3. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Turkish Standard, Ankara; 2019.
- [26] ASTM C518-21 "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM, 2021.
- [27] TS EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. Turkish Standard, Ankara; 2013.
- [28] P. Azarsa and R. Gupta, "Specimen preparation for nano-scale investigation of cementitious repair material," *Micron*, vol. 107, pp. 43-54, 2018. doi:10.1016/j.micron.2018.01.007
- [29] C 107/2-2005. Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor. Partea a 2-a: Normativ privind calculul coeficienților globali de izolare termică la clădirile cu altă destinație decât cea de locuire; 2005.
- [30] O. Dénes, I. Florea and D.L. Manea, "Utilization of sheep wool as a building material," *Procedia Manufacturing*, vol. 32, pp. 236-241, 2019. doi:10.1016/j.promfg.2019.02.208



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Natural Gas Consumption Forecast in Kayseri with Box-Jenkins Methods, Grey Forecasting and Artificial Neural Networks

Betül Yılmaz^a, Sinem Kulluk^{*b}

Submitted: 08.08.2023 Revised: 04.05.2024 Accepted: 09.05.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A02

ABSTRACT

Keywords: Natural gas consumption forecast, Box-Jenkins models, grey forecasting, artificial neural networks

^a Erciyes University,
Engineering Faculty,
Dept. of Industrial Engineering
38280 - Kayseri, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1419-4697
e mail: iletisim.betulyilmaz@gmail.com

^{b*} Erciyes University,
Engineering Faculty,
Dept. of Industrial Engineering
38280 - Kayseri, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0675-3113
e mail: skulluk@erciyes.edu.tr

*Corresponding author:
skulluk@erciyes.edu.tr

In a world with growing environmental and energy concerns, effective energy use is crucial. Since our country largely imports natural gas, efficient usage is vital for the national economy. Accurate consumption estimates will enhance investment efficiency, optimize gas purchase agreements, and minimize economic losses from excess supply, thereby balancing future supply and demand. In this study, natural gas consumption data of Kayseri province on a monthly basis between the years 2015-2022, obtained from Republic of Türkiye Energy Market Regulatory Authority (EPDK), was used, and a consumption estimate was made for the year 2023. Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA -Box-Jenkins), Gray Prediction and Artificial Neural Networks (ANNs) methods, which are widely accepted in the literature, were used as forecasting methods. The methods used were compared in terms of Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE) and R^2 error performance measures, and it was seen that the multiplicative decomposition based grey GM(1,1) model, which gave the most successful result with an R^2 value of 0.926, was suitable for estimation. With the appropriate multiplicative decomposition based GM(1,1) model, monthly natural gas consumption estimation of Kayseri province was made for the year 2023.

Box-Jenkins Yöntemi, Gri Tahminleme ve Yapay Sinir Ağları ile Kayseri İli Doğal Gaz Tüketim Tahmini

ÖZ

Çevresel ve enerji sorunlarının arttığı bir dünyada, enerjinin etkin kullanımı çok önemlidir. Ülkemiz büyük ölçüde doğal gaz ithal ettiğinden, doğal gazın verimli kullanımı ulusal ekonomi için hayati önem taşır. Doğru tüketim tahminleri, yatırım verimliliğini artıracak, gaz alım anlaşmalarını optimize edecek ve fazla arzdan kaynaklanan ekonomik kayıpları minimize ederek gelecekteki arz ve talep dengesini sağlayacaktır. Bu çalışmada T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'ndan (EPDK) alınan 2015-2022 yılları arası aylık bazda Kayseri iline ait doğalgaz tüketim verisi kullanılmış olup, 2023 yılı için tüketim tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahminleme yöntemleri olarak literatürde de büyük ölçüde kabul gören Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA -Box Jenkins) modelleri, Gri Tahminleme ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH), Ortalama Mutlak Hata (OMH), Ortalama Kareli Hata (OKH), Ortalama Kareli Hata Kökü (OKHK) ve R^2 hata ölçütleri bakımından karşılaştırılmış, 0.926 R^2 değeri ile en başarılı sonucu veren çarpımsal ayrıştırma tabanlı gri GM(1,1) modelinin tahminleme için uygun olduğu görülmüştür. Uygun bulunan çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli ile 2023 yılı için Kayseri ili aylık doğal gaz tüketim tahminlemesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğal gaz tüketim tahmini, Box-Jenkins yöntemi, gri tahmin, yapay sinir ağları

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde artan enerji ihtiyacına karşı alternatif yakıtlar kullanılmaya başlanmıştır. Bunların başında fosil bir yakıt olan doğal gaz gelmektedir. Doğal gaz, sıcaklık ve basınç altında uzun yıllar boyunca kalan canlı artıklarının, yapısal değişime uğramasıyla günümüze kadar gelen enerji kaynaklarından biridir. Yanıcı bir gaz karışımı olup, aynı zamanda bir petrol türevidir [1]. Doğal gaz başlıca ulaşım, ısınma, pişirme, sıcak su, üretim tesisleri, fabrikalar ve elektrik üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Düşük maliyetli ve çevre dostu olması sebebiyle diğer yakıt türlerine göre daha fazla tercih edilmektedir.

Çevre sorunlarının ve enerjiye olan gereksinimin zamanla arttığı bir dünyada enerjinin verimli kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ülkemizdeki doğal gaz ihtiyacı, büyük ölçüde ithal edilerek karşılanmaktadır. Bu nedenle doğal gazın verimli bir şekilde kullanılması, ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Doğal gaz tüketimi miktarını etkileyen en önemli unsurlardan biri mevsimsel şartlar olup, yıllık toplam doğal gaz tüketimi her yıl değişmektedir. Yıllık ve aylık toplam tüketimler incelendiğinde benzer tüketim eğrilerinin olduğu görülmektedir. Enerji kaynaklarının yönetilmesi, doğal gaza olan talebin artmasıyla birlikte önemli bir konu haline gelmektedir. Bu nedenle gelecek dönemlere ait doğal gaz tüketimlerinin tahmin edilmesi ve modellenmesi, enerji kaynaklarının verimli kullanılmasında büyük önem taşımaktadır [2]. Doğal gaz tüketiminin doğru tahmin edilmesi enerji sektörüne yapılacak yatırımların ve uluslararası gaz alım anlaşmalarının etkinliğine katkıda bulunmakla beraber, ihtiyaç fazlası doğal gaz temini sonucunda oluşabilecek ekonomik kayıpları en aza indirebilecektir. Bu sayede de geleceğe yönelik doğal gaz arz ve talep arasındaki dengesizlikler ortadan kaldırılabilir [3].

Bu çalışmada, doğal gaz tüketiminin doğru ve etkin bir şekilde tahminlenmesi amaçlanmıştır. Kayseri ilinin 2015-2022 yılları arasında aylık bazda gerçekleşmiş olan doğal gaz tüketim serisi kullanılarak, Box Jenkins Yöntemi, Gri Tahminleme ve YSA yöntemleri ile tahminleme yapılmıştır. Tahminler sonucu hata etkinlik ölçütlerinden hareketle en uygun yöntem olarak çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) yöntemi belirlenmiş ve 2023 yılı için aylık bazda doğal gaz tüketim tahminlemesi bu yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

2. Literatür İncelemesi (Literature Review)

Literatürde tahminleme alanında Box-Jenkins, Gri Tahminleme, Yapay Sinir Ağları yöntemleri ile gerçekleştirilen oldukça fazla çalışma mevcuttur. Kaya [4] Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarını, 1990-2014 yılları tüketim verilerini kullanarak tahmin etmiştir. Yöntem olarak YSA, ARIMA ve Gri Tahmin yöntemlerini uygulamıştır. Yapmış olduğu analizler sonucunda YSA'nın en başarılı sonuçları verdiğini görmüştür. Çuhadar vd. [5] 1992-2005 yıllarında Antalya iline gelen aylık yabancı turist sayısı verilerine üstel düzeltme, Box-Jenkins ve YSA modellerini uygulamışlardır. Yaptıkları analizler ve kıyaslamalarla YSA yönteminin en iyi sonucu verdiğini görmüşler ve 2009 yılı için aylık dış turizm talebini tahminlemişlerdir. Kaynar vd. [6] çalışmalarında YSA ve ARIMA modelleri ile kısa dönemli doğal gaz tüketim tahmini yapmayı hedeflemişlerdir. Ankara iline ilişkin 1.5 yıllık, günlük ve haftalık doğal gaz tüketim verilerinden yararlanmışlardır. OKH değerlerini kıyaslamışlar ve YSA modelinin başarısının ARIMA modelinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca yapılan tahminler içerisinde günlük veri tahmininin haftalık veri tahminine göre performansı daha yüksek çıkmıştır. Kırçıl [7], İzmir ilinin 2007-2012 yılları konut sektörü aylık doğal gaz tüketim verileriyle talep tahminlemesi gerçekleştirmiştir. Yöntem olarak mevsimsel otoregresif entegre hareketli ortalama (SARIMA) modeli en uygun sonucu vermiş ve SARIMA modellerinden en uygun olanını hata ölçütleriyle değerlendirip, seçerek geleceğe yönelik tüketim tahminlemesi yapmıştır.

Çelik [8], Isparta ili 2010-2016 yılları konut sektörüne ait 76 aylık doğal gaz tüketim verilerini kullanarak doğal gaz ihtiyacını tahminlemeye çalışmıştır. Tahminleme yöntemi olarak Üstel Düzeltme, Box-Jenkins ve Gri Tahminleme yöntemlerini kullanmıştır. Başarı kriterleri açısından yöntemleri değerlendirerek, en iyi sonucu gri tahminleme yönteminin verdiğini gözlemlemiştir. Gelecek 20 ay için tüketim tahminlemesi gerçekleştirmiştir. Ekmekçi [9] çalışmasında, 1970-2013 yılları arası Türkiye'deki doğal gaz tüketimini

sektörel bazda incelemiştir. Birincil enerji arzı, çimento tüketimi, diğer sektörler tüketimi, ithalat tüketimi, konut tüketimi, sanayi tüketimi, sektörel toplam tüketimi olmak üzere toplamda 7 sektör için doğal gaz tüketim tahminlemesi gerçekleştirmiştir. Tahminleme yöntemi olarak ise ARIMA yöntemini uygulamış, uygulama için de Eviews ve SPSS paket programlarında yararlanmış. Eren[10], Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) elde ettiği 2004-2016 yılları Türkiye yıllık doğal gaz tüketim ve nüfus serilerini kullanarak gri tahmin yöntemini kullanarak 2017 – 2030 yılları arası doğal gaz tüketim ve nüfus öngörüsü yapmıştır. Singh ve Yassine [11] çalışmalarında cihaz kullanımını, günün saati, günün periyodu, hafta içi, hafta, ay ve yılın mevsimi gibi zamanla ilişkilendirmelerin yanı sıra evdeki cihaz-cihaz ilişkilendirmeleri açısından anahtar faktörler olan cihaz kullanımını tanımlayarak tüketicilerin enerji tüketim davranışının ve enerji tahmin eğiliminin etkisini analiz etmişlerdir. Denetimsiz veri kümelemesi, enerji zaman serilerinde sık model madenciliği analizi ve enerji kullanımı tahmini için Bayes ağ tahmini önermişlerdir. Zengin akıllı sayaç veri kümelerini kullanarak kapsamlı deneyler gerçekleştirmişlerdir. Destek Vektör Makinesinin (DVM), Çok Katmanlı Algılayıcıdan (ÇKA) daha iyi performans gösterdiğini görmüşlerdir. Taşkınar [12] Ankara ilinde tüketilen doğal gaz miktarını öngörmeyi amaçlamıştır. YSA ile uygulama yapmıştır. Ağda girdi niteliği olarak nem, maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, ortalama sıcaklık, hissedilen maksimum sıcaklık, hissedilen en düşük sıcaklık, tüketim, bağımsız eleman sayısı ve ısı değer olmak üzere 9 tane nitelik kullanmıştır. En başarılı ağ yapısında 0.9772 R^2 değeri elde etmiştir. Akman vd. [13] elektrik yükü tahmin uygulamalarında sıklıkla kullanılan çeşitli tahmin yöntemlerini anlatmış, yeni yaklaşımlara değinmişlerdir. Destek vektör regresyonu ve melez yaklaşımların, elektrik yük tahmininde nispeten yeni ve rekabetçi bir yöntemler olduğunu vurgulamışlardır. Calp [14], işyerlerinde yapılan yemek ve ihtiyaç olunan personel miktarını içeren bir yapay sinir ağı tasarlamıştır. Model, gerçek verilerle test edilmiş ve YSA'nın oldukça başarılı tahminler gerçekleştirdiği izlenmiştir. Model oluşturulurken gizli tabakadaki nöron sayısı seçiminin ağın performansını etkilediği gözlemlenmiştir.

Erdem, [15] makine öğrenmesi teknikleri ile Türkiye'nin doğal gaz enerji tüketiminin tahminlenmesi üzerine çalışmıştır. YSA, Rastgele Orman (RO), zaman serileri gibi yöntemler ile tahminleme yapmış ve 2010 ile 2018 arası doğal gaz tüketim verilerini kullanmıştır. En başarılı tahminleri YSA üretmiştir. Tuna [16] Erzurum ili konut sektörü Ocak 2009- Kasım 2018 doğal gaz tüketim miktarlarıyla tahminleme yapmayı amaçlamıştır. Yöntem olarak ARIMA modellerini kullanmıştır. Aynı zamanda anket verileri oluşturularak hane halklarının doğal gazı tercih etme ve etmeme durumlarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Akpınar [17] tez çalışmasında doğal gaz tüketim tahminlemesi yapmak amacıyla yıl öncesi ve gün öncesi aylık talep tahmini olmak üzere iki ayrı tahminleme yapmıştır. Ayrıştırma yöntemi, Winters üstel düzeltme ve Box-Jenkins yöntemlerini kullanmıştır. Uygulama sonucunda gün öncesi için öngörü gerçekleştirmiştir. Oruç ve Başağaoğlu [18] çalışmalarında bir sağlık merkezinde yatan hasta sayısının tahminini yapmışlardır. Model olarak gri tahminlemeyi tercih etmişlerdir. Ocak 2015-Ağustos 2019 tarihleri arasında yataklı hasta servisinde yatan hasta sayısı verilerini kullanmışlardır ve gelecek 28 ay için öngörü değerleri elde etmişlerdir. Demir ve Keskin [19] Samsun Mert Irmağı havzasında yükseklik modellemesi yapmışlardır. Tahmin yöntemleri olarak ÇKA ve regresyon analizi kullanmışlardır. Sonuç olarak ÇKA modellerinin tahminlemede daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Aydın [2] Denizli ilindeki konut tüketicilerinin Ocak 2015- Haziran 2019 dönemi doğal gaz tüketim verilerini kullanarak tahminleme yapmıştır. ARIMA yöntemiyle Eviews programında uygulamalar gerçekleştirmiştir. Gelecek 2 yıl için aylık bazda öngörüler elde etmiştir. Konut doğal gaz kullanımını en fazla etkileyen parametrelerin tespitini yapmıştır [2].

Sayım [20] bir büyükşehir belediyesinin 2014-2018 yılları arası gelir bütçesi bilgilerini kullanarak, GM(1,1) yöntemi ile 2019-2023 yılları arası büyükşehir belediyesinin gelir ve giderlerinin öngörüsünü yapmıştır. Yapılan değerlendirmelerle gider kalemlerinin GM(1,1) yöntemine uygun olmadığını gözlemlemiştir. Köse [21], Döviz kuru alış değerlerini öngörmek amacıyla 10 Temmuz 2019-7 Aralık 2020 dönemi döviz kurlarını kullanmıştır. Model olarak YSA ve GM(1,1) gri tahmin modelini uygulamıştır. Sonuç olarak YSA'da uzun kısa dönem hafıza (LSTM) katmanlarının daha başarılı sonuçlar verdiğini görmüştür. Panek ve Włodek [22] Polonya'nın orta ölçekli şehirlerinden birinde belediye tüketicilerinin geçici ve gelecekteki doğal gaz tüketiminin modellemesini gerçekleştirmişler. Bu amaçla makine öğrenme algoritmalarından YSA ve iki regresyon algoritması olan çoklu doğrusal regresyon (MLR) ve rasgele orman (RF) kullanmışlar. Doğal gaz

talebini tahmin etmede en iyi algoritmanın RO olduğunu göstermişlerdir. Safiyari vd [23] Mart 2019'un başından Şubat 2021'in sonuna kadar 24 ay boyunca Tahran eyaletinin konut sektöründeki aylık doğal gaz talebini tahmin etmek için ÇKA ve DVM yöntemlerini kullanmışlardır. En iyi sonucu en düşük hata ölçütü değeri ile ÇKA vermiştir.

3. Tahmin yöntemleri (Forecasting Methods)

3.1. Box-Jenkins yöntemi (Box-Jenkins method)

Box-Jenkins diğer adıyla ARIMA modelleri 1970-1976 yıllarında George Box ve Gwilym Jenkins tarafından zaman serileri stokastik süreç özelliği sergiler varsayımından hareketle önerilmiştir [24]. Bu yöntemde tahminleme yapmak için serinin durağan olması veya durağan hale getirilmiş olması gerekmektedir. Box-Jenkins modelleri doğrusal durağan stokastik modeller, durağan olmayan doğrusal stokastik modeller ve mevsimsel modeller olarak sınıflandırılmaktadır [7]. Gerçek hayat uygulamalarında serilerin çoğunluğu, özellikle ekonomik zaman serileri durağan özellik sergilemez. Serilerin durağanlığını trend, mevsimsellik, döngüsellik ve rassallık gibi davranışlar bozar. Durağan olmayan zaman serilerinin modellenmesi için öncelikle serinin durağan hale getirilmesi gerekir. Serinin durağan hale getirilmesi için öncelikle ilgili davranışların ortaya konması, sonrasında da ortadan kaldırılması gerekir. Eğer zaman serisi, ortalama etrafında durağanlık göstermiyorsa, serinin durağanlığı uygun sayıda fark alınarak sağlanır. Serinin kaç kez farkı alınarak durağanlaştığı, d ile gösterilen fark alma derecesi parametresini ifade eder ve gerçek hayat uygulamalarında fark alma derecesi çoğunlukla 1 ya da en fazla 2 alınmaktadır. Orijinalinde durağan olmayan ama fark alma sonucu durağan hale getirilmiş serilere yönelik modellere entegre modeller ya da "durağan olmayan stokastik modeller" denir. Otoregresyon parametresi derecesi p , hareketli ortalama parametresi derecesi q ise ve d kez fark alma işlemi yapılmışsa, bu modele (p,d,q) dereceden otoregresif entegre hareketli ortalama modeli denir ve ARIMA (p,d,q) olarak gösterilir [25]. Genel ARIMA (p,d,q) modelinin gösterimi Eş. 1 ve 2'de verilmiştir. Burada ∇ fark alma operatörü, d ise fark alma derecesidir.

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\phi(L)\nabla^d Y_t = \theta(L)\varepsilon_t \quad (2)$$

3.2. Gri tahminleme yöntemi (grey forecasting method)

Gri tahminleme yöntemi, yapısı düzensiz, karmaşık ve belirsiz olan sistemler için 1982'de Deng Ju-long tarafından ortaya atılmış bir tahminleme tekniğidir [26]. Gri tahmin yönteminin, az sayıda veriyle çalışabilmesi ve yüksek tahmin güvenilirliği sağlaması açısından diğer tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında avantajlı olabilmektedir [10]. Uygulamada en fazla kullanılan gri model, Birinci Mertebeden Bir Değişkenli Gri Model olarak adlandırılan GM (1,1) modelidir. GM (1,1) modeli aşağıdaki adımlar izlenerek kurulmaktadır [8].

1.Adım: n örneklem büyüklüğüne sahip $x^{(0)}$ dizisinin gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$X^{(0)} = (X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)); \quad n \geq 4 \quad (3)$$

2.Adım: $X^{(0)}$ serisine Birikim Oluşturma İşlemi (BÜİ) uygulanarak $X^{(1)}$ dizisi oluşturulur.

$$X^{(1)}(k) = (X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)); \quad n \geq 4 \quad (4)$$

3. Adım: Oluşturulan $X^{(1)}$ dizisinden, $Z^{(1)}$ serisi oluşturulur.

$$Z^{(1)} = (Z^{(1)}(1), Z^{(1)}(2), \dots, Z^{(1)}(n)) \quad (5)$$

$$Z^{(1)}(k) = 0.5 x^{(1)}(k) + 0.5 x^{(1)}(k - 1) \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

4.Adım: Modelin gri diferansiyel denklemi aşağıdaki gibidir:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Eş. 7'deki zaman noktaları k , gelişim katsayısı a , gri etki miktarı katsayısı ise b ile ifade edilmiştir.

5.Adım: Beyazlaştırma denklemi ise Eş. 8'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{dx^{(1)}(k)}{dt} + \alpha x^{(1)}(k) = b \quad (8)$$

6.Adım: Eş. 7'deki gri diferansiyel denklemde yer alan a ve b parametrelerinin elde edilmesinde sıklıkla en küçük kareler yöntemi (EKK) ya da parametrik yöntem kullanılmaktadır. Önerilen ve en çok kullanılan en küçük kareler yöntemidir. Öncelikle denklemin parametreleri sağ tarafa alınarak aşağıdaki denklem elde edilir. Sonrasında seri matris formunda dönüştürülebilir.

$$X^{(0)}k = -\alpha z^{(1)}k + b \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(1) \\ x^{(0)}(2) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(1) & 1 \\ -z^{(1)}(2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad \hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$Y = B\hat{a} \quad (11)$$

7.Adım: Eş. 11'in her iki tarafı B matrisinin devriği ile çarpıldığında Eş. 12 elde edilir. Bu işlemle B matrisi kare matrise dönüştürülmektedir.

$$B^T Y = B^T B \hat{a} \quad (12)$$

Eş. 12'in her iki tarafı $B^T B$ matrisinin tersi $(B^T B)^{-1}$ ile çarpılırsa,

$$(B^T B)^{-1} B^T Y = \hat{a} \quad (13)$$

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \text{ ise, } \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (14)$$

8.Adım: Eş. 8'deki beyazlaştırma denklemine göre $x^{(1)}(k)$ hesaplanabilir. Elde edilen a ve b değerleriyle Eş. 15 ve Eş. 16'daki gri modeller oluşturulabilir.

$$\left[\hat{x}_p^{(1)}(k+1) \right] = x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \left] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (15)$$

Burada $\hat{x}_p^{(1)}(k+1)$, $k+1$ zamanında tahminlenen x değerinin kümülatif değerini ifade etmektedir.

9.Adım: Eş. 15 ile hesaplanan tahminlerin kümülatif yerine normal değeri hesaplanırsa denkleme Ters Birikim Oluşturma İşlemi (TBÜİ) uygulanabilir [8].

$$\hat{x}_p^{(0)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} - (1 - e^a) \quad (16)$$

3.3. Yapay sinir ağları yöntemi (artificial neural network method)

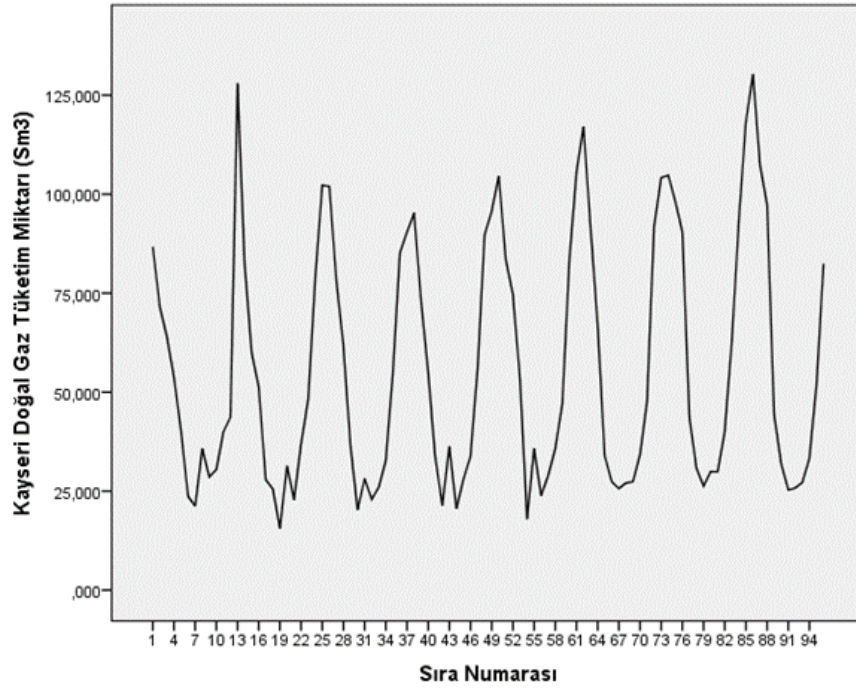
Yapay sinir ağları, insan beyninin öğrenme yapısına benzer nitelikte olup, biyolojik nöron yapısından ve öğrenme biçimlerinden esinlenerek geliştirilmiştir [27]. YSA'nın en önemli özelliklerinden biri, doğrusal olmayan yapılarda iyi sonuçlar vermesidir. Doğrusal olmayan yapılar ile çalışmak zordur ancak YSA doğrusal olmayan yapılarda verdiği sonuçlarla bu zorluğu aşmaktadır. YSA'da yavaş bir birim, o sistemin hızını yavaşlatmaz. Geleneksel yöntemlerde ise sistemin yavaşlamasını sağlar. YSA'lar kendi kendine öğrenme yeteneğine sahiptirler. Veriyi, örnekler ile öğrenerek olay ile ilgili genelleme yapabilecek duruma gelirler. Genelleme ile görülmemiş örneklere bilgiler üretir. Ağda bazı yerlerdeki bozulmalar, ağın çalışmasına engel olmaz. Hatalara karşı toleransa sahip oldukları için ağ çalışmaya devam eder, sadece performansında düşüklük olabilir. Eksik verilerle çalışabilirler. Eksik bilginin olması durumunda çalışmayı engellemeyerek hatayı tolere etmeye çalışırlar. Sınırsız sayıda parametre değişken kullanılarak çalışabilmektedirler. Bu sınırsız sayıdaki parametre ve değişkenleri gerektiği anda kullanılacak şekilde eğitilirler. YSA'lar değişken ve parametrelerinde değişiklik olduğunda uygun çözümler için tekrar eğitilebilirler [28].

4. Kayseri İli Doğal gaz Tüketim Verileri (Natural Gas Consumption Data of Kayseri)

Çalışmada, Kayseri iline ait aylık doğal gaz tüketiminin tahminlenmesi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veriler Kayseri ilinin 2015 Ocak - 2022 Aralık tarihleri arası 8 yıllık il genelinde tüketilen aylık doğal gaz miktarlarını içermekte olup, verilere EPDK [29] aracılığıyla erişim sağlanmıştır. İlk olarak veri üzerinde veri analizi gerçekleştirilmiş, daha sonra verilere Box-Jenkins yöntemi, gri tahminleme ve YSA olmak üzere üç yöntem tahminleme amacıyla uygulanmıştır. Yöntemler başarı kriterleri açısından değerlendirilip, en uygun çözümü veren yöntemle Kayseri ilinin gelecek aylara yönelik doğal gaz tüketim tahminlenmesi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler Tablo 1'de, verilerin zaman yolu grafiği ise Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. 2015-2022 Yılları Arası Aylık Bazda Kayseri İli Doğal Gaz Tüketim Miktarları (milyon Sm³) [29] (Natural Gas Consumption Amounts in Kayseri Province on a Monthly Basis Between 2015-2022 (million Sm³))

Aylar/Yıllar	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ocak	86.72	127.93	102.242	90.5	95.773	105.508	104.142	118.274
Şubat	71.5	82.38	101.976	95.259	104.586	117.066	104.767	130.319
Mart	63.96	59.94	78.188	72.984	83.433	91.472	98.086	107.343
Nisan	53.7	51.33	61.67	54.872	74.722	67.068	90.501	97.346
Mayıs	40.19	27.889	36.408	33.687	53.45	33.899	43.698	44.255
Haziran	23.68	25.566	20.255	21.434	17.956	27.406	30.754	31.884
Temmuz	21.23	15.528	28.146	36.279	35.77	25.643	26.274	25.292
Ağustos	35.76	31.347	22.904	20.552	23.899	27.057	29.903	25.809
Eylül	28.6	22.85	26.005	28.126	28.98	27.401	29.899	27.211
Ekim	30.43	36.881	32.731	33.829	35.721	34.203	40.043	33.351
Kasım	40.01	48.069	54.763	55.763	47.003	47.637	62.652	51.823
Aralık	43.71	78.517	85.226	89.9	83.31	91.953	93.3	82.455

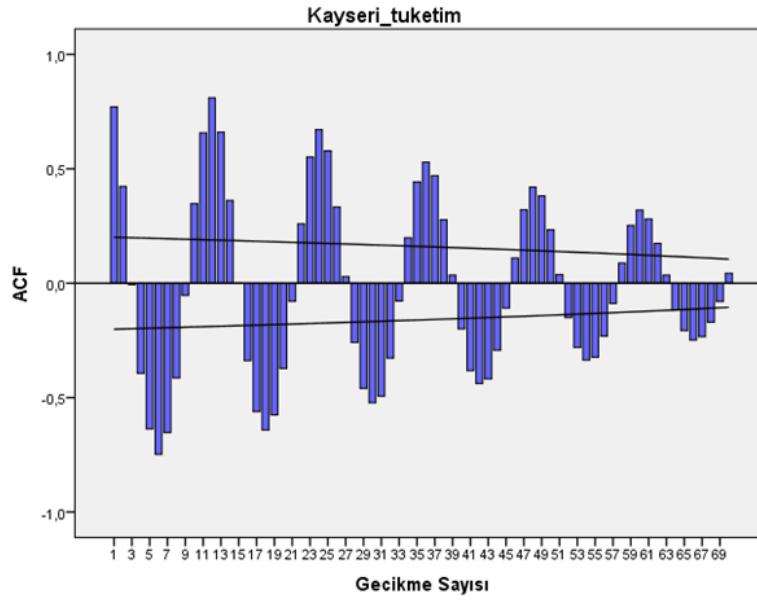


Şekil 1. 2015-2022 Yılları Arası Kayseri İli Doğal Gaz Tüketim Miktarları (milyon Sm³) Grafiği
(The Graph of Natural Gas Consumption Amounts in Kayseri Province Between 2015-2022 (million Sm³))

5. Kayseri ili Doğal Gaz Tüketim Tahmini (Forecasting Natural Gas Consumption of Kayseri)

5.1. Box-Jenkins yöntemi ile doğal gaz tüketim tahminlemesi (Natural gas consumption estimation with Box-Jenkins method)

Box-Jenkins yöntemi ile tahminleme SPSS (26.0) istatistik paket programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Kayseri_tuketim veri kümesinin analizini yapmak ve davranışını incelemek amacıyla serinin grafiği incelenmiştir. Şekil 1'de sunulan grafik değerlendirildiğinde, doğalgaz tüketiminin her yılın belirli mevsimlerinde artış ve azalış göstermesi verinin mevsimsel bileşen içerdiğine dair bir kanıt oluşturmaktadır. Serinin mevsimsellik içermesi sebebiyle seri durağan bir davranış sergilememektedir. Daha detaylı bir inceleme için serinin otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları (PACF) incelenmiştir. Kayseri_tuketim zaman serisinin ACF ve PACF grafikleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te, ilk 21 gecikme için Box-Ljung istatistikleri ile birlikte otokorelasyon tablosu ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Kayseri_tuketim Serisi ACF Grafiği
(ACF Graph of Kayseri_tuketim Series)

Şekilde verilen ACF grafiği incelendiğinde seride 12 aylık zaman periyotlarında önemli otokorelasyonların olduğu, dolayısıyla serinin mevsimsellik içerdiği ve durağan bir davranış sergilemediği net bir şekilde görülmektedir. ACF grafiğinden hareketle seride mevsimsellik olduğu ve mevsimselliğin periyodunun 12 olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 2. Kayseri_tuketim Serisi Otokorelasyon Tablosu (Autocorrelation Table of Kayseri_tuketim Series)

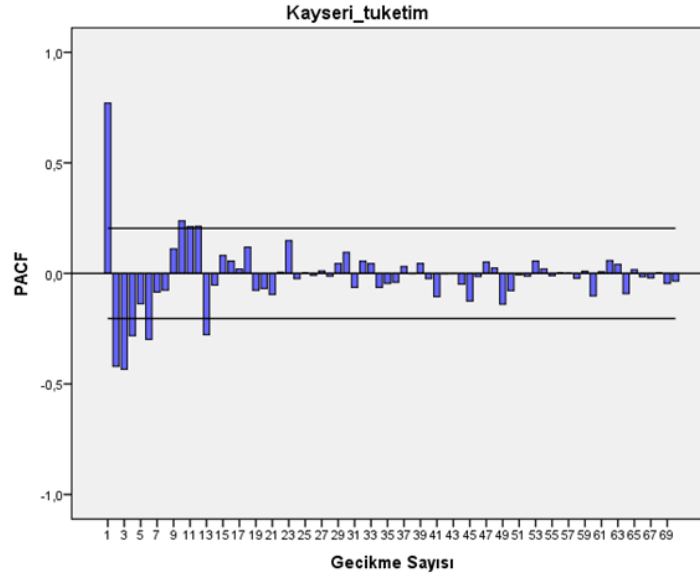
Otokorelasyonlar					
Seri: Kayseri_tuketim					
Gecikme	Otokorelasyon	Std. Hata ^a	Box-Ljung İstatistiği Değer	Sd ^c	P ^b
1	0.77	0.1	58.773	1	.000
2	0.423	0.1	76.649	2	.000
3	-0.006	0.099	76.654	3	.000
4	-0.394	0.099	92.49	4	.000
5	-0.637	0.098	134.472	5	.000
6	-0.748	0.098	192.903	6	.000
7	-0.652	0.097	237.901	7	.000
8	-0.414	0.097	256.205	8	.000
9	-0.053	0.096	256.509	9	.000
10	0.347	0.096	269.702	10	.000
11	0.657	0.095	317.533	11	.000
12	0.81	0.094	391.025	12	.000
13	0.66	0.094	440.389	13	.000
14	0.362	0.093	455.434	14	.000
15	-0.001	0.093	455.434	15	.000
16	-0.338	0.092	468.907	16	.000
17	-0.561	0.092	506.434	17	.000
18	-0.642	0.091	556.083	18	.000
19	-0.575	0.09	596.497	19	.000
20	-0.372	0.09	613.672	20	.000
21	-0.079	0.089	614.452	21	.000

^a sd: serbestlik derecesi

^b Varsayılan süreç bağımsız (beyaz gürültü)

^c Asimtotik ki-kare yaklaşımına dayalı

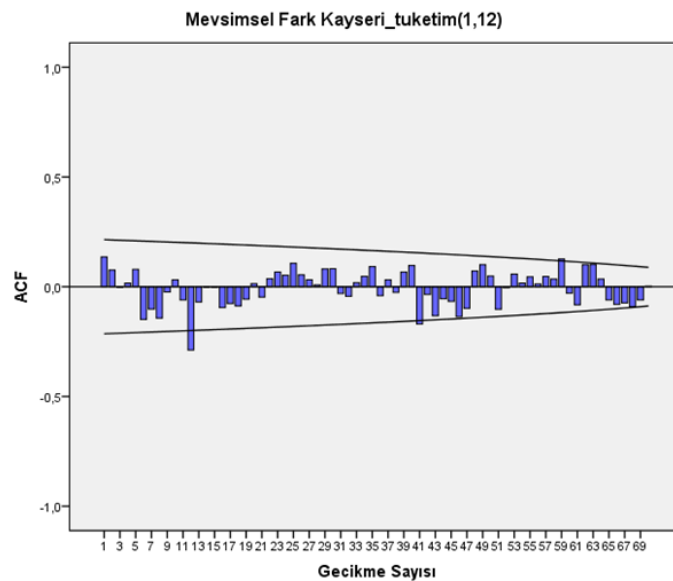
Tablo 2’de verilen Box-Ljung istatistikleri % 95 güven aralığında incelendiğinde, istatistiğin p değerlerinin tüm gecikmelerde 0.05’in altında değer aldığı görülmektedir. Bu ise serinin durağan olmadığını, gecikmelerde önemli otokorelasyonların mevcut olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 3. Kayseri_tuketim Serisi PACF Grafiği
(PACF Graph of Kayseri_tuketim Series)

Şekilde verilen kısmi otokorelasyonlar incelendiğinde bazı gecikmelerde önemli kısmi otokorelasyonların varlığı dikkat çekmektedir.

Seriye mevsimsellikten arındırıp, durağanlaştırabilmek için öncelikle serinin 1. dereceden mevsimsel farkını almak gerekir. Serinin mevsimsel farkı alındıktan sonraki otokorelasyon fonksiyonu (ACF) grafiği Şekil 4’te gösterilmiştir. ACF grafiği incelendiğinde serinin mevsimsellikten arındığı ve büyük ölçüde durağanlaştığı görülmektedir. Sadece 12. gecikmede önemli bir otokorelasyon görülmektedir, bunun durağanlığı bozup bozmadığını net olarak ortaya koymak için Box-Ljung istatistiği p değerlerine bakmakta fayda vardır. Mevsimsel farkı alınmış serinin 21 gecikme için ACF tablosu Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 4. Mevsimsel fark (Kayseri_tuketim,1,12) Serisinin ACF Grafiği
(ACF Graph of seasonal difference (Kayseri_tuketim,1,12) Series)

Tablo 3. Mevsimsel fark (Kayseri_tuketim,1,12) Serisinin ACF Tablosu (ACF Table of seasonal difference (Kayseri_tuketim,1,12) Series)

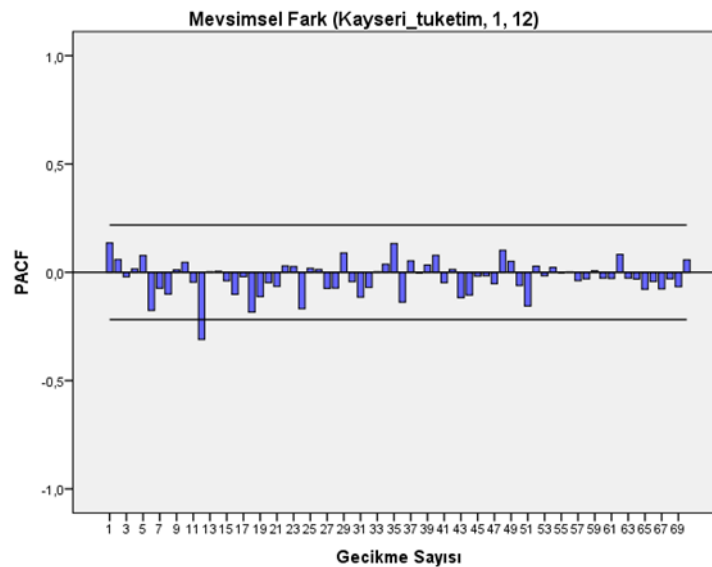
Otokorelasyonlar					
Seri: Kayseri_tuketim					
Gecikme	Otokorelasyon	Std. Hata ^a	Box-Ljung İstatistiği Değer	Sd ^c	P ^b
1	0.136	0,107	1,603	1	0,205
2	0.076	0,107	2,111	2	0,348
3	-0.003	0,106	2,112	3	0,549
4	0.016	0,105	2,136	4	0,711
5	0.079	0,105	2,702	5	0,746
6	-0.149	0,104	4,746	6	0,577
7	-0.102	0,103	5,724	7	0,572
8	-0.143	0,103	7,671	8	0,466
9	-0.024	0,102	7,726	9	0,562
10	0.031	0,101	7,819	10	0,646
11	-0.061	0,101	8,183	11	0,697
12	-0.289	0,1	16,552	12	0,167
13	-0.07	0,099	17,049	13	0,197
14	-0.001	0,098	17,05	14	0,254
15	-0.004	0,098	17,051	15	0,316
16	-0.095	0,097	18,01	16	0,323
17	-0.077	0,096	18,645	17	0,349
18	-0.088	0,096	19,483	18	0,363
19	-0.057	0,095	19,839	19	0,404
20	0.014	0,094	19,86	20	0,467
21	-0.047	0,093	20,117	21	0,514

* sd: serbestlik derecesi

^a. Varsayılan süreç bağımsız (beyaz gürültü)

^b. Asimtotik ki-kare yaklaşımına dayalı

Tablo 3 incelendiğinde % 95 güven aralığında Box-Ljung istatistiği p değerlerinin hepsinin 0.05'in üzerinde olduğu, dolayısıyla serinin durağanlaştığı görülmektedir. ACF grafiğinde 12. gecikmede sınır dışında görülen önemli otokorelasyon durağanlığı bozmamaktadır, Box-Ljung istatistiği p değeri bu gecikme için 0.167 değeriyle 0.05'in üzerindedir ve otokorelasyon önemli değildir. Mevsimsel fark alma işlemi sonucu seri mevsimsellikten arındırılmış, durağan hale gelmiştir. Böylece seri model belirleme aşaması için uygun duruma gelmiştir. Mevsimsel farkı alınmış serinin kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Mevsimsel fark (Kayseri_tuketim,1,12) Serisinin PACF Grafiği
(PACF Graph of seasonal difference (Kayseri_tuketim,1,12) Series)

PACF grafiği incelendiğinde 12. gecikmede sınırları aşan önemli bir kısmi otokorelasyon görülmektedir. Ancak Tablo 3'te sunulan Box-Ljung istatistiği p değerlerine göre seride durağanlığı bozan önemli otokorelasyonlar bulunmamaktadır ve seri durağandır.

Seriye uygun modeli belirleyebilmek adına kullanılacak modelin mevsimsel olmayan otoregresif (AR) parametresi p , hareketli ortalama (MA) parametresi q ve mevsimsel otoregresif (AR) P parametresi, hareketli ortalama (MA) parametresi Q parametrelerinin tahminlerini yapmak gerekmektedir. Şekil 23 ve 24'teki ACF ve PACF grafiklerine bakıldığında periyot (s) 12 olmak üzere, ilk gecikmelerde önemli otokorelasyonlar olmadığından mevsimsel olmayan AR parametresi $p=0$, mevsimsel olmayan MA parametresi $q=0$ 'dır. Fark alınmadığından mevsimsel olmayan fark derecesi $d=0$ 'dır. ACF grafiğinden hareketle 12. gecikme etrafındaki otokorelasyonların önemli olup olmadığı kabulüne göre mevsimsel MA parametresi $Q=0$ veya $Q=1$ alınabilir. PACF grafiğinden hareketle 12. gecikme etrafındaki kısmi otokorelasyonların önemli olup olmadığı kabulüne göre mevsimsel AR parametresi $P=0$ veya $P=1$ alınabilir. 1 kez mevsimsel fark alındığından mevsimsel fark derecesi $D=1$ 'dir. Buna göre belirlenen alternatif modeller SARIMA(0,0,0)x(0,1,0)₁₂, SARIMA(0,0,0)x(1,1,1)₁₂, SARIMA(0,0,0)x(0,1,1)₁₂ ve SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ şeklindedir. Yapılan analizler sonucu SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modelinin seriyi modellemek için en uygun model olduğu görülmüştür. SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli uyum istatistikleri özet tablosu Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli uyum istatistikleri özet tablosu (SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ model fit statistics summary table)

Uyum İstatistiği	Ortalama	Minimum	Maksimum	Yüzdeler						
				5	10	25	50	75	90	95
Durağan R2	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
R2	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897	0.897
OKHK	10.347	10.347	10.347	10.347	10.347	10.347	10.347	10.347	10.347	10.347
OMYH	15.941	15.941	15.941	15.941	15.941	15.941	15.941	15.941	15.941	15.941
MakMYH	61.704	61.704	61.704	61.704	61.704	61.704	61.704	61.704	61.704	61.704
OMH	7.642	7.642	7.642	7.642	7.642	7.642	7.642	7.642	7.642	7.642
MakMH	38.488	38.488	38.488	38.488	38.488	38.488	38.488	38.488	38.488	38.488
Norm BIC	4.779	4.779	4.779	4.779	4.779	4.779	4.779	4.779	4.779	4.779

R^2 belirleme katsayısı değeri 0.897 ile 1'e yakın bir değerdir ancak seride mevsimsellik olduğu için R^2 değeri yerine *durağan* R^2 ölçütünü dikkate almak daha doğru olacaktır. *Durağan* R^2 değeri, çok düşük 0.09 değeriyle de olsa pozitif çıkmıştır. Dolayısıyla model, basit ortalama modelden az da olsa daha iyi sonuç vermiştir. Tablodan *OMYH* değerinin 15.941 olduğu görülmektedir. Maksimum mutlak yüzde hata ise (*MakMYH*) 61.704 olarak elde edilmiştir. Bu ölçütlerin biraz yüksek çıktığı söylenebilir. Diğer ölçütler ise tekil model değerlendirme için uygun değildir, ancak çoklu model karşılaştırmada kullanılacaktır. Tablo 5'te SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli istatistikleri gösterilmiştir. Tabloda verilen Ljung-Box Q istatistiği p değeri incelendiğinde, 0.353 değeriyle 0.05 değerinden yüksek değer almıştır ve model doğru şekilde belirlenmiştir.

Tablo 5. SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ Modeli İstatistikleri (SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ Model Statistics)

Model	Tahminleyici Sayısı	Model Uyum İstatistikleri Durağan R ²	İstatistik	Ljung-Box Q(18) SD*	P	Aykırı Değer Sayısı
Kayseri_tuketim-Model_1	0	0.09	18.585	17	0.353	0

* SD: Serbestlik Derecesi

Tablo 6'da SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli parametrelerine yönelik t istatistik sonuçları gösterilmektedir.

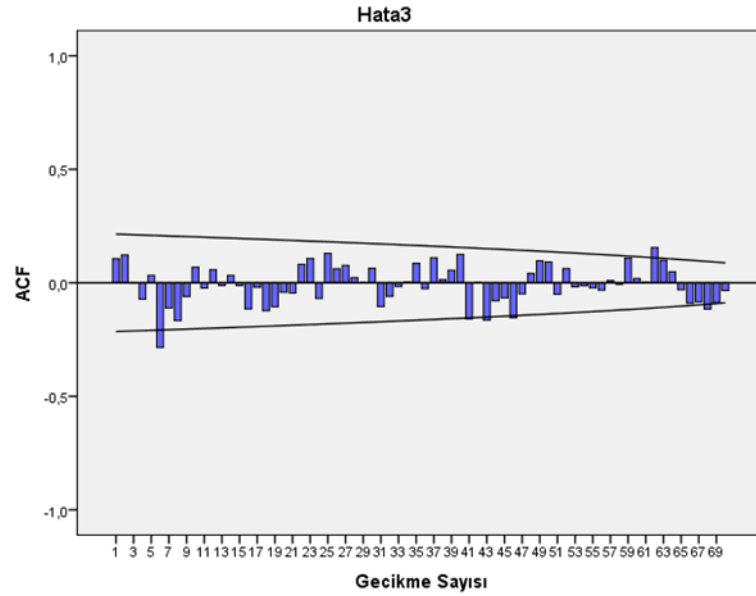
Tablo 6. SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli parametreleri (SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ Model Parameters)

			Tahmin	SH	t	p	
Kayseri_tuketim-Model_1	Dönüşüm yok	Sabit	2.722	0.807	3.372	0.001	
		AR, Mevsimsel	Gecikme 1	-0.416	0.106	-3.935	0.000
		Mevsimsel fark	1				

SH:Standart Hata

Tablodan modelin sabit terim parametresinin ve AR mevsimsel parametresinin t istatistiği p değerlerinin sırasıyla 0.001 ve 0.000 değerleriyle 0.05'ten küçük olduğu dolayısıyla her iki parametrenin de anlamlı olduğu anlaşılmaktadır.

Modelin uygunluğunu tespit etmekte bir başka kriter olan hataların beyaz gürültü olup olmadığının kontrolü öncelikle modelden elde edilen hatalara yönelik oluşturulan ACF grafiği aracılığıyla analiz edilmiştir. İlgili grafik Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₂Modeli Hata Serisinin ACF Grafiği
(ACF graph of the SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₂model residual series)

Hataların ACF grafiğinden görüldüğü gibi birkaç gecikmede önemli otokorelasyon olabileceği izlenmektedir. Bu durumu kesinleştirmek ve modelin hata terimlerinin standart normal dağılımlı rasgele değişkenlerin dizininden oluşan bir beyaz gürültü süreci olup olmadığını test etmek için Box-Ljung testine bakmakta fayda vardır. Hata serisinin 21 gecikme için ACF tablosu, Box-Ljung test değerleriyle birlikte Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. HATA3 Serisinin ACF Tablosu (ACF Table of HATA3 Series)

Otokorelasyonlar					
Seri: HATA3					
Gecikme	Otokorelasyon	Std. Hata ^a	Box-Ljung İstatistiği		
			Değer	sd	P ^b
1	0.106	0.107	0.98	1	0.322
2	0.123	0.107	2.303	2	0.316
3	-0.002	0.106	2.303	3	0.512
4	-0.072	0.105	2.77	4	0.597
5	0.033	0.105	2.871	5	0.72
6	-0.284	0.104	10.362	6	0.11
7	-0.111	0.103	11.528	7	0.117
8	-0.167	0.103	14.164	8	0.078
9	-0.06	0.102	14.509	9	0.105
10	0.068	0.101	14.965	10	0.133
11	-0.023	0.101	15.019	11	0.182
12	0.058	0.1	15.355	12	0.223
13	-0.012	0.099	15.37	13	0.285
14	0.033	0.098	15.483	14	0.346
15	-0.012	0.098	15.498	15	0.416
16	-0.114	0.097	16.89	16	0.393
17	-0.02	0.096	16.932	17	0.459
18	-0.123	0.096	18.585	18	0.418
19	-0.106	0.095	19.827	19	0.405
20	-0.042	0.094	20.022	20	0.457
21	-0.045	0.093	20.25	21	0.505

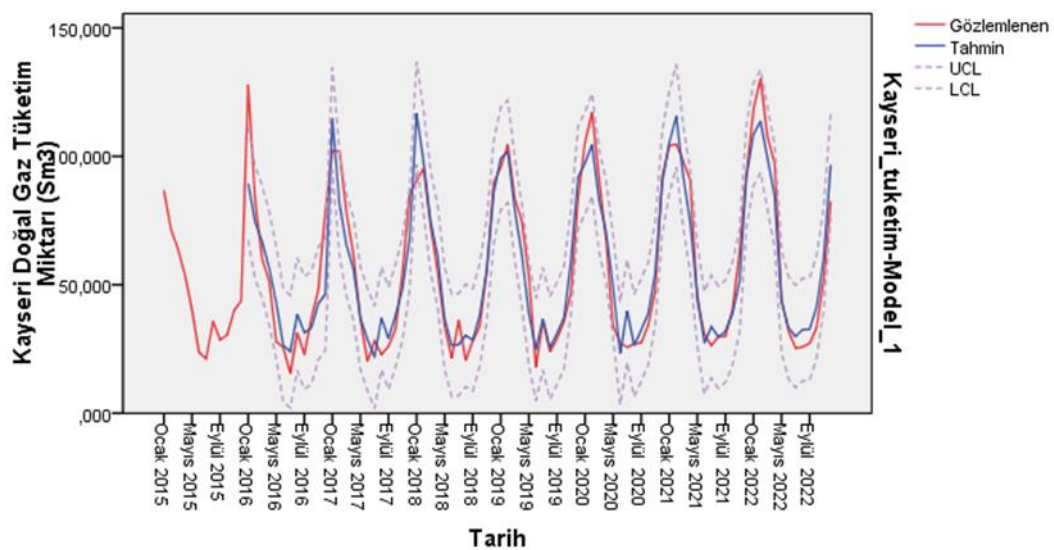
* sd: serbestlik derecesi

a. Varsayılan süreç bağımsız (beyaz gürültü).

b. Asimtotik ki-kare yaklaşımına dayalı.

Tabloda verilen Box-Ljung istatistiği p değerleri % 95 güven aralığında incelendiğinde tüm değerlerin 0.05 değerinden yüksek çıkmasından dolayı hataların rasgele bir davranış sergilediği ve beyaz gürültü olduğu sonucuna varılmaktadır.

Şekil 7'de gözlemlenen, SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli ile tahminlenen, tahminlenen değerlerin alt ve üst sınır değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi modelce tahminlenen değerler gerçekleşen değerleri bazı hata değerleriyle birlikte tahmin etmektedir ve gerçekleşen değerler, tahminlenen değerlerin alt-üst sınır aralıklarında yer almaktadır. Buradan hareketle gelecekteki değerlerin de bu sınırlar içerisinde yer alacağı söylenebilir.



Şekil 7. Gerçekleşen ve SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli ile tahminlenen değerler grafiği
(Actual and predicted values graph by the SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ model)

Bu analizler sonucunda modelin uygun olduğu, parametrelerinin anlamlı olduğu, hataların beyaz gürültü olduğu ve gelecekte gerçekleşecek değerlerin tahmin sınırları içerisinde yer alacağı söylenebilir. Analizlerde değerlendirilen 4 SARIMA modelinden SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ ve SARIMA(0,0,0)x(0,1,0)₁₂ modelleri uygun bulunmuş, bu modellerden de yukarıda detaylı analizleri verilen SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modeli Tablo 8’de verilen etkinlik ölçütlerine göre seçilmiştir. Model değerlendirmede en çok kullanılan ölçütlerden biri normalize Bayes bilgi kriteridir (*Norm BIC*). Bu ölçüt, model karmaşıklığını açıklamaya çalışan bir modelin genel uyumunun bir ölçüsüdür ve düşük olması beklenir. Tabloda verilen *Norm BIC* değerleri incelendiğinde SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modelinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Ayrıca bu model *MakMH* haricindeki diğer tüm hata etkinlik ölçütlerinde de daha iyi değer vermiştir ve SARIMA(0,0,0)x(0,1,0)₁₂ modelinin aksine *durağan R²* değeri negatif değil, pozitifdir.

Tablo 8. SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ ve SARIMA(0,0,0)x(0,1,0)₁₂ modelleri karşılaştırma tablosu (Comparison table of SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ and SARIMA(0,0,0)x(0,1,0)₁₂ models)

Model	R ²	Durağan R ²	OKHK	OMH	MakMH	Norm BIC
SARIMA(0,0,0)x(1,1,0) ₁₂	0.897	0.09	10.347	7.642	38.488	4.779
SARIMA(0,0,0)x(0,1,0) ₁₂	0.887	-2.60E-16	10.781	7.99	38.402	4.808

5.2. Gri tahmin yöntemi ile doğal gaz tüketim tahminlemesi (Natural gas consumption estimation with grey forecasting method)

Çalışmada birinci mertebeden tek değişkenli gri model olan GM(1,1) modeli ile tahminleme gerçekleştirilmiştir. Gri tahmin yönteminin uygulaması SPSS (26.0) paket programı ve Excel programından yararlanılarak yapılmıştır. Çalışmada Tablo 1’de sunulan 2015-2022 yılları arası aylık bazda gerçekleşen Kayseri ili doğal gaz tüketim miktarları kullanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği ve Şekil 1’de de gösterildiği üzere veri kümesi mevsimsel bileşen içermektedir. Yapılan analizler ve literatür taraması sonucu benzer çalışmalara bakıldığında, gri modellerin serideki trend bileşenini yakalayıp doğru sonuçlar üretebilirken, mevsimsel bileşeni yakalayamadığı, doğru sonuçlar üretmediği görülmüştür. Bu nedenle, öncelikle serideki mevsimsel bileşeni seriden arındırmak için SPSS paket programı üzerinde ayrıştırma yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıştırma yöntemlerinin hangisinin hangi tip seride daha etkin olduğunu tespit etmek adına herhangi bir ölçüt veya test olmaması nedeniyle hem toplamsal ayrıştırma hem de çarpımsal ayrıştırma yöntemlerinden faydalanılmıştır. Sonrasında toplamsal ayrıştırma ve çarpımsal ayrıştırma yöntemleriyle mevsimsel bileşenlerinden ayrılan serilere GM(1,1) modeli ayrı ayrı uygulanmıştır. Mevsimsel bileşenleri toplamsal ve çarpımsal ayrıştırma yöntemleriyle arındırılmış serilere GM(1,1) modeli uygulanarak edilen sonuçlar hata ölçütleri açısından karşılaştırılıp, uygun gri model belirlenmiştir. Toplamsal ve çarpımsal ayrıştırma kullanılarak elde edilen gri modellerin hata ölçütleri bakımından karşılaştırılması Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Toplamsal ve çarpımsal GM(1,1) modellerinin hata ölçütleri (Error measures of additive and multiplicative GM(1,1) models)

Yöntemler	OMYH	OMH	OKH	OKHK	R ²
Toplamsal GM(1,1)	14.5517984	6.869924	81.56573	9.031375	0.9141
Çarpımsal GM(1,1)	12.0785325	5.779011	70.29108	8.383978	0.926

Tablo incelendiğinde *OMYH*, *OMH*, *OKH*, *OKHK* etkinlik ölçüt değerlerinin en düşük olduğu ve *R²* değerinin en yüksek olduğu modelin çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli olduğu görülmektedir. Gelecek ayları tahminlemek için kullanılacak en iyi gri model çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modelidir. Model, SARIMA(0,0,0)(1,1,0)₁₂ modelinden daha iyi etkinlik ölçüt değerleri vermiştir. Çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli uygulama adımları aşağıda anlatılmıştır.

1. adım: $X^{(0)}$ serisi, SPSS paket programı kullanılarak çarpımsal ayrıştırma yöntemi ile mevsimsel bileşenden ayrıştırılan seridir.

$$X^{(0)}(k) = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)); n=96$$

Matris formu;

$$Y = \begin{bmatrix} 47,91507 \\ 38,58574 \\ 42,32089 \\ 43,22456 \\ 60,42961 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{şeklindedir.}$$

2.adım: $X^{(0)}$ serisine Birikim Oluşturma İşlemi (BÜİ) uygulanarak $X^{(1)}$ dizisi oluşturulmuştur.

$$X^{(1)}(k) = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)); n = 96$$

$$X(1) = \begin{bmatrix} 47,91507 \\ 86,50081 \\ 128,8217 \\ 172,04626 \\ 232,47587 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

3. Adım: $X^{(1)}$ dizisinden $Z^{(1)}$ serisi oluşturulmuştur.

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n))$$

$$Z^{(1)}(k) = 0.5 x^{(1)}(k) + 0.5 x^{(1)}(k-1) \quad k=2,3,\dots,96$$

$$Z(1) = \begin{bmatrix} -67,20794 \\ -107,661255 \\ -150,43398 \\ -202,261065 \\ -258,67341 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$Z^{(1)}$ matrisi B matrisine dönüştürülmüştür.

$$B = \begin{bmatrix} -67,20794 & 1 \\ -107,661255 & 1 \\ -150,43398 & 1 \\ -202,261065 & 1 \\ -258,67341 & 1 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

4.Adım: B matrisine devrik dönüşüm uygulanarak B^T matrisi elde edilmiştir.

$$B^T = \begin{bmatrix} -67,20794 & -107,661255 & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{bmatrix}$$

5.Adım: B^T matrisi ile B matrisi çarpılarak $B^T * B$ matrisi elde edilmiştir.

$$B^T * B = \begin{bmatrix} 853595934,8 & -244429,0616 \\ -244429,0616 & 95 \end{bmatrix}$$

6.Adım: Diziyi ters işlemi yapılarak $B^T * B^{-1}$ matrisi elde edilmiştir.

$$B^T * B^{-1} = \begin{bmatrix} 4,45047E - 09 & 1,14508E - 05 \\ 1,14508E - 05 & 0,039988477 \end{bmatrix}$$

7.Adım: $B^{T*}B^{-1*}$ matrisi ile B^T matrisi çarpılarak $B^{T*}B^{-1*} B^T$ matrisi elde edilmiştir.

$$B^T * B^{-1} * B^T = \begin{bmatrix} 1,11517E - 05 & 1,09716E - 05 & \dots \\ 0,039218893 & 0,038755671 & \dots \end{bmatrix}$$

8.Adım: $B^{T*}B^{-1*} B^T$ matrisi ile Y matrisi çarpılarak $B^{T*}B^{-1*} B^T * Y$ matrisi elde edilmiştir.

$$B^T * B^{-1} * B^T * Y = \begin{bmatrix} -0,003053982 \\ 48,02203866 \end{bmatrix}$$

$$a = -0,003053982$$

$$b = 48,02203866$$

$$\frac{b}{a} = 15724,40022$$

9.Adım: a ve b değerleri kullanılarak gri model oluşturulmuştur.

$$\left[\begin{matrix} \wedge(1) \\ x_p \end{matrix} (k+1) = x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a}$$

Bu eşitlik ile elde edilen E matrisi;

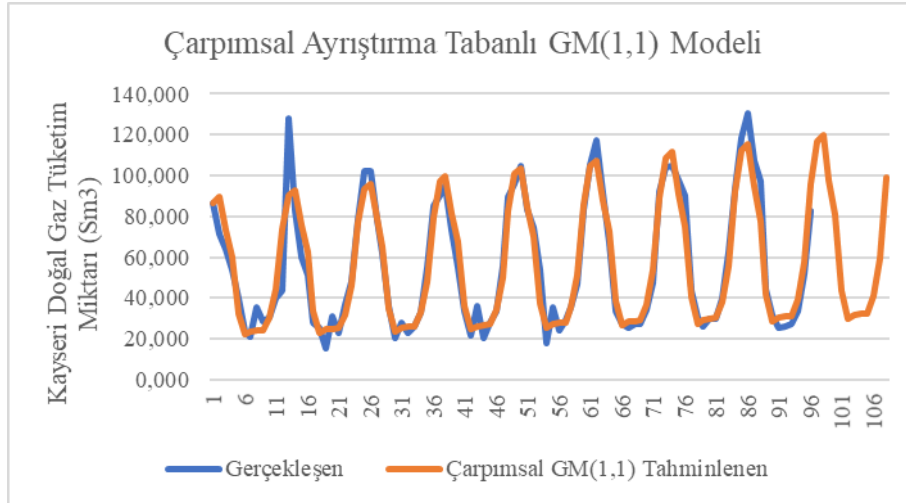
$$E = \begin{bmatrix} 47,91507 \\ 96,15706804 \\ 144,5466215 \\ 193,0841816 \\ 241,7702012 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

10.Adım: F matrisi elde edilmiştir.

$$F = \begin{bmatrix} 47,91507 \\ 48,24199804 \\ 48,38955344 \\ 48,53756017 \\ 48,68601959 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

11.Adım: F matrisi (GM(1,1) modeli tahminleri) ile SPSS programında çarpımsal ayrıştırma yöntemi ile elde edilen mevsimsel endeks değerleri çarpılarak mevsimselliği dikkate alan tahmin değerleri bulunmuştur.

Çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modelinin gerçekleşen ve tahmin değerleri grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tahminler gerçekleşen değerleri izlemektedir ve mevsimsel davranışı çok iyi düzeyde yakalamıştır. Çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli ile 0.926 R^2 değerleri elde edilmiştir. Elde edilen R^2 değeri oldukça 1'e yakındır ve SARIMA(0,0,0)(1,1,0)₁₂ modelinden elde edilen 0.897 değerinden daha yüksektir. Tablo 9'da sunulan OKHK ve OMH hata etkinlik ölçütlerinde de SARIMA(0,0,0)(1,1,0)₁₂ modelinden daha iyi yani daha düşük değerler elde edilmiştir.

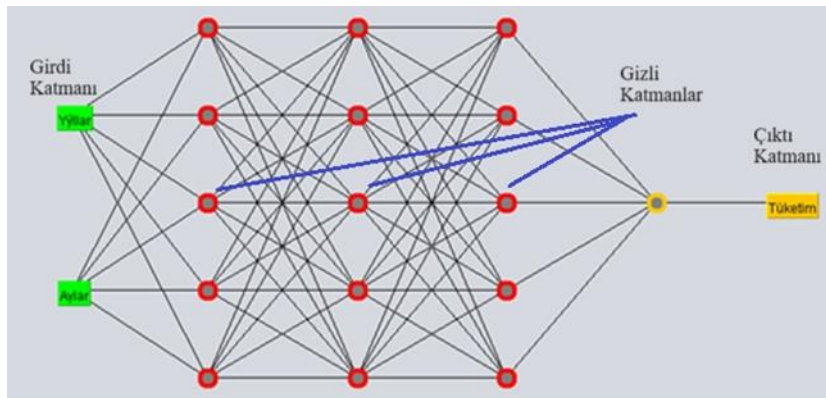


Şekil 8. Çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modelinin gerçekleşen ve tahmin değerleri grafiği
(Actual and forecast values graph of multiplicative decomposition based GM(1,1) model)

5.3. Yapay sinir ağları yöntemi ile doğal gaz tüketim tahminlemesi (Natural gas consumption estimation with artificial neural networks)

YSA yöntemi uygulaması, WEKA paket programı 3.9.0 versiyonu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapay sinir ağlarında tahminleme amacıyla Kayseri ili doğalgaz tüketim değerleri çıktı değişkeni olarak, yıl ve ay bilgileri ise girdi değişkenleri olarak ele alınmıştır. YSA modeli olarak sınıflandırma ve tahminlemede oldukça başarılı sonuçlar veren çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) (Multilayer Perceptron -MLP) yöntemi kullanılmıştır. Yapay sinir ağ parametrelerini ve ağ mimarisini belirlemek için etkin bir yöntem olmadığı için pek çok farklı çok katmanlı algılayıcı modeli denenmiş, denemeler neticesinde sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılarak, 3 gizli katman ve her katmanda 5 nöron olan ağ yapısı en iyi sonucu vermiştir. Veri eğitim ve test kümelerine ayrılırken %66-34 oranı kullanılmıştır. Bu doğrultuda verinin %66'sı modelin öğrenmesi için kullanılırken, kalan %34'lük kısmı ağı test edilmesi için kullanılmıştır. Model 500 iterasyon (epoch) çalıştırılmıştır.

Önerilen ağ mimarisinde giriş katmanında girdi niteliklerini ifade eden 2 nöron, her birinde 5'er adet nöron bulunan 3 gizli katman ve tüketim miktarı sürekli çıktı değişkenini ifade eden tek nöronlu çıkış katmanı bulunmaktadır. Önerilen ÇKA mimarisi Şekil 9'da gösterilmiştir.

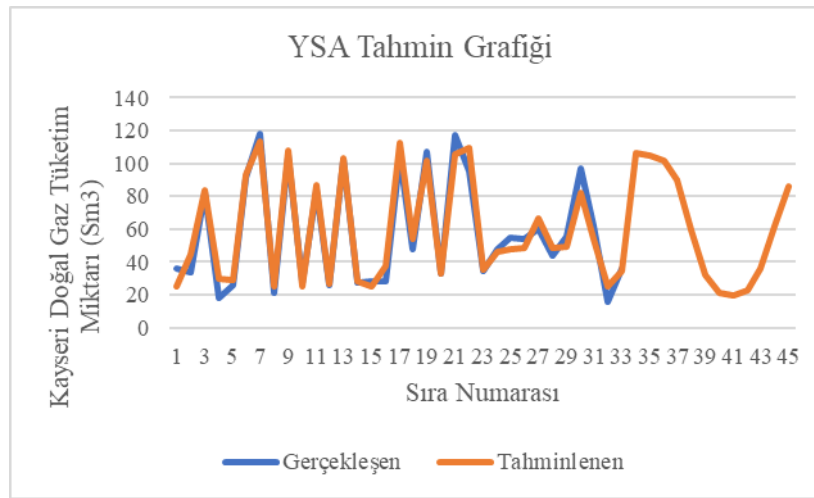


Şekil 9. Önerilen ÇKA Yapısı
(Proposed MLP Structure)

Önerilen ÇKA modeli, test kümesinde 0.9773 korelasyon katsayısı (R) değerine sahiptir, bu da değişkenler arasında pozitif yönlü yüksek düzeyde ilişki olduğunu ifade etmektedir. Model test kümesi üzerinde 5.5895 OMH , 6.9347 $OKHK$, % 20.1228 göreceli mutlak hata ve % 21.1757 göreceli kareli hata kökü değeri üretmiştir.

ÇKA modelinin etkinliğini artırmak adına modele yıl ve ay girdi değişkenlerinin yanı sıra veride aylık bazda mevsimsellik gözlemlendiğinden, sırayla geçmiş yılın aynı ayına ait veri (model1), geçmiş iki yılın aynı ayına ait veri (model2) ve geçmiş üç yılın aynı ayına ait veriler (model3) de girdi değişkeni olarak eklenmiştir. ÇKA modelinde sigmoid aktivasyon fonksiyonu, 3 gizli katman ve her katmanda 5 nöron olan bir yapı kullanılmıştır. Test kümesi üzerinde Model1 ile 0.9272 *R*, 18.6229 *OMH*, 20.3607 *OKHK*, % 59.4784 görel mutlak hata ve % 56,6518 görel kareli hata kökü değeri elde edilmiştir. Model2 ile 0.9548 *R* değeri, 7.8446 *OMH*, 9.9887 *OKHK*, % 28.7769 görel mutlak hata ve % 31.5288 görel kareli hata kökü değerleri; model3 ile ise 0.9546 *R*, 9.2057 *OMH*, 11.6586 *OKHK*, % 29.799 görel mutlak hata ve % 35.662 görel mutlak hata kökü değerleri üretilmiştir. Ancak elde edilen bu sonuçlardan da görüldüğü gibi, geçmiş mevsimsel verilerin kullanımının yapay sinir ağının etkinliği üzerinde olumlu bir etkisi olmamıştır. Dolayısıyla girdi değişkeni olarak sadece yıl ve ayın kullanıldığı veri üzerinde elde edilen sonuçlar YSA'nın diğer yöntemlerle değerlendirilmesi aşamasında ele alınmıştır.

ÇKA modeli ile elde edilen sonuçların diğer yöntemlerle eşit şartlar altında karşılaştırılabilmesi için ÇKA modeli ile bütün veriler üzerinde elde edilen etkinlik ölçütleri de hesaplanmıştır. Bütün veriler üzerinde ÇKA ile 7.0642 *OMH* değeri, 85.1353 *OKH* değeri, 9.2269 *OKHK* değeri, 15.167 *OMH* değeri ve 0.91 *R*² değeri elde edilmiştir. ÇKA ile elde edilen tahminler ve gerçekleşen doğal gaz tüketim değerleri grafiği Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Gerçekleşen ve Tahminlenen Doğal Gaz Tüketim Değerleri Grafiği
(Observed and Forecasted Natural Gas Consumption Values Chart)

5.4. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

Tablo 10, ARIMA modelleri, gri tahmin yöntemi ve yapay sinir ağları yöntemleri uygulanarak elde edilen Kayseri ili doğal gaz tüketimi tahmin sonuçlarının çeşitli performans ölçütleri açısından karşılaştırmasını göstermektedir. Tablo incelendiğinde en düşük *OMYH*, *OMH*, *OKH*, *OKHK* değerlerine ve en yüksek *R*² değerlerine sahip olan çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) yönteminin tahminlemede kullanılabilir en uygun yöntem olduğu görülmektedir. Çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modelini sırasıyla toplamsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) yöntemi, YSA ve SARIMA modeli izlemektedir.

Tablo 10. Uygulanan yöntemlerin performans ölçütleri açısından karşılaştırması (Comparison of applied methods in terms of performance measures)

Hata Ölçütleri/Yöntemler	Toplamsal GM(1,1)	Çarpımsal GM(1,1)	SARIMA (0,0,0)(1,1,0) ₁₂	YSA
OMYH	14.5518	12.0785	15.941	15.167
OMH	6.8699	5.779	7.642	7.0642
OKH	81.5657	70.2911	107.0604	85.1353
OKHK	9.0314	8.384	10.347	9.2269
R ²	0.9141	0.926	0.897	0.9104

Kayseri ili doğal gaz tüketimi aylık tahmini için en uygun yöntem olarak çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) yöntemi belirlendikten sonra, yöntem ile 2023 yılının 12 ayı için Kayseri ilinin doğal gaz tüketim tahmini yapılmıştır. Çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli ile geleceğe yönelik tahmin değerleri Tablo 11'deki gibidir.

Tablo 11. 2023 Yılı Kayseri İli için Doğal Gaz Tüketimi Tahmin Değerleri (Forecast Values of Natural Gas Consumption for Kayseri Province in 2023)

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran
Tüketim (milyon Sm ³)	116.701	119.849	98.047	80.844	43.411	29.59
Aylar	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Tüketim (milyon Sm ³)	31.661	32.181	32.551	40.921	59.667	99.239

6. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmada 2015-2022 yılları arasında aylık olarak gerçekleşen toplamda 96 aylık Kayseri iline ait doğal gaz tüketim verisi kullanılmış olup, 2023 yılı için tüketim tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahminleme yöntemleri olarak literatürde de büyük ölçüde kabul gören Box-Jenkins, Gri Tahminleme ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri kullanılmıştır. Tahminleme uygulamalarını yapmak ve analizleri gerçekleştirmek üzere SPSS istatistiksel yazılım, EXCEL ve WEKA makine öğrenimi paket programlarından faydalanılmıştır.

Tahminlemede ilk olarak Box-Jenkins yöntemi uygulanmıştır. Yöntem uygulanmadan önce doğal gaz tüketim serisinin davranışı incelenmiştir. Serinin mevsimsellik içermesi sebebiyle veriye mevsimsel fark alma işlemi uygulanarak durağanlık sağlanmıştır. Kullanılacak modeller için parametre tahmini yapılmıştır. Ardından dört alternatif modelin anlamlılıkları ve uygunlukları test edilmiştir ve model çıktıları başarı kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak ele alınan Box-Jenkins modellerinden SARIMA(0,0,0)x(1,1,0)₁₂ modelinin öngörü işlemi için en uygun model olduğu belirlenmiştir.

Kayseri doğal gaz tüketimi tahmininde ikinci olarak gri tahmin uygulanmıştır. Yapılan analizler ve literatür araştırması sonucunda gri tahmin yönteminin mevsimsellik içeren verilerde iyi sonuçlar vermediği anlaşılmıştır. Bu nedenle seri önce ayrıştırma yöntemleriyle mevsimsel bileşenden arındırılıp, daha sonra gri tahmin aşamasına geçilmiştir. Toplamsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli ve çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli olmak üzere iki gri model üzerinden tahminleme gerçekleştirilmiştir. Modeller hata ölçütleri açısından değerlendirilmiş ve ele alınan iki model arasından en iyi modelin çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) modeli olduğu belirlenmiştir.

Tahminlemede son yöntem olarak yapay sinir ağları (ÇKA) kullanılmıştır. Weka paket programında gerçekleştirilen analizler neticesinde yapay sinir ağlarının iyi bir çözüm sunduğu görülmüştür. Uygulamanın son aşamasında kullanılan üç yöntem *OMH*, *OKH*, *OKHK*, *OMYH* ve R^2 hata ölçütleri bakımından karşılaştırılmış, 0,926 R^2 değeri ile en başarılı sonucu veren çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) yönteminin tahminleme için en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. Uygulamanın son aşamasında çarpımsal ayrıştırma tabanlı GM(1,1) yöntemi ile 2023 yılı için Kayseri ili aylık doğal gaz tüketim tahminlemesi yapılmıştır.

Bu çalışma ayrıştırma tabanlı gri tahmin yönteminin tahminleme yapmak üzere yöneticilerin ve uzmanların tercih edebileceği bir yöntem olduğunu verdiği başarılı sonuçla ortaya koymaktadır. Ele alınan diğer yöntemler de tahmin için uygun yöntemlerdir, ancak en uygun değildir. Gelecek çalışmalarda veri boyutu artırılarak daha da etkin tahminleme çalışmaları yapılabilir. Bu çalışmadan yola çıkılarak aynı zamanda Kayseri veya diğer illere yönelik sanayi, konut tüketimi gibi detaylı sektörel bazda enerji tüketimi tahminlemeleri de gerçekleştirilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Vikipedi, [Online]. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Doğalgaz> [Erişim Tarihi: 18 Mart 2023].
- [2] M. Aydın, "Denizli ili için doğal gaz tüketim analizi ve tahmini," Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İşletme Ana Bilim Dalı Sayısal Yöntemler Programı, Denizli, Türkiye, 2022.
- [3] H. Aras, N. Aras, "Eskişehir'de konutsal doğal gaz talebine ekonomik göstergelerin ve dış ortam sıcaklığının etkileri," *Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 46., sayı 540, ss. 20- 27, 2005.
- [4] N. Kaya, "Zaman serilerine dayalı tahmin yöntemleri ile Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları talebinin tahmini," Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, Türkiye, 2005.
- [5] Y. Çuhadar, P. Güngör ve Y. Gökso, "Turizm talebinin yapay sinir ağları ile tahmini ve zaman serisi yöntemleri ile karşılaştırmalı analizi: Antalya iline yönelik bir uygulama," *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 14, sayı 1, ss. 99-114, 2009. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sduiibfd/issue/20831/223138>
- [6] O. Kaynar, S. Taştan, ve F. Demirkoparan, "Yapay sinir ağları ile doğalgaz tüketim tahmini," *Atatürk Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, cilt 25, 2011.
- [7] M. Kırçıl, "Box- Jenkins yöntemi ile konut doğal gaz talebinin tahminlenmesi: İzmir ili örneği" Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, Türkiye, 2013.
- [8] K. Oruç, ve Ş. Çelik, "Isparta ili için doğal gaz talep tahmini," *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 22, sayı 1, ss. 31-42. 2016.
- [9] H. Ekmekçi, "Türkiye'deki doğal gaz kullanımının ARIMA metodu ile istatistiksel analizi," Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, Türkiye, 2016.
- [10] T. Eren, "Doğal gaz tüketim planlamasında gri tahmin yöntemi ve Türkiye uygulaması," İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [11] S. Singh, and A. Yassine, "Big data mining of energy time series for behavioral analytics and energy consumption forecasting," *Energies*, vol. 11, no. 2, 452, 2018. doi:10.3390/en11020452
- [12] B. Taşkuner, "Ankara ili doğal gaz tüketiminin yapay sinir ağları ile öngörüsü," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, 67, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [13] T. Akman, C. Yılmaz, ve Y. Sönmez, "Elektrik yükü tahmin yöntemlerinin analizi," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 4, sayı 3, ss. 168-175, 2018. doi:10.30855/GJES.2018.04.03.003
- [14] M. H. Calp, "İşletmeler için personel yemek talep miktarının yapay sinir ağları kullanılarak tahmin edilmesi," *Politeknik Dergisi*, cilt 22, sayı 3, ss. 675-686, 2019. doi:10.2339/politeknik.444380
- [15] O. E. Erdem, "Makine öğrenme teknikleri ile Türkiye'nin doğalgaz enerji tüketiminin tahminlenmesi," Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya, Türkiye, 2019.
- [16] Ç. Tuna, "Doğal gaz talep tahmini: Erzurum ili üzerine bir uygulama," Erzurum Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, Türkiye, 2019.
- [17] M. Akpınar, ve N. Yumuşak, "Günlük temelli orta vadeli şehir doğal gaz talebinin tek değişkenli istatistik teknikleri ile tahmini," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 35, sayı 2, ss. 725-742, 2020. doi: 10.17341/gazimmfd.494094
- [18] K., Oruç, ve A. Başağaoğlu Fındık, "Gri tahminleme ile Süleyman Demirel Üniversitesi Ağız Dış Sağlığı Merkezi'nde yatan hasta sayılarının tahmini," *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, cilt 37, ss. 193-212, 2020.
- [19] V. Demir, ve A. Ü. Keskin, "Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Yükseklik Modellemesi Samsun-Mert Irmağı Havzası Örneği," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 6, sayı 1, ss. 54-61, 2020. doi:10.30855/gmbd.2020.01.05

- [20] S. Sayım, ve V. Ömürbek, "Gri tahmin GM (1, 1) modeli ile bir büyükşehir belediyesinde gelir tahmini," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 8, sayı 3, ss. 1782-1805, 2021. doi:10.30798/makuiibf978524
- [21] Ü. B. Köse, "Yapay sinir ağları ve gri model ile döviz kuru tahmini," Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sayısal Yöntemler Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2021.
- [22] W. Panek, and T. Włodek, "Natural gas consumption forecasting based on the variability of external meteorological factors using machine learning algorithms," *Energies*, vol. 15, 348, 2022. doi:10.3390/en15010348
- [23] M. H. Safiyari, S. Shavvalpour, and S. Tarighi, "From traditional to modern methods: comparing and introducing the most powerful model for forecasting the residential natural gas demand," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 14699-14715, 2022. doi:10.1016/j.egy.2022.10.397
- [24] O. Çevik, "Zaman serileri analizinde Box-Jenkins Yöntemi ve turizm verileri üzerine bir uygulama," Kırıkkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Kırıkkale, Türkiye, 1999.
- [25] Ö. Duru, "Zaman serileri analizinde arıma modelleri ve bir uygulama," İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ekonomi Bölümü Ekonometri Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [26] H. Yılmaz, "Türkiye'deki seragazi emisyon envanterinin geliştirilen gri tahmin yöntemi ile incelenmesi ve bir uygulama," Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, Türkiye, 2013.
- [27] B. Akın, "Yapay sinir ağlarıyla Konya bölgesinde kullanıcı doğal gaz tüketim öngörüsü," İstanbul Teknik Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [28] B. Saltürk, "Yapay sinir ağları ile ürün satış miktarlarının tahmini: Mobilya sektöründe bir uygulama," Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği, Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans tezi, Sakarya, Türkiye, 2022.
- [29] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Doğal gaz aylık sektör raporları, [Online]. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-95-1007/dogal-gazaylik-sektor-raporu> [Erişim Tarihi: 20 Nisan 2023].

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Development of an Automatic PV-Battery Powered Water Irrigation System with Arduino Software for Agricultural Activities

Theodore Azemtsop Manfo^{a,b}, Mustafa Ergin Şahin^b

Submitted: 28.03.2024 Revised: 16.07.2024 Accepted: 17.07.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A07

ABSTRACT

Irrigation is the artificial application of water to soil through tubes, pumps, and sprays, used when natural sources and rain are insufficient, irregular, dry, or drought-prone areas. This study proposes a drip irrigation-based solar-powered system for home grown plants and greenhouse gardens, utilizing solar energy for electricity consumption. The system is highly efficient for providing water and nutrients to crops, ensuring optimal growth, and conserving resources like water, fertilizers, energy, and crop protection products. A water tank uses an Arduino ATmega328 microprocessor to detect plant moisture levels and supply water to plants through a water motor and sensor. The system employs drip irrigation to pump water through pipes using a DC motor. The automated irrigation system utilizes a boost DC-DC switching converter, to step up input voltage and increase the output voltage, enabling remote monitoring of humidity, water, and energy consumption in flowerpots. The converter achieves significant step-up voltage gain with a suitable duty ratio and minimal voltage stress on the power switches. It is an off-grid automatic control system that operates independently of human intervention. The system utilizes a boost converter to indirectly optimize the power of two series-connected PV cells, increasing overall efficiency.

Keywords: Irrigation system, Energy efficiency, DC-DC boost converter, Automatic Control, Solar cell, PV, MATLAB/Simulink

^aUniversity of Vaasa,
School of Technology and
Innovations, Dept. of Electrical
Engineering,
65200 Vaasa, Finland
Orcid: 0000-0002-9043-3111

^bRecep Tayyip Erdoğan University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Electrical and Electronics
Engineering, 53100 Rize, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5121-6173

*Corresponding author:
azemsouleymane@yahoo.fr

Tarımsal Faaliyetlere Yönelik Arduino Yazılımı ile Otomatik PV ve Akü ile Beslenen Su Sulama Sisteminin Geliştirilmesi

ÖZ

Sulama, doğal kaynakların ve yağmurun yetersiz olduğu, düzensiz, kuru veya kuraklığa yatkın bölgelerde kullanılan suyun tüpler, pompalar ve spreylere aracılığıyla toprağa yapay olarak uygulanmasıdır. Bu çalışma, evde yetiştirilen bitkiler ve sera bahçeleri için elektrik tüketimi için güneş enerjisinden yararlanan, damla sulama bazlı güneş enerjisiyle çalışan bir sistem önermektedir. Sistem, mahsullere su ve besin sağlamak, optimum büyümeyi sağlamak ve su, gübre, enerji ve bitki koruma ürünleri gibi kaynakları korumak için oldukça verimlidir. Bir su deposu, bitki nem seviyelerini tespit etmek ve bir su motoru ve sensör aracılığıyla bitkilere su sağlamak için bir Arduino ATmega328 mikroişlemcisini kullanmaktadır. Sistem, bir DC motor kullanarak borulardan su pompalamak için damlama sulama yöntemini kullanmaktadır. Otomatik sulama sistemi, giriş voltajını yükseltmek ve çıkış voltajını artırmak için bir DC-DC anahtarlama dönüştürücüsünü kullanır ve saksılardaki nem, su ve enerji tüketiminin uzaktan izlenmesine olanak tanır. Dönüştürücü, uygun bir görev oranı ve güç anahtarları üzerindeki minimum voltaj stresi ile önemli miktarda artan voltaj kazancı elde etmektedir. Şebekeden bağımsız, insan müdahalesinden bağımsız çalışan otomatik kontrol sistemidir. Sistem, seri bağlı iki PV hücresinin gücünü dolaylı olarak optimize etmek ve genel verimliliği artırmak için bir destek dönüştürücü kullanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sulama sistemi, Enerji verimliliği, DC-DC yükseltici dönüştürücü, Otomatik kontrol, Güneş pili, PV, MATLAB/Simulink

1. Introduction

Irrigation is the artificial application of water to the soil using various technologies such as pumps, tubes, and sprays. Irrigation is usually necessary in locations with irregular rainfall, during dry spells, or where dehydration is widespread [1]. Water for irrigation comes from various sources, including underground water from wells or springs, surface water from lakes and rivers, and water from other sources, such as treated wastewater or desalinated seawater [2]. There are two sorts of current irrigation techniques: traditional irrigation methodologies and intelligent irrigation methodologies. Traditional irrigation systems include surface, drip, and sprinkler irrigation [3]. Irrigation planning takes into account when and how much water should be applied to plants [4]. The management practices with the greatest impact are determined by the kind and design of the irrigation system. Several well-known challenges impact how far the irrigation system succeeds, such as determining when to irrigate the land, the appropriate amount of water, and the ability to improve efficiency [5].

Energy supply is a critical component in the growth of any society [6-8]. Today, the fast-expanding energy demand needs a restricted usage of fossil fuels [9]. The sun, our everlasting power source, continues to heat and illuminate our world on the other side [10]. Solar energy is a popular and cost-effective renewable energy source. The amount of energy produced by solar cells is significantly influenced by weather and solar radiation [11]. Renewable energy sources and their application have become increasingly vital to humanity over the last few decades [12]. Photovoltaic generating, among renewable energies, is a particularly promising technology for electrical energy production because of its environmentally favorable and flexible operation [13]. Many architects, designers, and manufacturers throughout the world are looking into photovoltaics (PV) as a long-term energy source [14]. The smart irrigation system is made up of several technologies, including battery and sensor, automatic control, and computer technology. Researchers are paying a lot of attention to the rapid development of Li-ion battery technology [15]. Sustainable energy sources fluctuate throughout the day, necessitating the use of suitable energy storage technology like batteries for electricity production [16]. Conventional energy storage systems like batteries face challenges like drowsy charging and limited lifespan [17]. PV systems use batteries to store excess energy, a growing concern due to increasing energy consumption [18]. Automation and control systems are crucial for facilitating lives. Water needs for plants are influenced by factors like rain, temperature, and wind, making efficient use of agricultural water increasingly important [19].

Proper irrigation systems in agriculture are essential for yield and water scarcity, with traditional drip irrigation reducing soil humidity stress but applying undetermined amounts of water. Occasionally, an excessive amount of water is continuously delivered to the crop, and sometimes too little water is given to the crop, defeating the system's purpose [20]. One main reason for this is the wasteful waste of water in agricultural areas due to farmers' lack of knowledge about a sufficient supply of water [21]. Many plants are extremely sensitive to water levels and require a precise level of water supply for healthy growth; if this is not met, they may die or grow improperly. Stock farming is an integral part of Turkish agriculture and many farmers are interested in earning money with meat, milk, and wool [22]. A large proportion of freshwater resources are used for agricultural irrigation, both in Türkiye and around the world [23]. In total, 280 million hectares of agricultural land are irrigated, which represents 19% of all agricultural land in the world [24]. Developing countries' agriculture economy faces underutilization due to erratic water use, necessitating the implementation of automatic irrigation systems despite modern techniques like drip and sprinkler irrigation. Many strategies used in autonomous irrigation systems are detailed in the literature [25-27]. A microcontroller-based system automates irrigation for small potted plants, improving efficiency and reducing manual intervention in agriculture during scarce water. A system was developed that detects temperature and humidity changes in the environment using sensors and controls the pump via a signal sent by the microcontroller [28]. The planned system was reported to be cost-effective and enabled farmers to irrigate overnight without the need for physical presence. Taneja and Bhatia created a new autonomous watering system to save water by combining sensor technology with Arduino [29]. The irrigation network employs a

dual-tone multi-frequency signaling (DTMF) management system, enabling precise irrigation, spraying, and parameters via phone commands, minimizing user-requested cessation. A DTMF decoder and controlling circuit decodes and controls the on-off mode of the associated electrical motor pump [30]. The study examines the use of photovoltaic-assisted pumping elements in agricultural regions, analyzing water movement based on dynamic heights and variable water values. As a result of the design, a lifetime cost analysis for the required height and water amount is performed [31].

Research suggests an embedded technology for remote greenhouse inspection, offering a low-cost online greenhouse automation design. The temperature and soil moisture levels in a greenhouse region are measured using a real-time greenhouse automation system, the design variables are checked against the recorded values, and the collected data is transferred to an embedded web interface for users to view [32].

The automation systems used in greenhouses can be analyzed in two sections; namely, climate control and the automation of irrigation-fertilization. These systems cover expert systems that generally involve backwards-feeding or forward-feeding methods [33]. In backward-feeding systems, after the variable is perceived, the control system is activated while in forward-feeding systems the tendency of change of the variable is predicted initially and after that, the control system reacts to the relevant tendency [34-36]. All these processes are conducted by a computer unit which is the brain of the automation where the relevant programs are loaded.

Barkunan et al. transformed a drip irrigation system into a smart system using a microcontroller, GSM, sensors, motor, and telephone module, resulting in 41.43% savings compared to the drip irrigation system [37]. The study by Küçüksayan analyzes the variation in irrigation applications across different landscape regions in Ankara district. It reveals that design, construction, scheme, and maintenance methods vary based on the installation, system, and planning. The chosen irrigation design can enhance water usage and prolong the life of green parts [38].

The smart irrigation system, as depicted in Figure 1, integrates data acquisition, control, wireless communication, processing, and problem detection, all of which can be integrated into IoT devices.

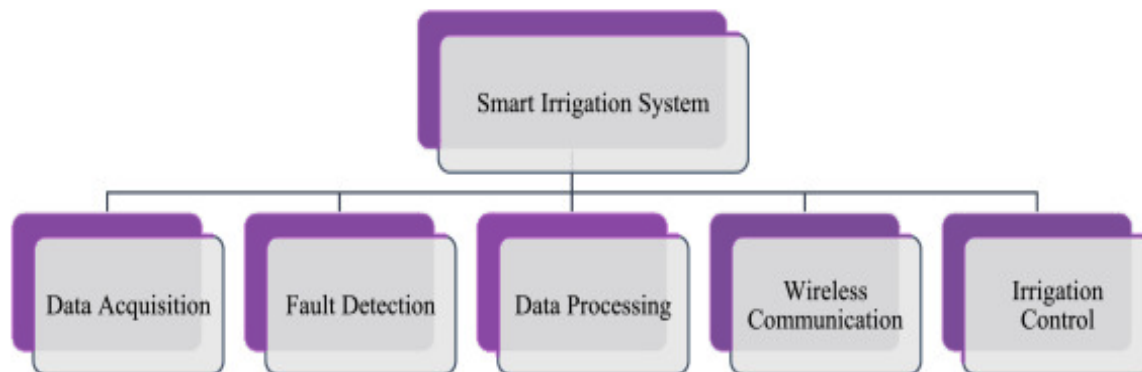


Figure 1. Smart irrigation system components [39].

This technology can be adopted on a wide scale for farming reasons, making it much more beneficial. Due to current conditions and water scarcity, optimal irrigation schedules should be devised, particularly in farms, to conserve water.

The main idea is to design a cost-effective irrigation system that uses less electrical energy and water which can be used for the growth of various crops compared to other systems, such as the sprinkler irrigation studied by Yavuz et al. [40], which requires significant energy consumption. A previous study also found that the irrigation system consumed 76% of the total energy input in alfalfa production [41]. Water application methods that use ancient groundwater resources and groundwater extraction were mentioned as reasons for the high consumption of electrical energy in the study region [41]. Furthermore, Khan et al. [42] examined

energy inputs under different irrigation systems in Australia for the production of wheat, rice, and barley. To reduce the environmental footprint of water and energy inputs, the authors recommend improving energy efficiency and water productivity of crop production.

This work presents an automatic irrigation system that will save more electricity, and water, and increase the yield of the plant automatically compared to aforementioned systems. The system is tested using solar panel electricity that improves its outputs, controls the water supply, reduces employee workload, and addresses soil conditions. The Arduino platform controls a water motor and humidity sensor, ensuring optimal operation for plant maintenance. The ATmega328 microprocessor detects moisture levels, allowing water to be pumped. The Arduino triggers when soil moisture decreases, implementing a drip irrigation method. This smart automated drip irrigation system offers a more practical and economical method to uniformly distribute water to plants at small and/or large-scale surface areas while saving water and energy. The automated irrigation system compared to other systems is designed for various plants including vegetables and many fruits and was tested on agricultural land. The system uses energy from PV solar cells and a battery to reduce water consumption and improve plant productivity. It features durable Epoxy solar panels, thermal management products, a DC/DC power converter, a Micro DC 3-6V Submersible Pump, and a humidity sensor for measuring soil moisture. The drip irrigation method uses a DC motor to pump water through pipes, detects soil moisture, and processes data using a microcontroller. The motor is automatically started based on sensor data. The automated system is designed for various plants including vegetables and fruits, and was tested on agricultural land. The controllers can be programmed to open the valves and begin irrigation when the volumetric water content reaches a predetermined threshold. The suitable threshold value varies by soil and vegetation type and ranges from 10 to 40%. The hybrid irrigation system was found to be environmentally friendly and suitable for use in areas without electricity, as the energy was met by the 3 V PV cells combined with a relay with a 6 V, 2 Ah Lithium-ion battery. This innovative approach to irrigation has the potential to revolutionize agricultural practices. It was found that the developed automation-based irrigation system could prevent human errors while saving labor and time. The studies also have proven this hybrid system of irrigation improved product yield and quality. The smart irrigation systems integrates PV-Battery to improve water-use efficiency for sustainable agriculture. It describes how Arduino UNO and sensory systems efficiently monitor soil conditions, optimize irrigation, and save water using various sensors. The article highlights the importance of modernizing agricultural techniques, presenting a user-friendly automated irrigation system that enhances efficiency, data collection, and resource conservation by automating tasks like watering and temperature control. First, it is a multidisciplinary study involving Agriculture, Software Engineering, and Electronic Engineering. Furthermore, this is an automatic control system that operates independently of the grid and functions without human intervention. By using a boost converter, it regulates the power of two series of PV cells indirectly at the maximum power point to enhance the efficiency of this system.

2. Materials and Method

2.1. Process description

The setup of the automatic irrigation system was designed as shown in Figure 4 and the elements are explained in the following sections. Solar panels supply the necessary electrical energy for the self-contained irrigation system. The drip irrigation method is designed to implement the irrigation process by pumping the water in the tank through the pipes using a DC motor. The system detects soil moisture and processes the data acquired by the sensor using a microcontroller, and the process is carried out by turning the DC motor on and off for a certain amount of time. The irrigation operation is started automatically by starting the motor based on data from the soil moisture sensor. When the volume of water reaches a set level, the engine is turned off, and the watering cycle is repeated at certain humidity intervals. The water level sensor controls the amount of water in the tank. When the tank's water level reaches a predetermined level, a network-connected solenoid valve opens, allowing the filling process to commence. When the tank's water level reaches a preset level, the valve

is closed by sensing the water level sensor. The automatic irrigation system consists of a soil moisture sensor, an Arduino Uno, a solar panel, a charge management circuit, a DC motor, a solenoid valve, and a water level sensor. This study aims to meet the electricity needs of the system with the help of solar panels. The specifications of the PV panel, Submersible Mini DC Water Pump, and Soil Moisture Sensor are given in Table 1.

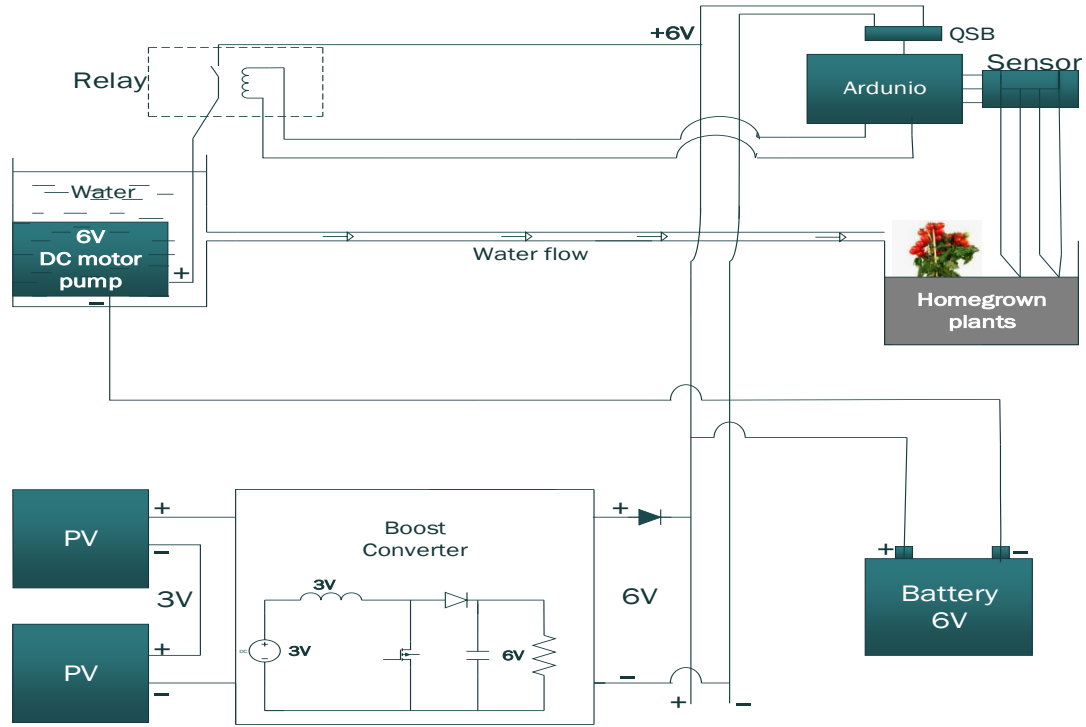
The soil moisture sensor for Arduino is a compact, user-friendly sensor that measures soil moisture using two probes. It is designed for Arduino microcontroller boards, allowing easy connection to an analog or digital input pin for programming purposes. Probes that measure humidity values are immersed in the soil to be measured during the measurement process. The sensor's reading indicates soil type, with values above 1000 indicating detached or uninhabitable soil, below 600 indicating dry or humid soil, and below 370 indicating water presence. This irrigation system based on soil moisture was developed to be used for different plants such as tomatoes, peanuts, soybeans, Strawberries, Chilli, Capsicum, Cabbage, Cauliflower, Onion, Okra, Brinjal, Bitter Gourd, Ridge Gourd, Cucumber, Peas, Spinach, and pumpkin.

Table 1. The specifications of the PV panel, mini DC water pump, soil moisture sensor, and DC-DC boost converter

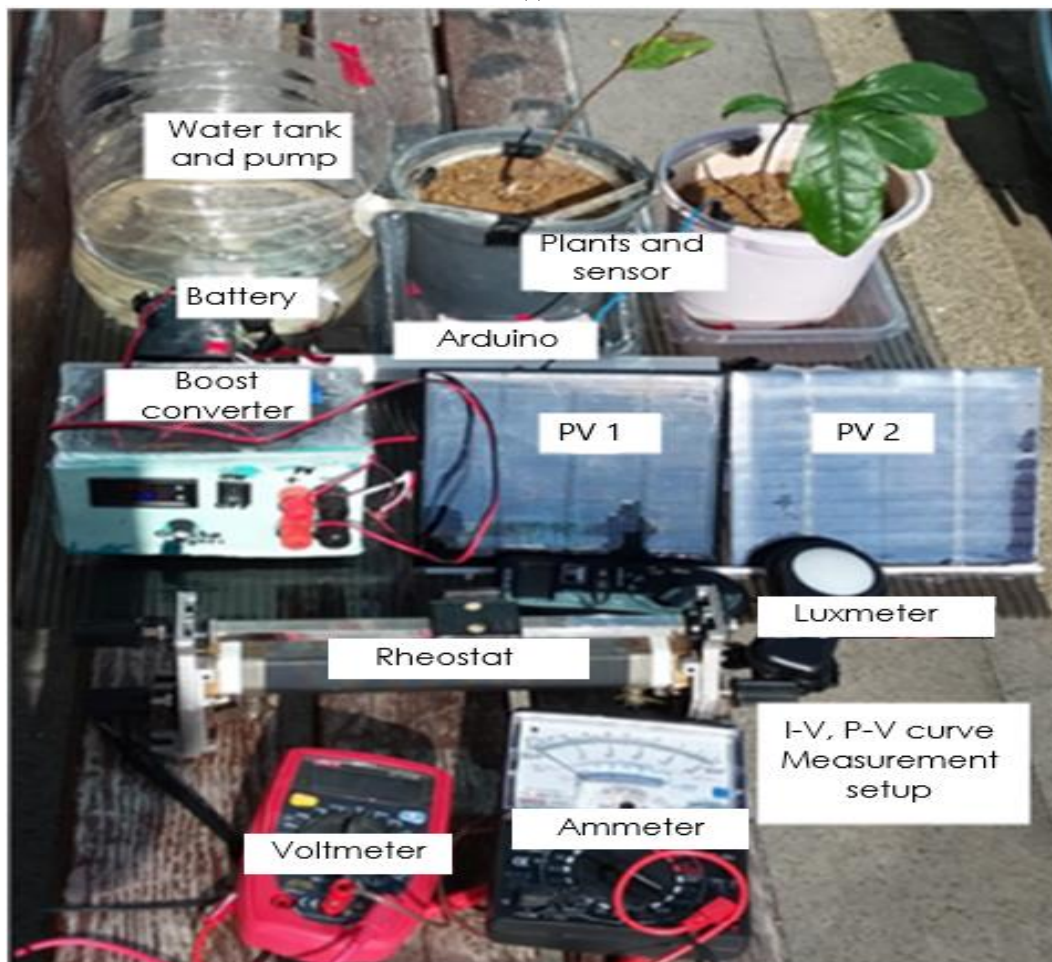
Type	Parameters	Values
Solar Panel	Power	3W
	Size	145×145mm
	Output voltage	12V
	Open circuit voltage	13.2V
Submersible Mini DC Water Pump	Operating Voltage	3 ~ 6V
	Operating Current	130 ~ 220mA
	Flow Rate	80 ~ 120 L/H
	Maximum Lift	40 ~ 110 mm
	Continuous Working Life	500 hours
	Driving Mode	DC, Magnetic Driving
	Material	Engineering Plastic
	Outlet Outside Diameter	7.5mm
	Outlet Inside Diameter	5 mm
	Operating Voltage	3 ~ 6V
Soil Moisture Sensor	Operating Current	130 ~ 220mA
	Operating voltage	3.3V to 5V
	Operating current	20 mA
	Output	Analog & Digital
DC-DC boost converter	Dimensions	20mm×15mm×10mm
	Weight	10g
	Input voltage	12V (9V-22V)
	Output voltage	24V
	Output current (max)	4A
	Output power	96W
	Conversion efficiency	up to 90%
	Soft start time	500mS
	Output ripple	80mV (MAX)
	Dynamic response rate	5% 200uS
	Protection class	IP67
	Size	58x40x22mm

2.2 Experimental set-up of the irrigation system

The DC-DC boost converter helps to increase or decrease a direct current (DC) source from any voltage level to another DC voltage level. The major advantages is that this irrigation system minimizes energy losses and high efficiency. Figure 2 shows the entire automated hybrid energy source irrigation system. Figure 2 (a) depicts a functional block diagram of the system and the complete setup with test procedures and measurements as shown in Figure 2 (b).



(a)



(b)

Figure 2. Automated hybrid energy source irrigation system, (a) The water irrigation system's block diagram, (b) Experimental design and test setup.

3. Results and Discussions

3.1. Simulations results

The boost converter simulation circuit of the DC-DC response is shown in Figure 3. A boost converter is a DC/DC power converter that increases the voltage from the source to the load. The duty cycle formula needed to increase the voltage value at the system's output to the target voltage is shown below. The theoretical transfer function of the boost converter is given by Equation (1) where D is the duty cycle:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

In this case, the converter is supplying an RC load from a 20 V supply, and the PWM frequency is set to 20 kHz. Run the simulation and look at the waveforms with Scope. Ascertain that the mean value of the load voltage (V_{out}) is extremely near to the theoretical value of:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)} = \frac{10}{(1-0.5)} = 20 \text{ V} \quad (2)$$

In Figure 3, when the MOSFET is at cut-off, the energy stored on the inductor flows through the load (R), capacitor (C), and diode. In this case:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_{out}}{RC} \quad (4)$$

Considering the equality between equations (3), (4), (5), and (6), the result is as follows:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} D + \frac{V_C}{L} (1-D) \quad (5)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -(1-D) \frac{i_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (6)$$

The inductance of the coil (L) in the design is given in the equation (7):

$$L = \frac{R(1-D)^2}{2f} D \quad (7)$$

The circuit can convert a DC voltage to a higher DC voltage. DC-DC converters operate on a coil and capacitor basis.

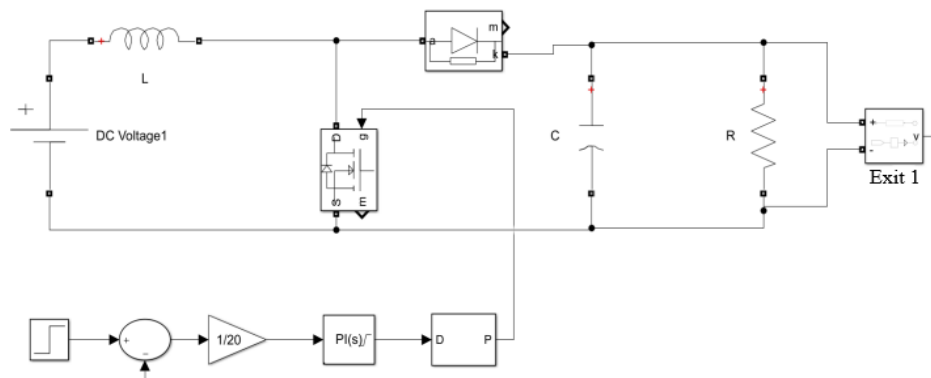


Figure 3. DC-DC boost converter simulation circuit.

When a voltage of 10 V is applied to the input, the voltage at the output becomes 20 V. A voltage of 20 V is utilized as a reference as shown in Figure 4. In this design, a MOSFET is used for switching. As it turns off and on, DC power is stored on the coil, and as the cycle repeats, it is transferred to the capacitor via the coil each time. It continues until the voltage across the capacitor reaches its maximum value.

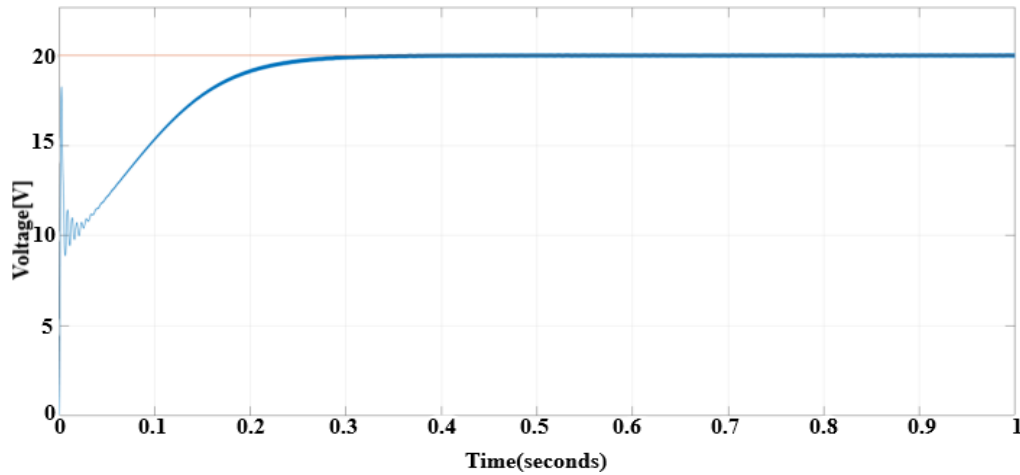


Figure 4. The 20 V reference voltage output signal variation with time.

The step signal is referenced as a minimum of 12 V and a maximum of 24 V of the system. A constant voltage of 5 V is supplied to its input. After a certain period of fluctuations when the system is started caught the tension. It is seen as 12 V and 24 V as output as shown in Figure 5. The output voltage is determined by the coil rating, capacitor rating, and duty cycle of the MOSFET. The system requires increasing the voltage value at the output to the desired voltage.

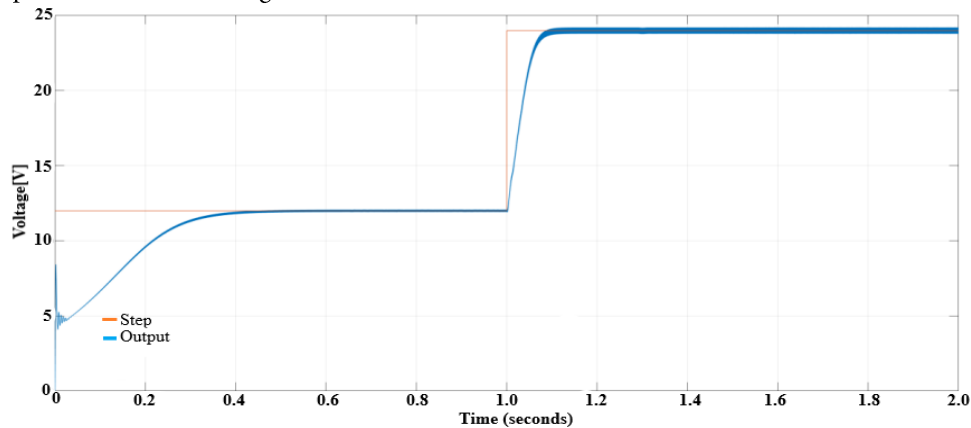


Figure 5. Output signal with step response.

When the inductance value is 47 μH , the current passes over the coil on the system and it has been observed that the coil works intermittently as shown in Figure 6. A minimum voltage of 12 V and a maximum voltage of 24 V were used as references. The Inductance voltage demonstrates a discontinuity mode over time. When the power supply is shut off, the magnetic field collapses and all current in the coil flows to the capacitor.

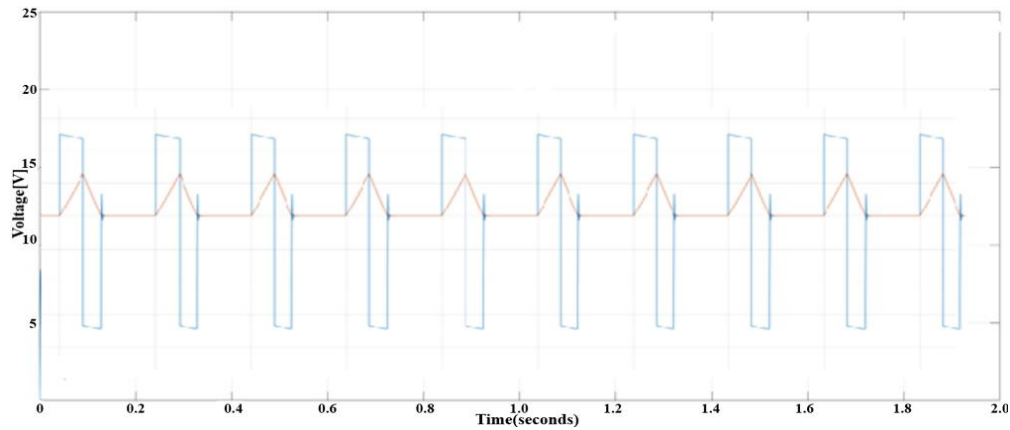


Figure 6. Inductance voltage and current pulsed operation signals.

The applied voltage enables the coil to store the current drawn. A magnetic field is formed on the coil while the power source is turned on. When the coil value in the system is $4700 \mu\text{H}$, the fluctuation on the coil is shown in Figure 7. The parameter values of the designed system are given in Table 2.

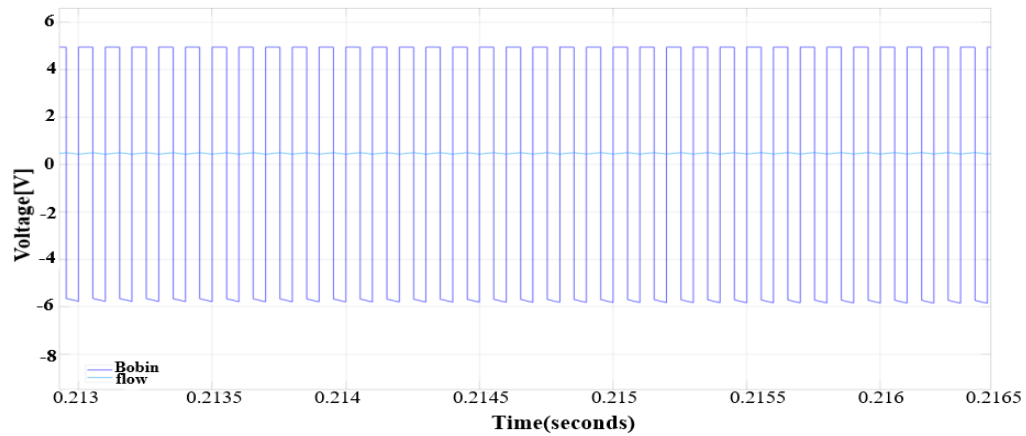


Figure 7. Inductance current and voltage signals for continuous mode.

Table 2. Simulation parameters of the designed system.

Parameters	Values
Input Voltage (V_g)	$V_g = 5 \text{ V}, 10 \text{ V}$
Output Voltage (V_{out})	$V_{out} = 12 \text{ V}, 20 \text{ V}, 24 \text{ V}$
Load	$R = 24\Omega, 47\Omega$
Output Reference Voltage	$V_r = 12 \text{ V}, 24 \text{ V}$
Coil Value (L)	$L = 470 \mu\text{H}$
Capacitor Rating (C)	$C = 100\mu\text{F}$
Switching Element	MOSFET
Rectifier Element	Power Diode
Controller Parameters (PI)	$K_p = 0.01, K_i = 5$

3.2. Experimental results

The DC-DC boost converter circuit was designed and tested. The DC-DC converter circuit was manufactured to be transparent and not be affected by any external factors. On the front side of the box, the voltage adjustment pot, the input and output terminals of the solar panel, and the input and output locations of the

loads to be supplied were made. Several simulations and circuit analysis programs were used to construct and test the boost converter circuit on the board. The power supply's input voltage was 6 V. This voltage was changed using a potentiometer and was raised to a voltage of 10 Volts. A USB connection was built to the computer to measure the pulse with modulation (PWM) signal, coil current, and output voltage signals. The signals were measured using a computer oscilloscope.

A digital voltmeter was mounted on the front side to measure the current flowing through the circuit and the load voltage. To increase the robustness of the box, the perimeter of the box was supported with silicone. The calibrated DC-DC converter solar panel was then tested in a suitable environment and the completed circuit was designed. A load was connected to a circuit, and the current was calibrated using a digital voltmeter. The circuit current was set to 0 A when no load was present and adjusted when a load was connected. The system was powered by solar panel electricity instead of a voltage source. The boost converter increased the electricity above 24 V without a load.

The data of the I-V and P-V characteristics of the solar cells connected serially shown in Figure 8 are obtained using the complete circuit design in Figure 8(b). The error analysis was conducted and showed the error limits in both figures as error bars with the default of 5% value. The I-V curve of the solar cell shows that the open circuit voltage of the PV cells is 27 V and the short circuit of the PV cells is 190 mA as shown in Figure 8(a). The P-V curve of the solar cell shows a 3-watt maximum power for 20 V as shown in Figure 8(b). This nonlinear voltage is converted to a suitable voltage to charge the 6 V nominal voltage battery. Also, these curves show that the PV cells with the converter charge the battery during the 4 hours and can charge the 6 V, 2 Ah current battery safely. If the battery is fully charged it can supply the system for a long time without solar energy.

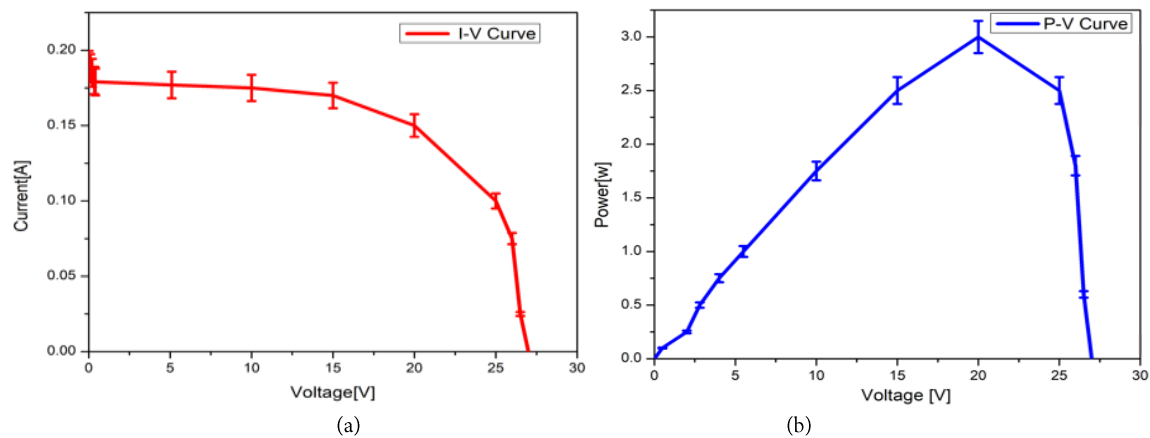


Figure 8. Solar Cell characteristics. (a) I-V curve of PV cells, (b) P-V curves of PV cells.

3.2.1. Arduino IDE software

The Arduino Uno driver must be manually loaded on your PC via the device manager first. The virtual serial port number to which the Arduino is connected will be displayed after installing the driver. The program was designed in C language using the Arduino IDE software. The Arduino Uno is a microcontroller based on the datasheet for the ATmega328. It has 14 digital inputs and output pins, including 6 pins PWM output and 6 pins clock speed of 16 MHz, a ceramic resonator USB connector, a power jack, an analog input such as a spreader, and a reset button [43]. It is an open-source microcontroller that is used to control the relay; to begin, simply connect it to a computer via USB or power it with an AC-to-DC rectifier or battery. It includes many libraries for interacting with a wide range of devices. The FTDI USB-to-serial driver chip is absent from the Uno, as is the case with all previous boards. Because the operational numbers on the motor nameplate range from 5-12 V and 150-300 mA, the input voltage is adjusted to 6 V. The SVR-5 relay is connected between the power source and the motor to regulate the current flowing through it. The Arduino program was opened and the codes were written for the coordinated operation of the sensor and motor on Arduino

GND) displays the value obtained from the moisture sensor. Simultaneously, the acquired data is delivered to the relay module, which determines whether to turn on or off the water pump. Simultaneously, the acquired data is transferred to the relay module coupled with Arduino (5V, GND, 2) to determine whether to turn on or off the water pump.

3.2.2. Motor, and sensor connection stages

The water motor is powered by a 3 V DC voltage. The system employs one relay. With the soil moisture sensor signal, 3V DC is sent to the motor, current flows via the relay connections, and water begins to be pumped. After the given time, the contacts' positions become open, and the motor's energy is cut off. 5 V input voltage was applied to the Arduino input. The humidity sensor was connected to the Arduino for testing. Pin 9 on the Arduino was connected to the sensor. The trigger pin of the Arduino was set to the 8th pin of the Arduino and the output was received. When the soil moisture value decreases, the Arduino is triggered and signaled by the sensor. When the humidity sensor is logic 0, the Arduino starts the motor. The running time of the motor is set to 2 seconds. The connection of the soil moisture sensor with Arduino is given in Figure 10.

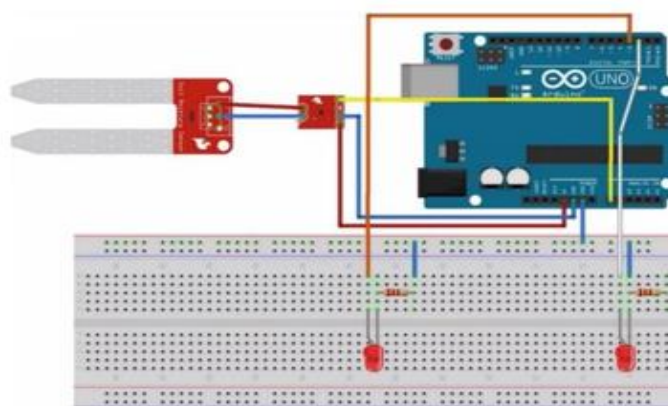


Figure 10. Connections of soil moisture sensor with Arduino

Table 3. The comparison of the threshold high temperature measured for major crops at different stages of development.

Crop	Threshold temperature (°C)	Growth Stage
Cool season pluses	25	Flowering
Wheat	26	Post anthesis
Brassica	29	Flowering
Tomato	30	Emergence
Groundnut	34	Pollen production
Rice	34	Grain yield
Pear Millet	35	Seedling
Corn	38	Grain filling
Cowpea	41	Flowering
Cotton	45	Reproductive

Since the operating values on the motor label are 5-12 V and 150-300 mA, the input voltage was set to 6 V. To keep the current coming to the motor under control, the SVR-5 relay was connected between the power supply and the motor. After finishing all the settings, a soil moisture sensor was inserted into the pot. Water pump motors were placed in the water supply. Soil with a low moisture value was preferred for observational purposes. Due to the low humidity value, it was seen that the motor pumped water for a given period with the signal supplied by the humidity sensor to Arduino Uno, and the plant was irrigated in the pot using the drip irrigation method so that the plant would not be damaged. The suitable threshold value varies by soil and vegetable. Table 3 shows the comparison of the threshold high temperature for the used crops at

different stages of development.

4. Conclusion

This study conserved electricity, and water from plants, and investigated healthy watering methods. The plant is irrigated by drip irrigation based on literature research. Data obtained during the design phase was compared with findings obtained during the application phase. The design of the solar panel was tested in various ways to obtain energy. The system utilized solar energy, a humidity sensor, Arduino, and a water pump motor to control the plant's water needs. The system aimed to save electricity, and water, and automatically control the irrigation process, ultimately increasing plant productivity. The system uses an inverter to convert solar energy into DC voltage, controlling water requirements with a humidity sensor, and a motor to meet water requirements, aiming to save electricity and water. The Arduino-based autonomous irrigation system combining PV solar panels and batteries, offers a sustainable, accurate, and efficient method for irrigation, reducing manual labor and improving resource efficiency, while also reusing excess energy for reuse. The I-V and P-V curves of solar cells connected serially show an open circuit voltage of 27 V and a short circuit current of 190 mA. The P-V curve reveals a maximum power of 3 watts at 20 V, which is enough to charge a 6V, 2 Ah current battery for four hours. The design enables remote monitoring of humidity, water, and energy usage in flowerpots, making it suited for agricultural applications such as greenhouses and farms. The agriculture-specific sustainable irrigation system has been tested on a variety of crops, including tomatoes, peanuts, soybeans, strawberries, and more. Additional sensors can be added to monitor temperature and pressure, which will be subject to further investigations.

Acknowledgment

The authors thank Ömer Gökçeoğlu, Selahattin Doğruyol and Dr. Yasin Karan for their contributions to this study.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] G. J. Hoffman, R. G. Evans, M. E. Jensen, D. L. Martin and R. L. Elliott, *Design and operation of farm irrigation systems*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, Michigan, 2007.
- [2] W. R. Walker, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1989.
- [3] Y. Gamal, A. Soltan, L. A. Said, A. H. Madian, A. G. Radwan, "Smart Irrigation Systems: Overview," *IEEE Access*, vol.4, pp.99, January 2023. Doi:10.1109/ACCESS.2023.3251655
- [4] S. L. Davis and M. D. Dukes, "Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers," *Agricultural Water Management*, vol. 98, pp. 19-28, December 2010. Doi:10.1016/j.agwat.2010.07.006
- [5] I. Kisekka, K. W. Migliaccio, M. D. Dukes, B. Schaffer, J.H. Crane, H. K. Bayabil and S.M. Guzman, "Evapotranspiration-Based Irrigation for Agriculture: Sources of Evapotranspiration data for Irrigation Scheduling in Florida, *EDIS*, April 2010. Doi:10.32473/edis-ae455-2010
- [6] T. A. Manfo, A. A. Abdullahi and S. D. Pawan, "Effect of Layered, Spinel, and Olivine-Based Positive Electrode Materials on Rechargeable Lithium-Ion Batteries: A Review," *Journal of Computational Mechanics, Power System, and Control*, vol. 6, pp. 38-57, November 2023. Doi:10.46253/jcmps.v6i4.a4
- [7] T. A. Manfo, "Progress into lithium-ion battery research," *Journal of Chemical Research*, vol. 47, no. 3, pp. 1-9, 2023.

Doi:10.1177/17475198231183349

- [8] T. A. Manfo, S. Konwar, P. K. Singh, R.M. Mehra, Y. Kumar and M. Gupta, "PEO + NaSCN and ionic liquid-based polymer electrolyte for supercapacitor," *Mater. Today: Proc.*, vol. 34, pp. 802-812, June 2020. Doi:10.1016/j.matpr.2020.05.340
- [9] M. E. Şahin and H. İ. Okumuş, "Modeling and simulation of solar cell module with Matlab/Simulink," *EMO Scientific Journal*, vol. 3, no. 5, June 2013.
- [10] M. E. Şahin, "A photovoltaic powered electrolysis converter system with maximum power point tracking control," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no:16 pp.9293-9304, March 2020. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.162
- [11] M. E. Şahin, "Energy Management and Measurement of Computer Controlled Solar House Model for Rize City," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.10, no: 2, pp.404-414, 2020. Doi: 10.17714/gumusfenbil.544087
- [12] M. E. Şahin and H. İ. Okumuş, "Parallel-connected buck-boost converter with FLC for hybrid energy system," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no:19-20, pp. 2117-2129, 2021. Doi: 10.1080/15325008.2021.1913261
- [13] M. E. Şahin and H. İ. Okumuş, "Physical Structure, Electrical Design, Mathematical Modeling and Simulation of Solar Cell Modules," *Turkish Journal of Electromechanics & Energy*, vol.1, no, pp. 5-12, March 2016.
- [14] N. Badi, T. A. Manfo, S. A. Alghamdi, A. S. Alatawi, A. Almasoudi, A. Lakhout, A. S. Roy and A. Ignatiev, "Thermal effect on curved photovoltaic panels: Model validation and application in the Tabuk region," *PLoS ONE*, vol. 17, no. 11, pp. 1-16, November 2022. Doi: 10.1371/journal.pone.0275467
- [15] T. A. Manfo, "Promising Cathode Materials for Rechargeable Lithium-Ion Batteries: A Review," *Journal of Sustainable Energy*, vol. 14, no:1 pp. 51-58, June 2023. Doi: 10.0909/JSE.2023660090
- [16] V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari, G. Salitra and D. Aurbach, "Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review," *Energy & Environmental Science*, vol. 4, no. 9, pp. 3243-3262, January 2011. Doi: 10.1039/C1EE01598B
- [17] T. A. Manfo, "A Comprehensive Analysis of Material Revolution to Evolution in Lithium-ion Battery Technology," *Turkish Journal of Materials*, vol. 8, no:1, pp.1-3, July 2023.
- [18] N. Badi, T. A. Manfo, S. A. Alghamdi, H. A. Al-Aoh, A. Lakhout, P.K. Singh, M. N. F. Norrrahim and G. Nath, "The Impact of Polymer Electrolyte Properties on Lithium-Ion Batteries," *Polymers*, vol.14, pp. 3101, July 2022. Doi: 10.3390/polym14153101
- [19] P. Debaeke and A. Aboudrare, "Adaptation of crop management to water-limited environments," *European Journal of Agronomy*, vol. 21, no.4, pp. 433-446, December 2004. Doi: 10.1016/j.eja.2004.07.006
- [20] D. D. Fangmeier, D. J. Garrot, C. F. Mancino and S. H. Husman, S. H. "Automated Irrigation Systems Using Plant and Soil Sensors," *ASAE Publication, No:4-90*, pp. 533-537, Michigan, USA, 1990.
- [21] J. E. Ayars, C. J. Phene, R. B. Hutmacher, K. R. Davis, R. A. Schoneman, S. S. Vail and R. M. Mead, "Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years research at the Water Management Research Laboratory," *Agricultural Water Management*, vol. 42, pp. 1-27, 1999.
- [22] A. G. Bayrakçı and G. Koçar, "Utilization of renewable energies in Turkey's agriculture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp.618-633, January 2012. Doi: 10.1016/j.rser.2011.08.027.
- [23] M. Arık and İ. Korkut, "Irrigation in Agriculture and Automation Based Irrigation Systems (Mini-Review)," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 10, no. 2, pp.360-367, 2022. Doi: 10.29109/gujsc.1108504.
- [24] B. Çakmak, T. Aküzüm and B. Benli, "Water problem in the world in the 21st century," *7th Culture Technique Congress*, Nevşehir, Türkiye, 1999, pp. 8-16.
- [25] G. Dearib, "Cooperative Automatic Irrigation System using Arduino," *International Journal of Science and Research*, vol. 6, no. 3 pp. 1781-1787, March 2017. Doi: 10.21275/ART20171731
- [26] S. Rakshak and R. W. Deshpande, "Automated Irrigation System Based on Arduino Controller Using Sensors," *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 5, no. 7, pp. 13394-13400, 2017.
- [27] H. T Ingale and N. Kasat, "Automated Irrigation System," *Proceedings of the International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 4, November 2012.

- [28] C. Yılmaz, E. Sefer and M. E. Şahin, "Greenhouse Automation with Solar Cell," *Proceedings of EEMGG2021*, Trabzon Türkiye, September 2021, pp.91-97.
- [29] K. Taneja and S. Bhatia, "Automatic Irrigation System using Arduino UNO," *International Conference on Intelligent Computing and Control Systems ICICCS*, Madurai-India, June 2017. Doi: 10.1109/ICCONS.2017.8250693
- [30] V. Ramanjaneyulu, K. Devendra Reddy and P. Madhuri, "DTMF Based Irrigation Water Pump Control System," *International Journal of Research*, vol. 5, no.12, pp. 579-582, April 2018.
- [31] R. Senol, "Agricultural Irrigation, and Solar Energy," *Gazi University Engineering Journal of the Faculty of Architecture*, vol. 27, no.3, pp. 519-526, 2020.
- [32] M. Baytürk, G.Çetin and A.Çetin, "The Application of Internet Based Greenhouse Automation System Designed with Embedded Server," *Journal of Information Technologies*, vol.6, no.2, pp.653-657, 2013.
- [33] İ. Şahin, M. H. Calp and A. Özkan, "An Expert System Design and Application for Hydroponics Greenhouse Systems," *Gazi University Journal of Science*, vol. 27, no. 2, pp. 809-822, January 2014.
- [34] A. Kurklu and N. Caglayan, "A Study on the Development of Greenhouse Automation Systems," *Akdeniz University Journal of the Faculty Agriculture*, vol.18, no.1, pp. 25-34, 2005
- [35] A. Sener, "Freeze-Cold Warning and Automatic Heating in Greenhouses, Extreme Hot Warning and Automatic Ventilation Cooling System." Master's Thesis, Yüzüncü Yıl University Institute of Science, Van, Türkiye, 1990.
- [36] N. Durmaz, "A Study on gradual and automatic opening and closing of ventilation covers in greenhouses." Master's Thesis, Akdeniz University, Institute of Science, Antalya, Türkiye, 1994.
- [37] S. R. Barkunan, V. Bhanumathi and J. Sethuram, "Smart sensor for automatic drip irrigation system for paddy cultivation," *Computers, and Electrical Engineering*, vol. 73, pp. 180-193, January 2019. Doi:10.1016/j.compeleceng.2018.11.013
- [38] C. Küçüksayan, "The Importance of Automatic Irrigation in Landscape Applications and Examination of Its Application in the City of Ankara." Master Thesis, Bartın University Institute of Science and Technology, Bartın, Türkiye, 2010.
- [39] K. Obaideen, B. A. A. Yousef, M. N. AlMallahi, Y. C. Tan, M. Mahmoud, H. Jaber and M. Ramadan, "An overview of smart irrigation systems using IoT," *Energy Nexus*, vol. 7, pp. 100124, 2022. Doi: 10.1016/j.nexus.2022.100124
- [40] D. Yavuz, R. Topak and N. Yavuz, "Determining energy consumption of sprinkler irrigation for different crops in Konya Plain," *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, vol. 1, no.3, pp.312-321, 2014.
- [41] S. Khan, M. A. Khan, M. A. Hanjra and J. Mu, "Pathways to reduce the environmental footprints of water and energy inputs in food production," *Food Policy*, vol. 34, no.2, pp.141-149, 2009. Doi: 10.1016/j.foodpol.2008.11.002
- [42] H. G. Mobtaker, A. Keyhani, A. Mohammadi, S. Rafiee and A. Akram, "Sensitivity analysis of energy inputs for barley production in Hamedan Province of Iran," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 137, no.3, pp.367-372, 2010. Doi:10.1016/j.agee.2010.03.011
- [43] C. Sivaji, M. Ramachandran, V. Prasanth, S. Sriram and S. Sowmiya, "Application of Arduino Devices in various IOT Application," *Renewable and Nonrenewable Energy*, vol 1, no.1, June 2022. Doi: 10.46632/rne/1/1/7
- [44] A. Hassan, S. B. Sheng, W. M. Shah and N. Bahaman, An Automated Irrigation System Using Arduino Microcontroller. *Chapter 1 In book: Internet of Things: Usage and Application, Publisher: Penerbit Universiti Teknikal Malaysia*, Melaka. pp.1-13, 2018.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Estimation of Wind Power Probability Density Distribution Functions Parameters By Using Meta-Heuristic Algorithms

Tuğba Akman^a, Hasan Hüseyin Sayan^b, Yusuf Söyletmez^c

Submitted: 02.05.2024 Revised: 14.06.2024 Accepted: 31.07.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A12

ABSTRACT

Keywords: Power Systems, Wind Energy, Optimization, Metaheuristic Search Algorithms
a,* Gazi University, Technology Faculty, Dept. of Electrical and Electronics Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2551-1603
e mail: tugba.akman@teias.gov.tr

b Gazi University, Technology Faculty, Dept. of Electrical and Electronics Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0692-172X
e-mail: hsayan@gazi.edu.tr

c Gazi University, Technology Faculty, Dept. of Computer Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9775-9835
e-mail: ysonmez@gazi.edu.tr
*Corresponding author:
tugba.akman@teias.gov.tr

Wind energy is a very popular renewable energy resource and is used as an energy source global because of its benefits of being environmentally friendly, renewable and having great reserves. The probability density distribution of wind speed can be used to estimate wind power density. In this study, Weibull and Rayleigh density distributions were employed to analytically eliminate the presumption that the total wind power is described by a single random variant and to calculate the wind power probability density distribution. In the modeling of complex high-dimensional stochastic wind power, although it can be solved with various mathematical approaches, since there are generally large-scale power systems containing many generators, buses, planning periods and non-linear stochastic variables, it is quite leisurely in searching for the optimum point and most of the time the solutions are far from reality. Consequently, heuristic methods have now substituted classical mathematical methods in obtaining wind parameters. Therefore, the advantage of heuristic methods compared to classical methods is that they can produce efficient solutions in a shorter time and with greater precision. Therefore, in this study, the main metaheuristic algorithms Symbiosis Organisms Search (SOS) and Artificial Bee Colony (ABC) algorithms and the classical statistical methods Energy Pattern Factor and Maximum Likelihood Method were employed to investigate the accuracy of wind power parameter calculations.

Rüzgar Enerjisi Olasılık Yoğunluk Dağılımı Fonksiyonları Parametrelerinin Meta-Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak Tahmini

ÖZ

Rüzgar enerjisi oldukça popüler bir yenilenebilir enerji kaynağıdır ve çevre dostu olması, yenilenebilir olması ve büyük rezervlere sahip olması gibi faydaları nedeniyle dünya çapında bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Rüzgar hızının olasılık yoğunluk dağılımı, rüzgar gücü yoğunluğunu tahmin etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada, toplam rüzgar gücünün tek bir rastgele değişkenle tanımlandığı varsayımını analitik olarak ortadan kaldırmak ve rüzgar gücü olasılık yoğunluk dağılımını hesaplamak için Weibull ve Rayleigh yoğunluk dağılımları kullanılmıştır. Karmaşık yüksek boyutlu stokastik rüzgar enerjisinin modellenmesinde, çeşitli matematiksel yaklaşımlarla çözülebilmeye rağmen genellikle çok sayıda jeneratör, bara, planlama periyodu ve doğrusal olmayan stokastik değişkenler içeren büyük ölçekli güç sistemleri bulunduğu için oldukça yavaştır. Optimum noktayı ararken çoğu zaman çözümler gerçeklikten uzak olmaktadır. Sonuç olarak, rüzgar parametrelerinin elde edilmesinde günümüzde klasik matematiksel yöntemlerin yerini sezgisel yöntemler almıştır. Dolayısıyla sezgisel yöntemlerin klasik yöntemlere göre avantajı, daha kısa sürede ve daha yüksek hassasiyetle etkin çözümler üretebilmesidir. Bu nedenle, bu çalışmada rüzgar gücü parametre hesaplamalarının doğruluğunu araştırmak için bilinen başarılı metasezgisel algoritmalar Symbiosis Organisms Search (SOS) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmaları ile klasik istatistiksel yöntemlerden Enerji Eğilim Faktörü ve Maksimum Olabilirlik yöntemleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç Sistemleri, Rüzgar enerjisi, Optimizasyon, Meta Sezgisel Algoritmalar

1. Introduction

With the increasing consumption of non-renewable conventional energy such as coal, natural gas and oil, the use of renewable energy has become a very important strategy issue all over the world to solve the current and future energy crisis. Wind energy has received great attention as a promising renewable energy source. It has potential benefits in reducing emissions and consumption of thermal fuel reserves. Wind energy is a very popular renewable energy resource and is used as an energy source global because of its benefits of being environmentally friendly, renewable and having great reserves. With growing concerns about global climate change, renewable energy resources, particularly wind power generation, are being promoted as a way to meet emissions reduction targets.

In traditional power system problems, deterministic models are used in the integration of wind energy, which cannot reflect the uncertain situations of wind energy. Since wind power plants integrated to power systems have dynamic and stochastic performance characteristics, stochastic power system models are more appropriate. There are various studies aiming to research the impact of wind energy on generation resource management because of its stochastic and non-dispersible properties for the integration of wind energy into conventional power systems. Wind energy is produced thanks to wind turbines. Therefore, wind direction and wind speed characteristics are very important for accurate calculation of wind power and effective plan and modeling of wind turbines. Wind speed probability density distribution can be used to forecast wind power density and determine the most probable wind direction [1-5].

The collective probability distribution of wind direction and wind speed is of great interest as it can be utilized to optimize the layout of the wind farm, that is, to acquire wind speed properties under different wind directions. Wind speed properties under different wind directions play an important part in the design of wind turbines. It should be given that the wind speed with the highest frequency and the wind speed that can catch the maximum wind energy are different. To acquire maximum wind energy, the two wind speeds must be as close as likely. Additionally, probability distribution is important in determining the prediction method and calculating the wind load [6 and 7]. This stochastic approach avoids local solution traps in solving power systems optimization problems by adding probabilistic features to traditional power system models. This strategy eliminates the probabilistic feasibility inherent in traditional models. Additionally, the solutions prevent the occurrence of reserve costs due to overestimation of available wind power and penalty costs due to underestimation of available wind power.

In a region, researchers utilize probability density functions (PDFs) to define the frequency distribution of wind speed. In addition to wind speed, parameters such as air density, altitude, and surface roughness also affect the calculation of wind power of wind power plants (WPPs) [8]. Data-based statistical distribution methods such as gamma distribution, two-parameter gamma distribution, lognormal distribution, gaussian distribution, rayleigh distribution, weibull distribution and hybrid distribution are commonly used to obtain probability density functions [9-13]. These distribution methods are based on probability density functions associated with wind speed data in modeling wind conditions. The two-parameter Weibull distribution appears to be the most frequently used and accepted statistical model [14,15].

In the literature, studies are carried out on topics such as technical and economic evaluation of regional wind energy potential, energy characteristics, wind turbine location and sizing, levelized unit energy costs, environmental impacts, using wind speed data from previous years using different distribution methods. In [16], M. K. Mridul et al. examined wind energy potential and characteristics for Faridpur, Bangladesh. To make this happen, monthly resolution wind speed data for the region at a vertical height of 50 m for 2019 was used. Weibull probability density function (PDF) and Weibull cumulative distribution function (CDF) were calculated for the region using the Weibull distribution method. Using Weibull PDF and Weibull CDF, the most probable wind speed, maximum energy carrying wind speed, energy and power densities were calculated. In [17], J. C. Lam et al. used long-term average wind speed data from three different regions in Hong Kong to calculate Weibull PDF for three regions. Numerical wind speed estimates were obtained for each region using the calculated functions. In [18], A. S. S. Dorvlo used Weibull distribution in wind speed modeling of four regions in Oman. In [19], A. Keyhani et al. tried to analyze the wind speed data of the Firouzkooh region of Iran. For this purpose, wind speed and wind power production potentials of the region were analyzed using 3-hour wind speed data from

the past 10 years. In [20], A.H. Shahirinia et al. proposed Monte Carlo simulation algorithm to find PDFs of solutions in the optimum power flow problem. In [21], G.J. Osorio and others have used the Monte Carlo simulation approach to find PDFs of solutions to the economic dispatch problem. In [22], M. Eladany et al. used a Weibull PDF to represent their stochastic nature, since wind speed and solar irradiance are random variables. For this purpose, the stochastic wind power probability based on Weibull PDF was included as a constraint in their proposed model. They examined the effects of Weibull pdf factors on total cost values. In [23], S. Nasser Keshmiri and others applied the Weibull distribution function and Normal distribution function to calculate the short-term and long-term characterization functions of wind speed in solving the multi-objective economic dispatch optimization problem. In [24], J. Hetzer et al. used Weibull PDF to calculate the parameters of stochastic wind power in solving the wind power integrated economic dispatch problem. In [25], A. Albani et al. examined the wind energy potential and characteristics of different locations in Malaysia according to Weibull and Rayleigh types. In [26], C. Peng et al. analyzed the stochastic structure of wind power output, obtained the Weibull distribution parameters of zonal wind speed for different time intervals respectively, and then obtained the probability density functions of wind power output for different time intervals. In [27], H.T. Jadhav and R. Roy modeled the random nature of wind power using Weibull PDF in solving the environmental economic power dispatch problem. Also, the uncertainty in wind power is taken into account in the cost model by including power imbalance terms such as overestimation and underestimation costs of available wind power. In [28], S. Velamuri et al. used the Weibull distribution function to solve the stochastic structure of wind in the static economic dispatch problem, since the integration of wind power into the existing system is complicated due to its stochastic structure. They discussed the scenarios with and without wind power penetration in detail. In [29], E. Arriagada et al. considered the demand and generation randomness to model and solve the stochastic economic dispatch problem involving renewable energies. They modeled the demand, wind speed, solar distribution through Normal, Weibull, Beta and Uniform distributions, respectively. In [30], Z. Zhang et al. formulated the versatile distribution probability distribution model and developed it with its applications since wind power forecast errors are one of the most challenging issues for power system operation in economic dispatch applications.

In this study, Weibull and Rayleigh density distributions were employed to analytically eliminate the presumption that the total wind power is described by a single random variant and to calculate the wind power probability density distribution. This allows complex and uncertain wind characteristics to be explained more accurately and effectively. To obtain Weibull functions, scale and shape parameters need to be estimated. In order to obtain Weibull parameters, statistical methods such as the Maximum Likelihood Method (MLM), Graphical Method, Empirical Method, Modified-Maximum Likelihood Method, Moment Method, Energy Pattern Factor Method (EPMF) and Equivalent Energy Method Energy are used. In this study, the Root Mean Square Error (RMSE) method was used in error analysis with the objective of identifying which one of the Weibull and Rayleigh parameters computed by the EPMF and the MLM would be appropriate for the real wind speed. What is clear throughout all these studies is that achieving stochastic wind power becomes a composite optimization problem that is hard to resolve by direct mathematical methods.

In the modeling of complex high-dimensional stochastic wind power, although it can be solved with various mathematical approaches, since there are generally large-scale power systems containing many generators, buses, planning periods and non-linear stochastic variables, it is quite leisurely in searching for the optimum point and most of the time the solutions are far from reality. Additionally, because of their nonlinear properties, these methods cannot ensure successful results. Consequently, heuristic methods have now substituted classical mathematical methods in obtaining wind parameters. The advantage of heuristic methods compared to classical methods is that they can produce efficient solutions in a shorter time and with greater precision. Heuristics are often stimulated by certain laws of nature, biological characteristics, or mutual behaviors revealed by living things. Therefore, in this study, the main metaheuristic algorithms Symbiosis Organisms Search (SOS) and Artificial Bee Colony (ABC) algorithms were used to investigate the accuracy of wind power parameter calculations. According to the results obtained, error analyzes were calculated and the accuracies of the methods were compared. Thus, the accuracies of the methods were compared according to the results obtained using different parameter estimation methods.

The remaining part of the study is organized as follows. Mathematical formulation of stochastic wind energy, formulation of parameters for calculating wind power, Weibull and Rayleigh probability

density functions, stochastic modeling of wind energy are included in Section 2. In Section 3, the analysis studies and methods used to compute the Weibull and Rayleigh parameters are explained in detail. In Section 4, the results obtained using different methods and solutions for stochastic wind power are presented. The study ends with concluding remarks in Section 5.

2. Wind Energy And Its Characteristics

Wind is a climate element that has properties such as speed, direction and frequency and is used in energy generation due to these properties. Factors affecting wind speed can be listed as the geographical location of the region, local surface texture and altitude. Therefore, wind speed is affected by the meteorological and topographic structure of the region. The wind power plant to be established in a region depends on the wind characteristics of the region. To determine the characteristics of wind power, data such as hourly average speed, daily average speed, monthly average speed and seasonal average speed of the wind are needed. However, information on the dominant wind direction of the region is needed in terms of the location of the wind turbine to be installed. Thanks to all these data, parameters such as standard deviation, turbulence, wind speed, most likely speed, cumulative distribution of speeds can be obtained.

More than one statistical approach can be used to evaluate wind data. PDF is employed to define the frequency distribution of wind speed in the area. A variety of techniques are employed in the analysis of wind speeds, with the objective of obtaining a probability density function. It is significant to use suitable statistical models to model the wind modes of a certain region and express their frequency distributions. It is stated in the literature that the two-parameter Weibull and Rayleigh distribution is an appropriate distribution method since it provides best conclusions in forecasting the wind speed and wind power potency of a certain area. The Weibull distribution is widely used because it is easy to calculate only two parameters, its accuracy can be proven, it is suitable for monitoring wind speed distributions, and its pliability features. In this study, Weibull and Rayleigh distributions were utilized to obtain the power output of WPPs. The shape and scale parameters that determine distributions can be computed by many methods. Employing the hourly average wind speed data collected for each station, the standard deviation, average speed, most likely speed, the speed that contributes the most to the energy generation and average power density were calculated depending on the Weibull and Rayleigh shape and scale parameters.

2.1. Weibull distribution

The mostly used statistical approach in determining the distribution of wind speed data is the Weibull probability density function. The Weibull distribution is a distribution with higher sensitivity and more flexibility than other distributions. The Weibull distribution is a two-parameter distribution. The two-parameter Weibull probability density function can be expressed as in Eq.1.

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (1)$$

Where (v) denotes the wind speed probability, (k) and (c) denote the shape and scale coefficients, respectively. It is the probability of measured wind speed, expressed as $f_v(v)$.

The dimensionless shape parameter (k) in Eq. 1 is the parameter that expresses the frequency of wind blowing. If the wind speed in a region does not fluctuate much over time, that is, if it blows at an approximately constant speed, the shape parameter (k) takes a large value. If the changes in wind speed are large, that is, if it does not blow at a constant speed, the shape parameter takes a small value. The other parameter in Eq.1 is named the scale parameter (c) , which has the identical unit as the wind speed. The scale parameter varies contingent on the average speed. This change occurs in direct proportion. In other words, a high average speed means that the scale parameter is also high. The Weibull cumulative distribution function (cdf) is expressed as in Eq.2.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (2)$$

The Weibull cdf indicates the probability of wind speeds smaller than (v) speed.

2.2. Rayleigh distribution

Another statistical approach used to determine the distribution of wind speed data is the Rayleigh distribution. Rayleigh distribution refers to the situation where the shape parameter of the Weibull distribution is taken as constant "2". The biggest advantage of the Rayleigh distribution is that the distribution is determined only by the average wind speed. In this case, the Rayleigh PDF is expressed by Eq. 3.

$$f_R(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2}, \quad 0 < v < \infty \quad (3)$$

The Rayleigh cdf is expressed by Eq.4.

$$F_R(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2}, \quad 0 < v < \infty \quad (4)$$

2.3. Wind power and wind power density (WPD)

Wind power can be expressed mathematically as in Eq. 5.

$$P_W(v) = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (5)$$

In the context provided, P_W represents the generated wind power in watts (W), where ρ denotes the air density at a specific altitude measured in kilograms per cubic meter kg/m^3 , A signifies the swept area of the rotor blade measured in square meters (m^2) and v stands for the wind speed measured in meters per second m/s . The standard density of air at sea level under conditions of 15.55 C and 1 atmosphere of atmospheric pressure is denoted as $\rho_0 = 1.225 kg/m^3$. It is notable that both pressure and temperature vary with altitude, consequently leading to alterations in air density (ρ_h). It should be emphasized that the air density (ρ_h) observed at a certain height does not equate to the air density at sea level. Depending on the air density at sea level, the corrected air density at height h (ρ_h) is calculated as in Eq. 6.

$$\rho_h = \rho_0 - (1,194 \cdot 10^{-4} h) \quad (6)$$

WPD denoted as the power per square meter of area m^2 . It can be computed utilizing the formula provided in Eq. 7.

$$P_{wpd} = \frac{1}{2} \rho V^3 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho V^3}{N} \quad (7)$$

In this context, P_{wpd} denotes the wpd within each square meter of area m^2 , v_i represents the wind speed measured per hour, and N refers to the total number of wind speed measured in the sequences. Extrapolation is a statistical technique used to estimate values beyond the range of observed data points. Extrapolation involves establishing a direct proportionality between wind speed and altitude, considering that wind speeds are typically measured at a level under than the height of the wind turbine. This process accounts for the fact that wind speeds generally increase with height due to reduced surface friction and other atmospheric factors. Therefore, it becomes necessary to adjust the measured wind speeds to correspond with the height of the turbine casing. Eq.8 is used for extrapolation.

$$v_h = v_r \left(\frac{Z_h}{Z_r}\right)^\alpha \quad (8)$$

In this equation, v_h refers to the wind speed at the height Z_h to be determined, v_r is the wind speed measured at the height Z_r , and α stands for the Helman coefficient, which signifies the surface roughness coefficient. It is conventionally accepted as 0.143 under specific circumstances.

3. Method

In the modeling of complex high-dimensional stochastic wind power, although it can be solved with various mathematical approaches, it is quite leisurely in searching for the optimum point, since there

are generally large-scale power systems containing many generators, buses, planning periods and non-linear stochastic variables. Most of the time the solutions are far from the truth. On the other hand, obtaining stochastic wind power is a composite optimization problem that is hard to resolve by direct mathematical methods. Additionally, because of their nonlinear properties, these methods cannot ensure successful results. Consequently, heuristic methods have now substituted classical mathematical methods in obtaining wind parameters. The advantage of heuristic methods compared to classical methods is that they can produce efficient solutions in a shorter time and with greater precision. Heuristics are often stimulated by certain laws of nature, biological characteristics, or mutual behaviors revealed by living things. Therefore, in this study, Symbiosis Organisms Search (SOS) and Artificial Bee Colony (ABC) algorithms, which are the main metaheuristic algorithms, were used to investigate the accuracy of wind power parameter calculations. According to the results obtained, error analyzes were calculated and the accuracies of the methods were compared. In this study, the RMSE method was used in error analysis to determine which one of the Weibull and Rayleigh parameters computed by the EPFM and the MLM would be appropriate for the actual wind speed. Thus, according to the results obtained using different Weibull parameter estimation methods, the accuracies of the methods were compared.

3.1. Meta heuristic (MHS) optimization algorithms

There are two basic requirements that meta-heuristic search algorithms must meet in order to be successful. These are neighborhood (exploitation) and exploration tasks. The exploitation mission entails a delicate search conducted in the vicinity of reference locations, often referred to as fine-tuning or intensification in the literature. Various simple yet efficient statistical methods exist for exploring the neighborhood of a related location, making intensification a process that Metaheuristic Search (MHS) algorithms execute adeptly. The primary determine of the performance of MHS algorithms lies in their exploration capabilities. Exploration, crucial for averting local solution traps during the search process, is paramount. Local solution traps pose a significant challenge in solving optimization problems, particularly in non-convex and multidimensional search spaces, where numerous local solutions abound. While MHS algorithms excel in their exploitation task, they often become ensnared in these local solution traps. In such instances, it is the exploration operators that rescue the algorithms from these predicaments. Unlike intensification, the diversification process lacks well-known and potent mathematical methods. Furthermore, as the complication of optimization problems escalates, MHS algorithms encounter difficulties in effectively executing the exploration process. For these myriad reasons, successful completion of the MHS process requires having a powerful exploration ability. Consequently, in this study, experimental studies were carried out using SOS and ABC algorithms, which are among the successful MHS algorithms in the literature for parameter estimation methods.

3.1.1 Symbiosis organisms search algorithm

Similar to other population-based algorithms, the SOS algorithm is a population-based iterative method to find the overall best solution in the search space. The name given to the population in the SOS algorithm is ecosystem. In the initial population creation phase, a group of organisms is randomly initialized in the search space. Each organism represents a candidate solution to the problem. Each organism within the ecosystem has a best fitness value that indicates its degree of compatibility with the desired goal.

In general, all meta-heuristic algorithms subject the solutions they obtain at the end of each iteration to a replacement process to determine the new generations to be produced in the next step.

In the SOS algorithm, the new generation is produced by imitating the biological interaction between two organisms in the ecosystem. The process, which resembles real-life biological interaction and consists of three phases: is modeled as a mutual benefit phase, a unilateral benefit phase, and a phase where one benefits and the other is harmed.

The character of the interaction defines the main principle of each universe. In the mutualism phase, interactions provide benefits to both parties. In the commensalism phase, while one side gains, it has no effect on the other. In the parasitism phase, one side gains and the other side suffers. In all stages, each organism interacts with the others in a random manner. The process continues until the termination criterion is met.

3.1.2. Artificial bee colony algorithm (ABC)

ABC algorithm is one of the algorithms based on swarm intelligence. Bee Colony, like other swarm intelligence-based algorithms, has the ability to divide labor and organize itself. This algorithm explores both the global and regional spaces based on the neighborhood rule. Within the colony, bees are partitioned into three groups:

1-Worker Bees: Worker bees employ the neighborhood principle to search for food sources abundant in nectar. There is one worker in each food source. Therefore, the number of worker bees is equal to the number of food sources.

2-Onlooker Bees: Onlooker bees wait in the hive and after sharing the food sources and information of other bees with them through dance, they turn to the food source where nectar is abundant.

3-Scout Bees: At the beginning of the foraging process, scout bees disperse randomly and start searching for food.

Steps for Artificial Bee Colony:

1-Initialization of the Algorithm: This stage is the stage of generating random food resources in the environment. It corresponds to the algorithm producing a random starting value between the lower and upper limits of the parameter.

2-Identification of New Sources: Identification of new sources is carried out according to the neighborhood principle. The worker bee identifies a new food source in the neighborhood of the food source.

3- Determining the Quality of the Source: A best value is appointed to the parameter vectors corresponding a new source, followed by the application of a greedy selection process. If the new source is of better quality than the other, the old source is deleted from memory and the new source is stored in memory.

4-Selecting the Source: When worker bees return to the hive, they convey information to the onlooker bees about the quality of the source through dance. Accordingly, onlooker bees choose the source for themselves. Sources with high nectar quality (fitness value) are more likely to be selected.

3.2. Statistical methods

In this study, the EPFM and MLM, which are statistical methods, were employed to determine the parameters of Weibull and Rayleigh distributions.

Energy pattern factor method

Energy Pattern Factor Method is defined mathematically as in Eq. 9, depending on the average wind speed data.

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{(\bar{v})^3} \quad (9)$$

Where E_{pf} is computed using the average of the cube of the speed and the cube of the average of the speed. After E_{pf} is calculated, the shape (k) and scale (c) parameters can be easily calculated with Eq. 10 and Eq. 11.

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (10)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \quad (11)$$

Maximum likelihood method

The shape (k) and scale (c) parameters can be computed using the Maximum Likelihood Method, as described by Eq. 12 and Eq. 13.

$$k = \left(\frac{\sum_{j=1}^N V_j^k \ln(V_j)}{\sum_{j=1}^N V_j^k} - \frac{\sum_{j=1}^N \ln(V_j)}{N} \right)^{-1} \quad (12)$$

$$c = \left(\frac{\sum_{j=1}^N V_j^k}{N} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (13)$$

Where, N represents the total wind speed data, while V_j j th mentions to the wind speed measured for the hour.

Error analysis

Error analysis is necessary to determine which one of the Weibull and Rayleigh parameters, computed using the EPFM and MLM, are appropriate for the actual wind speed data. Various established analysis methods, like root mean square error (RMSE), mean square error (MSE), mean absolute error, chi-square, and coefficient of determination are employed in this error analysis process. In this study, the RMSE method given in Eq.14 was used.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_{i,m} - x_{i,w})^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

4. Analysis Studies And Results

In this study, the wind speed distribution was appraised for sample wind speed data by utilizing the Weibull and Rayleigh distribution method to acquire the power output of WPPs.

To accomplish this, wind speed data collected on an hourly basis at a height of 10 meters from previous years (2017-2023) were utilized for sampling. To augment the sample size, monthly wind data for each year were used for the analysis of the month in which the study would be carried out. Thus, a total of 210 samples (30x7) were obtained for each month. In addition, in the study, a total of 2520 samples (12x30x7) were obtained for each year to perform annual wind speed density analysis. The hub height of the Wind Power Plants (WPPs) considered in this study is 60 meters. Firstly, wind speeds measured at 10 meters were extrapolated to a height of 60 meters using Eq.8.

EPFM and MLM, which are statistical methods, were used to compute the Weibull and Rayleigh distribution parameters. In addition, SOS and ABC algorithms, which are the main metaheuristic algorithms, were used to investigate the accuracy of parameter calculations. Thus, error analyzes were calculated according to the results obtained using different Weibull parameter estimation methods and the accuracies of the methods were compared.

Table 1 includes 12-month Weibull parameters and error values for sample speed data. Table 2 includes Rayleigh parameters and error values for 12 months for sample speed data. Additionally, Tables 3 and 4 include Weibull and Rayleigh distribution parameters and error values for all years for sample speed data.

Table 1. Monthly Weibull parameters and error rates

Month	Method	k	c (m/s)	Total Absolute Error PDF)
1	EPFM	1.717411459	8.67863556	1.057163145
	MLM	1.893688801	8.780044354	1.072190066
	SOS	1.93790154	8.426067466	1.029933202
2	ABC	1.93790154	8.426067466	1.029933202
	EPFM	1.664487508	8.485753366	1.217339419
	MLM	1.839293457	8.601385704	1.221227883
3	SOS	1.772402485	7.731485147	1.187690659
	ABC	1.772402485	7.731485147	1.187690229
	EPFM	1.660331232	8.526912911	1.200393361
4	MLM	1.848815707	8.633043177	1.209073163
	SOS	2.535576968	7.24714609	1.020983218
	ABC	2.535576968	7.24714609	1.020980205
5	EPFM	2.28637684	7.504895939	1.161691776
	MLM	2.400027209	7.501433401	1.186059408
	SOS	2.991909833	6.798685873	0.904142669
6	ABC	2.991909833	6.798685873	0.904141737
	EPFM	2.154721077	8.065113452	1.079968581
	MLM	2.26397308	8.073843755	1.074433314
7	SOS	3.057083425	7.161685369	0.877583603
	ABC	3.057083425	7.161685369	0.877581742
	EPFM	2.636954789	8.941351355	1.02255627
8	MLM	2.72188761	8.939281583	1.036578088
	SOS	2.938431072	8.249564957	1.022011556
	ABC	2.93843212	8.249566059	0.982279277
9	EPFM	2.824861796	10.47225927	0.869551938
	MLM	2.969093713	10.47311463	0.889549484
	SOS	2.803249784	10.16567707	0.860841843
10	ABC	2.803249659	10.16567742	0.860841848
	EPFM	2.757587495	11.72821533	0.982064225
	MLM	2.885180007	11.73811724	1.007545094
11	SOS	2.500539326	11.37318236	0.942404509
	ABC	2.494763278	11.40699189	0.942525427
	EPFM	2.061162654	9.019482043	1.11356985
12	MLM	2.171788742	9.049960909	1.113006916
	SOS	2.523388861	8.571365917	1.021959869
	ABC	2.523525868	8.571404076	1.021959871
13	EPFM	1.716321095	7.848924512	0.959466217
	MLM	1.763831225	7.887966999	0.960614025
	SOS	1.686378108	8.131140252	0.946971951
14	ABC	1.615935565	8.413819769	0.947260968
	EPFM	1.390579972	6.858483495	1.404128669
	MLM	1.523624512	6.976649336	1.371037576
15	SOS	1.644921194	6.192311987	1.342020413
	ABC	1.645575281	6.194206006	1.342043041
	EPFM	1.547648146	7.588513891	1.023703576
16	MLM	1.601892705	7.640100392	1.023121314
	SOS	1.527209518	8.037642206	1.023142593
	ABC	1.527749909	8.038734949	1.023142626

When Tables 1, 2, 3 and 4 are surveyed, It can be observed that metaheuristic algorithms give superior results than statistical methods. In this content, hourly average speed (V_{avg}), most likely speed (V_{mls}), maximum speed and wind power density (WPD) were deliberated utilizing the parameters identified by the probability method. Average speed, most likely speed, V_{max} and WPD values are specified in Tables 5, 6.

Table 2. Monthly Rayleigh parameters and error rates

Month	Method	k	c (m/s)	Total Absolute Error PDF)
1	EPFM	2	8.731662084	1.047152591
	MLM	2	6.300343352	1.366081151
	SOS	2	5.84163526	1.212501768
2	ABC	2	8.275893334	1.032868932
	EPFM	2	8.556390518	1.238829739
	MLM	2	6.226544481	1.497560071
3	SOS	2	7.610389021	1.206364316
	ABC	2	7.610389021	1.206326739
	EPFM	2	8.599539774	1.128228634
4	MLM	2	6.240416653	1.399599897
	SOS	2	7.708630802	1.102799364
	ABC	2	7.708630802	1.102799364
5	EPFM	2	7.50176564	1.24470644
	MLM	2	5.118123337	1.43945807
	SOS	2	6.48436174	1.150452937
6	ABC	2	6.48436174	1.150452937
	EPFM	2	8.059460861	1.147406513
	MLM	2	5.564677206	1.456989053
7	SOS	2	7.784568174	1.14330202
	ABC	2	7.784568079	1.14330202
	EPFM	2	8.965232692	1.125957118
8	MLM	2	6.027069385	1.472964291
	SOS	2	9.271317852	1.119462978
	ABC	2	9.271317852	1.119462978
9	EPFM	2	10.52574397	0.984574222
	MLM	2	7.020762202	1.124358562
	SOS	2	10.15707544	0.971734021
10	ABC	2	10.15707544	0.971734021
	EPFM	2	11.777429	1.035611668
	MLM	2	7.883916162	1.198967896
11	SOS	2	11.92195684	1.034259069
	ABC	2	11.92195684	1.034259069
	EPFM	2	9.015531887	1.133806407
12	MLM	2	6.286225309	1.439087393
	SOS	2	8.227730338	1.103912681
	ABC	2	8.227730338	1.103912681
13	EPFM	2	7.897205394	1.066779905
	MLM	2	5.763936027	1.535197342
	SOS	2	8.034220489	1.06405699
14	ABC	2	8.034220489	1.06405699
	EPFM	2	7.061048885	1.40451224
	MLM	2	5.410238036	1.585324399
15	SOS	2	6.322905066	1.352756353
	ABC	2	6.322905066	1.352756353
	EPFM	2	7.702498833	1.099015125
16	MLM	2	5.768359904	1.473046301
	SOS	2	7.724976848	1.098921919
	ABC	2	7.724976848	1.098921919

Table 3. Annual Weibull parameters and error rates

Year	Method	k	c (m/s)	Total Absolute Error PDF)
2018	EPFM	2.250149	8.534181	0.897163043
	MLM	2.358513	8.543171	0.9145299
	SOS	2.821013	7.843502	0.808812755
2019	ABC	2.821013	7.843502	0.808812755
	EPFM	1.857433	9.614972	0.980346637
	MLM	1.994699	9.694583	1.04043706
2020	SOS	1.809924	8.065538	0.810631753
	ABC	1.809924	8.065538	0.810631753
	EPFM	2.142101	9.59528	1.054014657
2021	MLM	2.237293	9.639677	1.071148791
	SOS	1.938589	9.258395	1.028914645
	ABC	1.938628	9.258457	1.02891552
2022	EPFM	2.140984	9.285866	1.072734491
	MLM	2.250454	9.326096	1.124340203
	SOS	1.887262	8.528088	1.002346029
2023	ABC	1.888214	8.529815	1.002355878
	EPFM	1.991107	8.7342	0.808026101
	MLM	2.089238	8.767511	0.833448118
2024	SOS	2.413021	7.580767	0.680924857
	ABC	2.413021	7.580767	0.680924857
	EPFM	1.324577	6.438738	0.794619966
2025	MLM	1.413673	6.544893	0.818395018
	SOS	1.391989	5.695548	0.769080567
	ABC	1.388009	5.732565	0.769250984

Table 4. Annual Rayleigh parameters and error rates

Year	Method	k	c (m/s)	Total Absolute Error PDF)
2018	EPFM	2	8.529405	0.953625763
	MLM	2	5.848135	1.085541793
	SOS	2	8.008161	0.93396745
2019	ABC	2	8.008161	0.93396745
	EPFM	2	9.635003	1.003059886
	MLM	2	6.859567	1.220425539
2020	SOS	2	7.911173	0.8375703
	ABC	2	7.911173	0.8375703
	EPFM	2	9.588652	1.042193133
2021	MLM	2	6.660969	1.333532937
	SOS	2	9.307622	1.031107434
	ABC	2	9.307622	1.031107434
2022	EPFM	2	9.279463	1.049004291
	MLM	2	6.434743	1.300527507
	SOS	2	8.47798	1.009771258
2023	ABC	2	8.47798	1.009771258
	EPFM	2	8.734933	0.80703664
	MLM	2	6.139414	1.138353325
2024	SOS	2	7.968295	0.750608413
	ABC	2	7.968295	0.750608413
	EPFM	2	6.68556	1.153322329
2025	MLM	2	5.247191	1.401980124
	SOS	2	5.841635	1.056066522
	ABC	2	5.841635	1.056066522

Table 5. Monthly wind speed and power values

Month	Vavg (m/s)	Vmls (m/s)	Vmax (m/s)	Standard Deviation (σ)	Power Density (P/A)	Turbine Power Output (W)
1	7.738234	4.585011516	30.9488277	4.428751217	58.66914426	294.871.12
2	7.582904	4.96709581	24.0713105	4.489829158	74.59265622	374.902.69
3	7.621144	5.731264396	29.0384063	4.462153762	114.5881724	575.920.15
4	6.648267	4.96709581	20.6325518	2.869962061	74.59265622	374.902.69
5	7.142511	6.495432982	21.7788047	3.31282396	166.8064269	838.369.10
6	7.945231	5.731264396	16.8117089	3.094777948	114.5881724	575.920.15
7	9.328198	5.731264396	18.7221304	3.410198699	114.5881724	575.920.15
8	10.43747	6.495432982	20.2504675	3.931218476	166.8064269	838.369.10
9	7.989807	5.731264396	22.9250576	3.909109217	114.5881724	575.920.15
10	6.998716	4.585011516	20.2504675	4.190261331	58.66914426	294.871.12
11	6.257692	3.82084293	25.9817319	4.414853274	33.95205108	170.643.01
12	6.826162	3.438758637	26.7459005	4.478762328	24.75104523	124.398.75

Table 6. Annual wind speed and power values

Month	Vavg (m/s)	Vmls (m/s)	Vmax (m/s)	Standard Deviation (σ)	Power Density (P/A)	Turbine Power Output (W)
2018	7,55898816	5,731264396	26,74590051	3,360655982	114,5881724	575.920,15
2019	8,53879884	5,731264396	30,94882774	4,610257326	114,5881724	575.920,15
2020	8,49772171	6,113348689	25,98173193	4,070751859	139,0676012	698.953,76
2021	8,22371015	7,259601568	22,54297329	3,901810491	232,8771183	1.170.440,40
2022	7,74113246	6,495432982	24,07131046	3,937277433	166,8064269	838.369,10
2023	5,92492356	3,82084293	29,03840627	4,473940855	33,95205108	170.643,01

In this study, the Nordex N60 model turbine, one of the most commonly utilized turbine types in Turkey, was employed to estimate wind power based on the 12-month average speed derived from the sampled wind data. The rated power of the Nordex N60 turbine is 1300 kW, the casing length is 60 m, the blade diameter is 60 m, and taking these technical specifications into consideration, the power output of a WPP with an installed power of 1.3 MW was calculated using Eq. 5. The results obtained are given in Tables 5 and 6.

The probability density function $f(V)$ indicates the probability of observing speed V at any moment, and the cumulative distribution function $F(V)$ indicates the probability that the speed observed at any moment is equal to or less than speed V . From Figure 1 to Figure 8, the probability density distributions of the Weibull and Rayleigh distribution corresponding to the wind speed of the 1st, 2nd and 3rd months and probability distributions for a sample year are shown. Although in this study, analyzes were made for 12 months and all years, functions were calculated and distribution graphs were prepared, only the graphs for the 1st, 2nd and 3rd months are given in the study. Other analyzes are also given in the appendix of the study. Calculation of Weibull and Rayleigh distribution parameters, average wind speed, maximum wind speed, pdf and cdf was performed with MATLAB R2019a.

When the graphs and tables given in the study are examined, it is seen that the absolute error values of the Weibull and Rayleigh parameters calculated with metaheuristic algorithms are quite small. When the obtained test results are compared with the real wind speed data, it is clearly seen that they are effective and accurate. In addition, as can be seen from the graphs, it is understood that the probability density distributions calculated with metaheuristic algorithms have a more successful and uniform distribution.

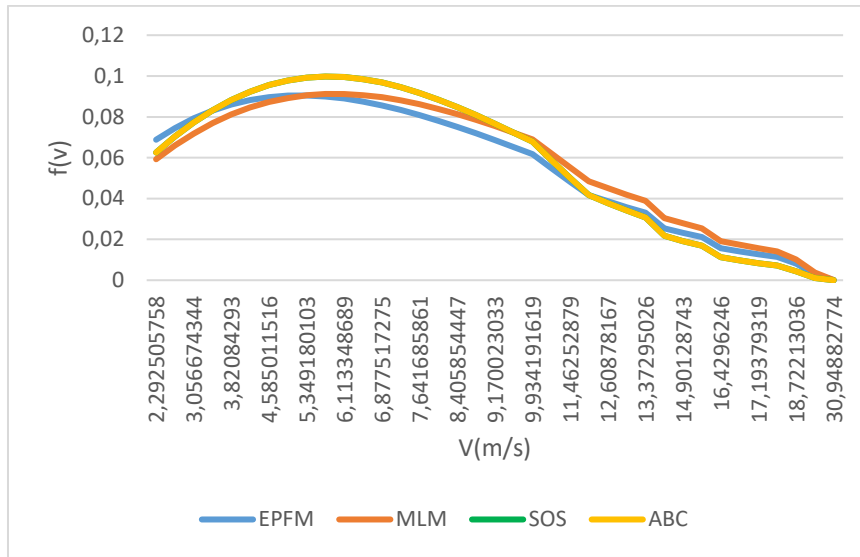


Figure 1. Weibull distribution probability density functions for the 1st month

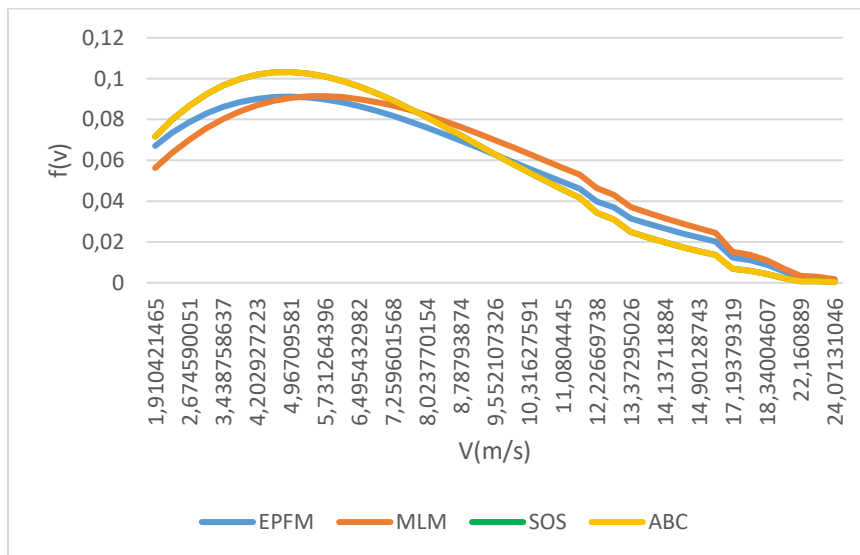


Figure 2. Weibull distribution probability density functions for the 2nd month

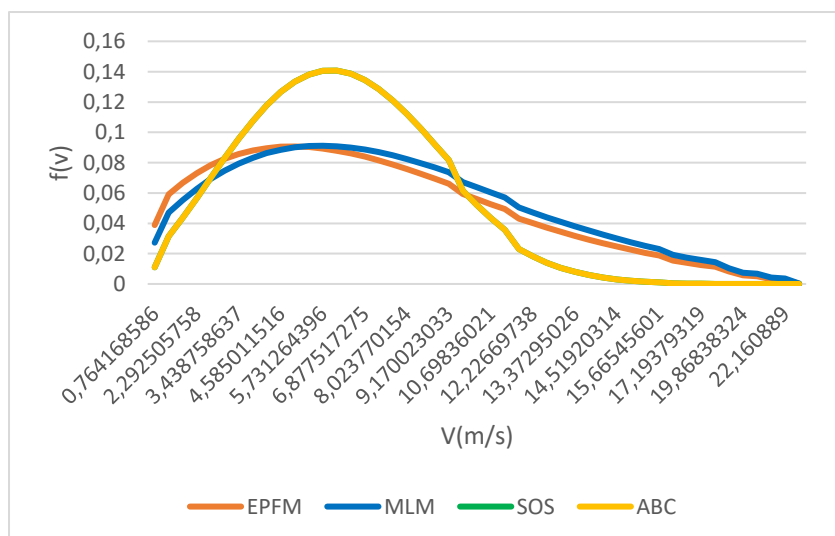


Figure 3. Weibull distribution probability density functions for the 3rd month

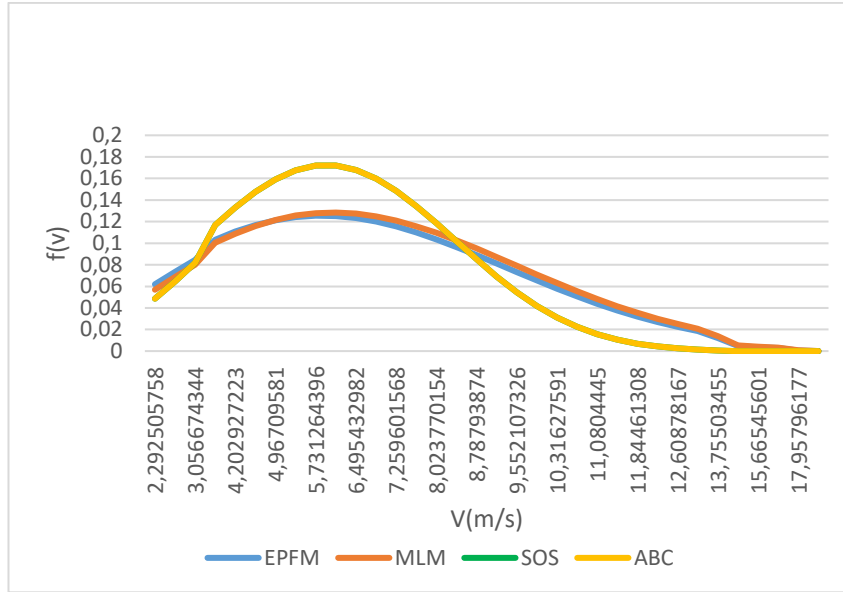


Figure 4. Weibull distribution probability density functions for the 4th month

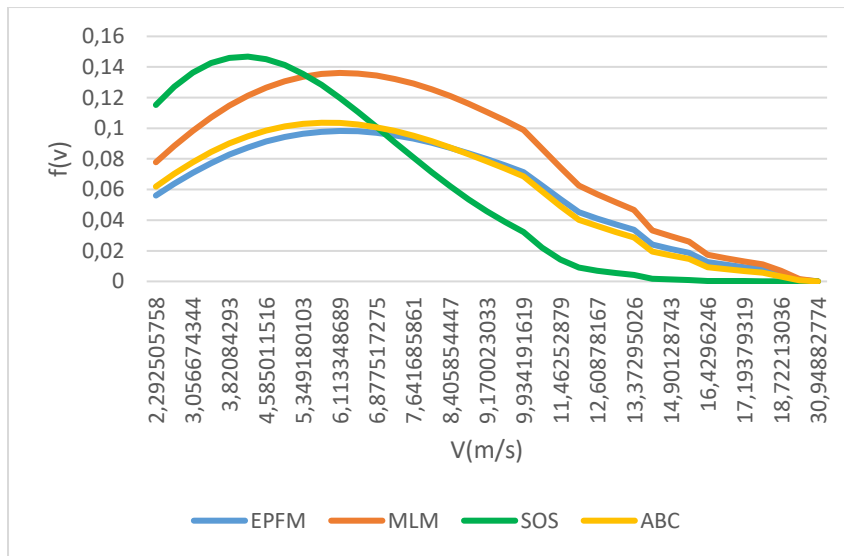


Figure 5. Rayleigh distribution probability density functions for the 1st month

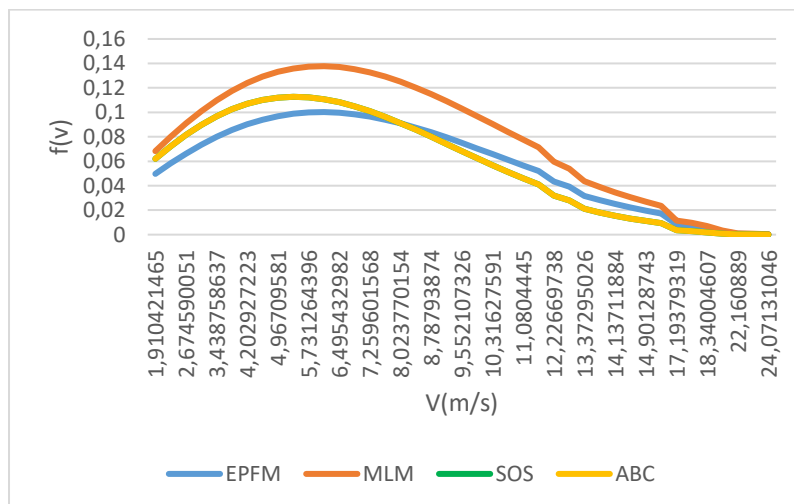


Figure 6. Rayleigh distribution probability density functions for the 2nd month

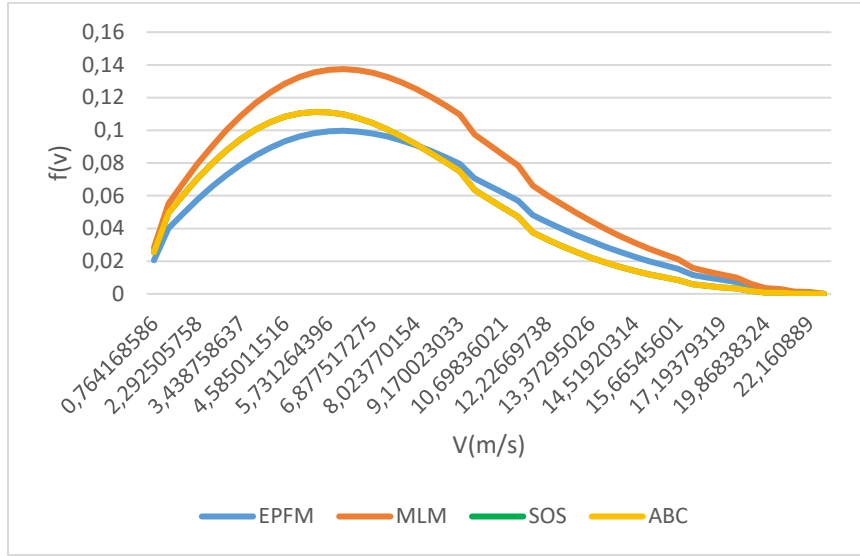


Figure 7. Rayleigh distribution probability density functions for the 3rd month

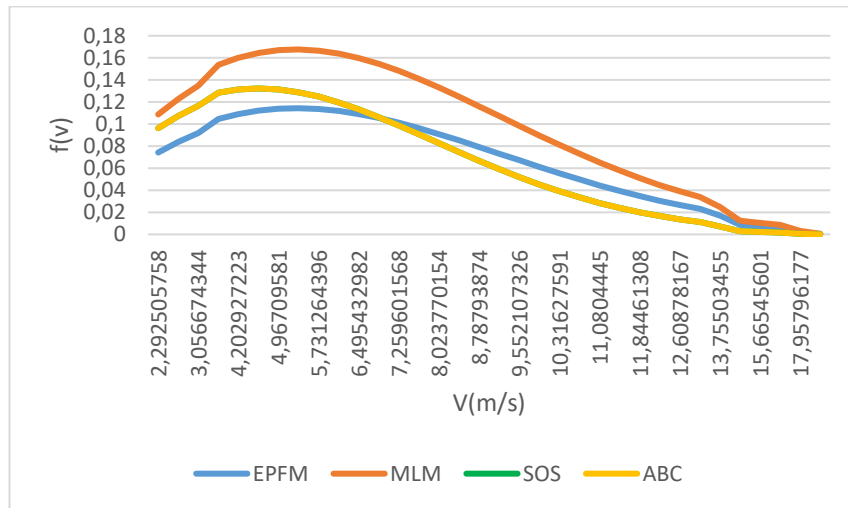


Figure 8. Rayleigh distribution probability density functions for the 4th month

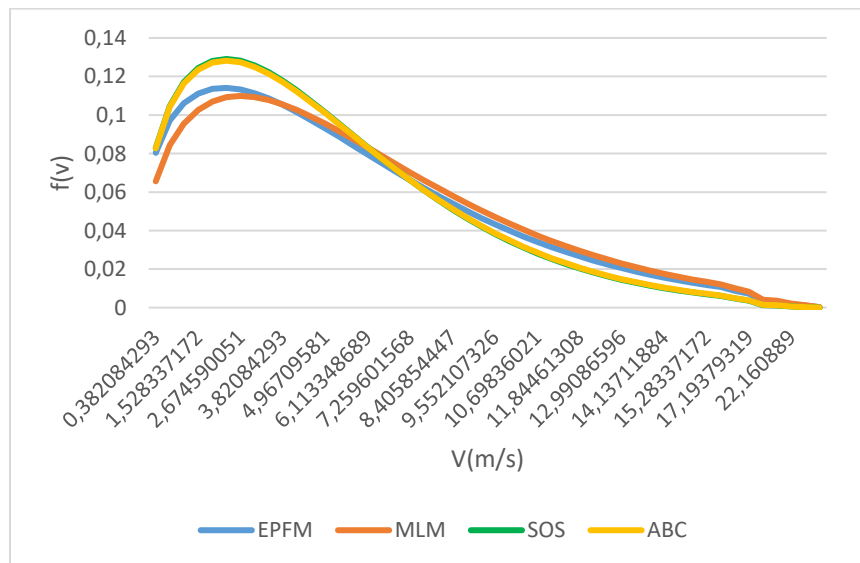


Figure 9. Annual Weibull distribution probability density functions

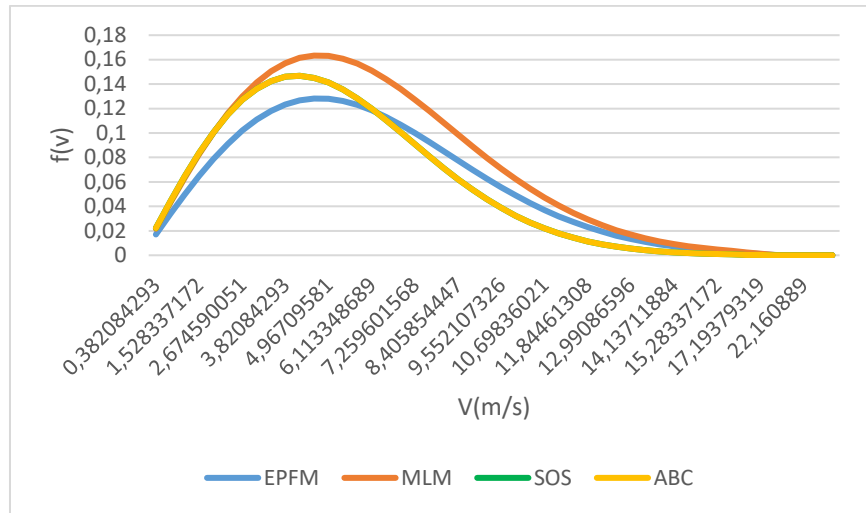


Figure 10. Annual Rayleigh distribution probability density functions

5. Discussion

In this section, firstly, a study was conducted to verify the effectiveness of the proposed methods. Then, comparison test results were given on the graphs to make the solutions of the experimental results of the proposed algorithms understandable. The parameters of stochastic wind energy were solved using both statistical methods and SOS and ABC metaheuristic algorithms. Thus, error analyzes were calculated according to the results obtained using different Weibull parameter estimation methods and the accuracies of the methods were compared.

The stochastic situation of modern power systems has been in existence for many years and continues to be one of the most fundamental problems today. In this study, since the wind speed is uncertain for any time interval, Weibull probability density function (PDF) is used to estimate the wind speed. In the solution of the problem, the effectiveness of the methods is investigated by using metaheuristic-based methods and statistical methods. Since the discovery and neighborhood search ability of the algorithm is improved in metaheuristic methods, local optimum traps are avoided and optimum values are increased. When the proposed MHS algorithms are applied to the test functions, it is clearly seen that the algorithms are successful in calculating the stochastic wind power parameters and provide effective and accurate results. In summary, as a result of the comprehensive experimental study, the proposed MHS algorithms are presented to the literature as one of the effective MHS methods that can be used in obtaining the stochastic wind power parameters.

6. Results

In the designing and modeling of modern power systems, both the power ranges of the load and the power ranges of generation are utilized as input variables. While the capacity factor is traditionally taken into account in the generation of power ranges of dispatchable power plants for generation series, the implementation of probabilistic approaches in generating power series for wind and solar sources is crucial for ensuring accurate modeling of power systems.

In this study, probabilistic approaches such as the Weibull and Rayleigh distribution methods were utilized to derive the power series of WPPs. The accuracy of the methods was investigated by using statistical methods and metaheuristic algorithms to calculate the parameters of these distribution methods. In order to achieve this objective, wind speed data measured in daily periods for previous years (2017-2023) for Turkey were used as an example. With these data, 12-month average wind speed, maximum wind speed, power density and wind power were determined using both Weibull and Rayleigh distribution. Probability density functions and cumulative distribution functions obtained from different statistical and metaheuristic methods were created for the data used. Accordingly, it has been clearly seen that metaheuristic algorithm methods provide more effective results in estimating the parameters of stochastic wind energy. Based on these significant experimental findings,

metaheuristic algorithms can indeed be employed to address various power system challenges within larger power systems that integrate diverse renewable energy sources. In summary, as can be understood from the comprehensive experimental study, it has been presented to the literature that effective MHP methods can be used in solving power systems problems.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] J. Wang, J. Hu and K. Ma, "Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 881–899, 2016.
- [2] J. Zhang, Y. Wei, Z. Tan, K. Wang and W. A. Tian, "Hybrid method for short-term wind speed forecasting," *Sustainability*, vol. 9, no.4, pp. 1-10, April 2017.
- [3] Z.R. Shu, Q.S. Li and P.W. Chan, "Investigation of offshore wind energy potential in Hong Kong based on weibull distribution function," *Appl. Energy*, vol.156, pp. 362–373, 2015.
- [4] M. Elshahed, M. M. Elmarsafawy and H. Z. Eldin, "Stochastic chance constraint with discrete probabilities of wind sources in economic dispatch," *International Conference on Renewable Power Generation, April 2016*. doi:10.1049/cp.2015.0389
- [5] N. Masseran and A.M. Razali, "Modeling the wind direction behaviors during the monsoon seasons in peninsular Malaysia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1419–1430, 2016.
- [6] J.F. Manwell, J.G. Mccowan and A.L. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application," *Second Edition; JohnWiley & Sons, New York, NY, USA, 2010*.
- [7] P.K. Goyal and T.K. Datta, "Effect of wind directionality on the vulnerability of rural houses due to cyclonic wind." *Nat. Hazards Rev.*, vol. 14, pp. 258–267, 2013.
- [8] T. V. Ramachandra and B. V. Shruthi, "Wind energy potential mapping in Karnataka, India, using GIS," *Energy Convers. Manag.*, vol. 46, no. 9–10, pp. 1561–1578, 2005. doi: 10.1016/j.enconman.2004.07.009
- [9] E. Dokur and M. Kurban, "Wind Speed Potential Analysis Based on Weibull Distribution," *Balk. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 231–235, 2015. doi:10.17694/bajece.72748
- [10] E. C. Morgan, M. Lackner, R. M. Vogel, and L. G. Baise, "Probability distributions for offshore wind speeds," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 15–26, 2011. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.015
- [11] P. Ramírez and J. A. Carta, "Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind speed probability density distribution: a case study," *Energy Convers. Manag.*, vol.46, no.15–16, pp.2419–2438, 2005. doi:10.1016/j.enconman.2004.11.004
- [12] S. Vela, "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis case studies in the Canary Islands," vol. 13, pp. 933–955, 2009. doi:10.1016/j.rser.2008.05.005
- [13] O. A. Jaramillo and M. A. Borja, "Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case," vol.29, pp.1613–1630, 2004. doi:10.1016/j.renene.2004.02.001
- [14] A. Serban, L. S. Paraschiv and S. Paraschiv, "Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 250–267, April 2020. doi:10.1016/j.egy.2020.08.048
- [15] P. Wais, "A review of Weibull functions in wind sector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, pp. 1099–1107, February 2017. doi:10.1016/j.rser.2016.12.014
- [16] M. Ali, M. K. Mridul and A. Al Mahbub, "Comparative wind power assessment by weibull distribution function in Faridpur," *Proc. 2020 11th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. ICECE 2020*, pp. 13–16, 2020. doi:10.1109/ICECE51571.2020.9393088
- [17] I. Y. F. Lun and J. C. Lam, "A study of Weibull parameters using long-term wind observations," *Renew. Energy*, vol. 20, no. 2, pp. 145–153, 2000. doi:10.1016/S0960-1481(99)00103-2
- [18] A. S. S. Dorvlo, "Estimating wind speed distribution," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 17, pp. 2311–2318, 2002. doi:10.1016/S0196-8904(01)00182-0
- [19] S. H. Pishgar-Komleh, A. Keyhani and P. Sefeedpari, "Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkoo county of Iran)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 313–322, 2015. doi:10.1016/j.rser.2014.10.028
- [20] A.H. Shahirinia, E.S. Soofi and D.C. Yu. "Probability distributions of outputs of stochastic economic dispatch," *Electrical Power*

and Energy Systems, vol.81, pp. 308–316, 2016.

[21] G.J. Osorio, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalao, "A probabilistic approach to solve the economic dispatch problem with intermittent renewable energy sources," *Energy*, vol. 82, pp. 949-959, 2015.

[22] T.G. Hlalele, R.M. Naidoo, J. Zhang and R.C. Bansal, "Dynamic Economic Dispatch With Maximal Renewable Penetration Under Renewable Obligation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 38794-38808, 2020.

[23] S. N. Keshmiri and W. Gao, "Multi-Objective Stochastic Economic Dispatch," *IEEE, North American Power Symposium 2010*, doi:10.1109/NAPS.2010.5619590

[24] J. Hetzer, D. C. Yu and K. Bhattacharai, "An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 23, No. 2, pp. 603-611, June 2008.

[25] A. Albani and M.Z. Ibrahim, "Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Rayleigh Models of Selected Site in Malaysia," *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, Vol.9, No.4 pp. 393-406, 2014. doi:10.1234/pjsor.v9i4.580

[26] C.Peng, H. Sun, J. Guo and G. Liu, "Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm," *Electrical Power and Energy System*, vol.42, pp.119–126, 2012.

[27] H.T. Jadhav, R. Roy, "Gbest guided artificial bee colony algorithm for environmental economic dispatch considering wind power," *Expert Systems with Applications*, vol.40, pp.6385–6399, 2013.

[28] S. Velamuri, S. Sreejith, P. Ponnambalam, "Static economic dispatch incorporating windfarm using Flower pollination algorithm," *Perspectives in Science*, vol.8, pp. 260-262, 2016.

[29] E. Arriagada, E. López, M. López and J. Vannier Claudio, "A Stochastic Economic Dispatch Model with Renewable Energies Considering Demand and Generation Uncertainties," *IEEE Grenoble Conference*, DOI: 10.1109/PTC.2013.6652496, 2013.

[30] Z. Zhang and Y. Sun, "A versatile probability distribution model for wind power forecast errors and its application in economic dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.28, no.3, pp.3114-3125 august 2013.

[31] Z. Demirkol and M. Çunkaş, "The Renewable Energy Potential for Afyonkarahisar," *Selcuk University Journal of Engineering Science and Technology*, May 2014. doi:10.15317/Scitech.201416130

[32] M. Kurban, Y. Kantar and F.O. Hocaoglu, "Statistical analysis of wind speed and power densities using weibull distribution," *Afyon Kocatepe University Journal of Science*, vol.7, no.2, pp.205-218, 2007.

[33] X. Liu, "Economic load dispatch constrained bywind power availability: a wait-and-see approach," *IEEE Transactions On Smart Grid*, vol.1, No.3, pp. 347-355, December 2010.

[34] C. Peng, H. Sun, J. Guo and G. Liu, "Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol.42, pp. 119–126, 2012.

[35] H.T. Jadhav, R. Roy, "Gbest guided artificial bee colony algorithm for environmental/economic dispatch considering wind power," *Expert Systems with Applications*, vol.40, pp. 6385–6399, 2013.

[36] Z. Zhang, Y.Z. Sun, D.W. Gao, J. Lin and L. Cheng, "A versatile probability distribution model for wind power forecast errors and its application in economic dispatch," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol.28, no.3, pp. 3115-3125, August 2013.

[37] F. Zia and M. Nasir, "Optimization methods for constrained stochastic wind power economic dispatch," *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013), Langkawi, Malaysia*. pp.1-5, June 2013.

[38] Q. Han, Z. HaoHu, T. F. Chu, "Non-parametric models for joint probabilistic distributions of wind speed and direction data," *Renew. Energy 2018*, vol.126, pp. 1032–1042, 2018.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Production and Investigation of Properties of Nickel Particle Reinforced AA5083 Matrix Metal-Metal Composites

Serdar Özkaya^{a*}

Submitted: 22.05.2024 Revised: 03.07.2024 Accepted: 29.07.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A10

ABSTRACT

The aim of this study is to develop metal-metal composites reinforced with nickel powder using an AA5083 aluminium alloy matrix by powder metallurgy methods and to investigate their properties. In order to analyse the influence of different amounts of nickel particles on the AA5083-Ni composite, specimens were prepared by incorporating nickel at 5%, 10% and 15% by weight. To achieve a uniform distribution of nickel particles, the matrix and composite powders were mixed in ball mills for five hours. These powders were then hot pressed at 500°C under a pressure of 500 MPa for two hours in an argon gas atmosphere to produce the samples. These samples were then tested for microstructure, hardness, density, tensile properties and corrosion behaviour to assess the effect of varying nickel content on the AA5083-Ni metal-metal composites.

Keywords: Powder metallurgy, Metal matrix composite, Mechanical alloying, AA5083, Nickel

^{a*} Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Dept. of Metallurgy and Materials Engineering 61080 Trabzon, Türkiye
Orcid: 0000-0001-7121-4979
e mail: sozkaya@ktu.edu.tr
*Corresponding author: sozkaya@ktu.edu.tr

Nikel Parçacık Takviyeli AA5083 Matrisli Metal-Metal Kompozitlerinin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, AA5083 alüminyum alaşım matrisi kullanılarak toz metalurjisi yöntemleriyle nikel tozu takviyeli metal-metal kompozitler geliştirmek ve özelliklerini incelemektir. Farklı miktarlardaki nikel partiküllerinin AA5083-Ni kompoziti üzerindeki etkisini analiz etmek için, %5, %10 ve %15 ağırlık yüzdelerinde nikel eklenerek numuneler üretilmiştir. Nikel partiküllerinin homojen bir dağılımını elde etmek için matris ve kompozit tozlar bilyalı değirmenlerde beş saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra, bu tozlar argon gazı atmosferinde iki saat boyunca 500 MPa basınç altında 500°C'de sıcak preslenmiş ve numuneler oluşturulmuştur. Bu numuneler daha sonra değişen nikel içeriğinin AA5083-Ni metal-metal kompozitler üzerindeki etkisini değerlendirmek için mikroyapı, sertlik, yoğunluk, çekme özellikleri ve korozyon davranışları açısından test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz metalurjisi, metal matrisli kompozitler, mekanik alaşımlama, AA5083, Nikel

1. Introduction

Aluminium Metal Matrix Composites (AMMCs) have attracted considerable attention in engineering and technology due to their remarkable properties such as light weight, high strength, exceptional wear resistance and excellent thermal conductivity. [1–4]. The production of AMMCs is aimed at obtaining a material with enhanced properties by combining the properties of the base alloy with those of the reinforcing particles. The AA5083 alloy, known as the lowest density series of aluminium alloys, has been identified as a suitable material for use in the aerospace and automotive industries due to its outstanding properties such as high strength, rigidity and wear resistance [1,2,5]. With an approximate magnesium content of 4%, AA5083 also exhibits high corrosion resistance, making it a preferred material in areas such as shipbuilding and pressure vessels. To date, research studies have reinforced AA5083 alloy with ceramic particles by casting, powder metallurgy and other conventional methods to further enhance its desired properties [2]. Leading these ceramic reinforcements are SiC, Al₂O₃, B₄C, Graphene, and TiB₂[6–10]. However, due to some weaknesses caused by ceramic reinforcing particles, this strategy has been limited in improving the mechanical properties of aluminium alloys. The main drawback of such ceramic reinforcements is the low wettability between the reinforcement and matrix phases. In particular, due to the low wettability between the matrix and reinforcement phases, many studies aimed at developing ceramic particle reinforced metal matrix materials have reported interfacial bonding problems [6,11,12]. This low interfacial bonding prevents the material from achieving the desired strength values [3]. In addition, delamination and agglomeration of ceramic reinforcing particles are common problems. To overcome these problems, the idea of metal-metal composites has emerged in recent years and research has begun in this area. In metal-metal composites, since both the matrix and reinforcement phases are metals, strong bonding is expected due to intermetallic formation at the interfaces and the expected reactions between the matrix and reinforcement phases. In this context, previous studies have used Cu, Ni, Cr and 316L SS powders as reinforcing materials in metal-metal composites [3]. Among the materials under consideration, nickel stands out as one that has a positive impact on mechanical properties, corrosion resistance, and wear behaviour. The effect of nickel addition on the hardness and strength properties of metal matrix composites manifests through two different mechanisms. Firstly, nickel hinders dislocation movement, and secondly, it influences the grain size of the matrix phase. Furthermore, previous studies have shown that nickel passivates the material surface, protecting it against corrosion. These effects are just a few examples of the beneficial impacts of nickel addition in metal matrix composites. Nevertheless, it has been observed in certain studies that nickel reinforcement can result in the formation of nickel carbide, a brittle phase, which has a detrimental impact on the strength and ductility properties of the material. Consequently, nickel has both beneficial and detrimental effects on composite materials. The extent to which these effects prevail depends on the quantity of nickel present and the interactions between nickel and the matrix material. A review of the literature reveals numerous studies on the mechanical, corrosive, and tribological properties of AA5083 matrix ceramic particle-reinforced materials [13–15]. However, no studies have been found on metal particle-reinforced metal-metal composites with an AA5083 matrix. In this study, AA5083/Ni metal-metal composites were produced using the mechanical alloying method, and the effect of varying nickel content on the mechanical properties and corrosion behavior of AA5083/Ni composites was investigated.

2. Experimental Study

In this study, AA5083-Ni metal-metal composites were produced using the mechanical alloying method, an advanced stage of the powder metallurgy technique, and the effect of nickel reinforcement amount on the mechanical and corrosive properties of the composite was examined. AA5083 powders were used as the matrix phase, with their chemical composition shown in Table 1.

Table 1. Chemical Composition of AA5083

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
Composition wt. (%)	0.4	0.4	0.1	0.4-1.0	4.0-4.9	0.25	0.15	0.05-0.25	Balance

Firstly, composite powders containing 5%, 10%, and 15% by weight of Ni were prepared, and these powders were mechanically alloyed in high-energy mills for 5 hours. Subsequently, these samples were coded as A0 (unreinforced), A5, A10, and A15 respectively. After the mechanical alloying process, these

powders were hot-pressed under a pressure of 500 MPa at 500°C for 2 hours in a protective argon gas atmosphere. After metallographic processing, the samples were examined for density/porosity, microstructure, hardness, and tensile strength from a mechanical perspective. The Brinell hardness values of the metallographically prepared samples were measured using an Innovatest-Nemesis 9000 model testing device according to ASTM E10-18 standards, applying a load of 31.25 kg with a 2.5 mm diameter indenter. Tensile strength tests of the samples were conducted using an MTS Criterion Universal testing machine at a tensile speed of 1 mm/min in accordance with ASTM E8 standards. Additionally, to examine the effect of Ni reinforcement on corrosive properties, potentiodynamic polarization tests were performed using a Gamry Reference 3000 corrosion test device following the guidelines specified in ASTM G59-97 standards. The corrosion tests were conducted in an aqueous solution of 3.5% by weight NaCl at room temperature. The corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (I_{corr}) values of each sample were determined to evaluate their corrosion performance. The flow chart of the experiments performed in this study is shown in Figure 1.

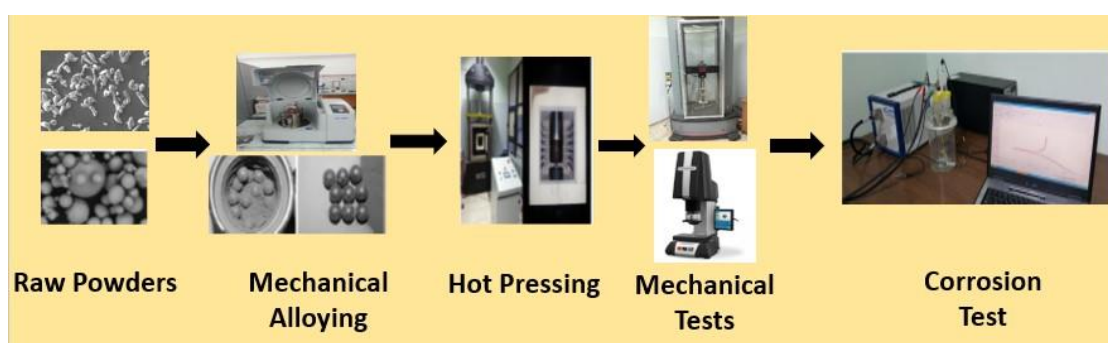


Figure 1. Flow chart of experimental study

3. Results And Discussions

3.1. Microstructural investigation

Microstructure images of samples containing nickel particles in different proportions are seen in Figure 2. In the microstructure images, white, light gray, and gray regions represent nickel, AA5083, and intermetallic phases, respectively. As seen from the images, nickel particles are homogeneously distributed within the structure, and an intermetallic phase surrounding the nickel particles is observed (Figure 2-d). An elemental mapping photograph is also available in Figure 2-e. In the photograph, the green coloured regions represent the Nickel phase and the red coloured regions represent the AA5083 phase. As seen in the photo, green areas are also seen around the pure nickel particles. These green areas are due to the intermetallic phase formed between Ni and AA5083. In other words, it is understood from the elemental map pictures that an intermetallic phase is formed around the nickel particles by dissolving the nickel phase in the AA5083 matrix. The formation of this phase is the most significant result expected in this study, as it is anticipated to improve the strength values through the formation of this interphase. Indeed, in the literature review related to composite materials, it is observed that the formation of an intermetallic phase, where two phases dissolve into each other as a result of the bond formation between reinforcement and matrix phases, is the most desired bonding structure. In previous studies on metal matrix composites, it has been stated that in composites consisting of metal matrix and ceramic reinforcement compositions, there is no good wetting and bonding at the metal/ceramic interface. Moreover, ceramic particles cannot improve the strength values to the desired extent by separating from the structure. In microstructure examinations, the formation of intermetallic at the interface is considered a positive result for the development and use of a new type of reinforcement in metal matrix composites, opening the way for further studies in this regard.

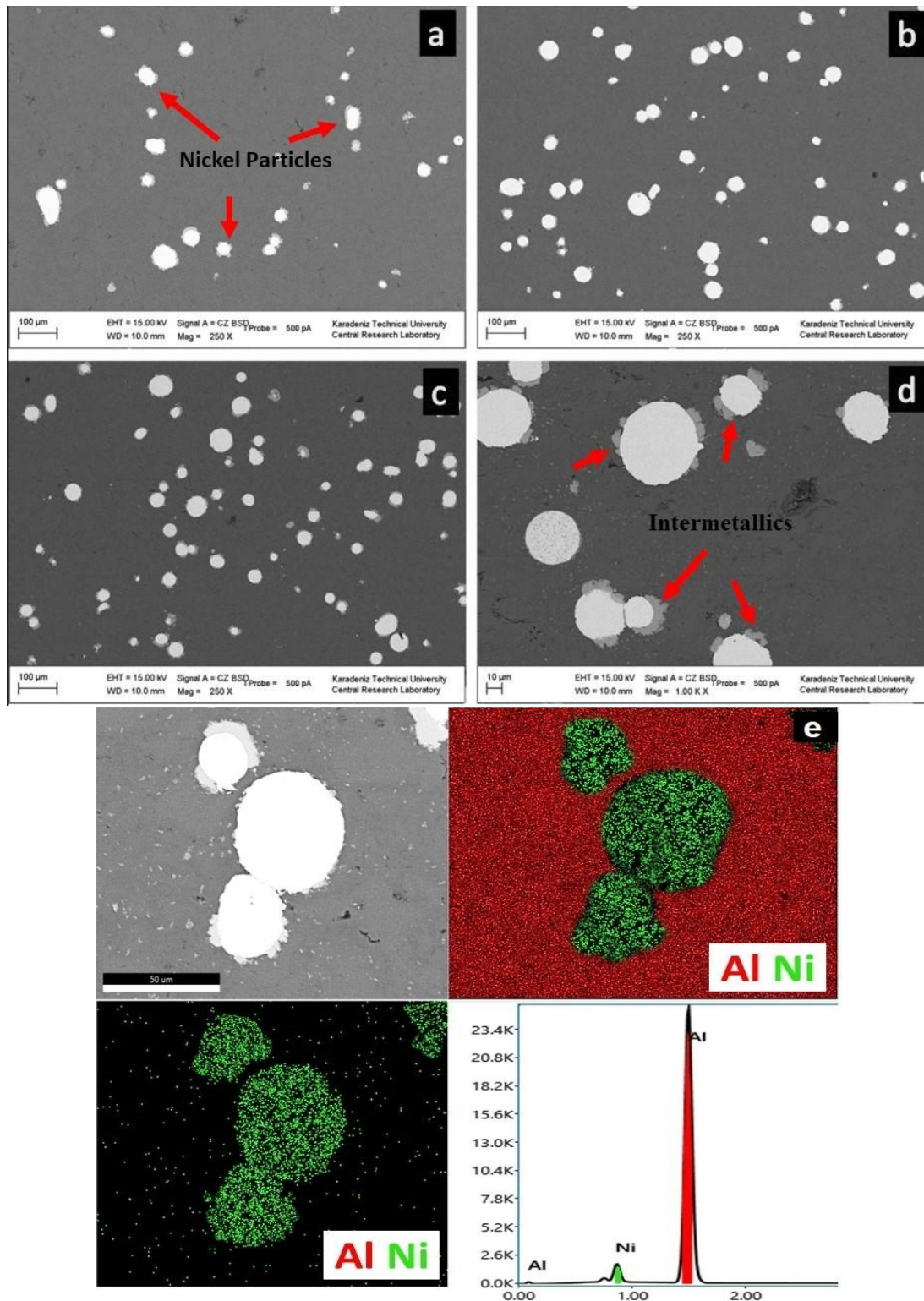


Figure 2. Microstructures of a) A5 b) A10 c) A15 samples (250x) d) high magnified microstructure of A15 (1000x) e)Elemental mapping of A15

3.2. Investigation of porosity and hardness

In Figure 3, graphs showing the changes in hardness and relative density of the samples depending on the increasing Ni content are presented. Firstly, examining the relative density curve, it is observed that the highest relative density value of 98% is obtained in the A0 sample, and this value decreases with

the increasing Ni content, reaching the lowest value of 83% in the A15 sample. The relative density value is the inverse of porosity. In other words, a decrease in the relative density value indicates an increase in the porosity of the sample. In this study, the decrease in relative density with the increasing Ni content can be explained by the fact that nickel particles are harder than the AA5083 phase [3,10]. To explain comparatively, in the A0 sample, only AA5083 powders were pressed, achieving the highest relative density values. However, when Ni particles, which are harder than AA5083, were added to the structure, they resisted pressing and packing. As a result, the formation of micro-scale pores between the powders negatively affected the packing of the powders. Therefore, with the increasing Ni content, approximately 17% porosity was observed in the A15 sample. When examining the macro hardness of the samples, it was found that the lowest hardness value was obtained in the unreinforced A0 sample, while the highest hardness value was obtained in the A15 sample containing 15% nickel by weight. The primary reason for this change in hardness can be directly explained by the rule of mixtures, where the added nickel particles are harder than the AA5083 phase. To elaborate, the hardness of the AA5083 phase is approximately 85 Brinell in the literature, while nickel alloy hardness ranges from 125 to 250 Brinell. Thus, the high hardness of the nickel phase added as a reinforcement phase directly increased the hardness of the composite structure. However, it might seem contradictory that the nickel phase increases both hardness and porosity simultaneously since the general expectation is that increased porosity would decrease hardness. To explain this apparent contradiction in terms of hardness and porosity, it can be stated that the contribution of the nickel particles to hardness outweighs the negative impact caused by the increase in porosity.

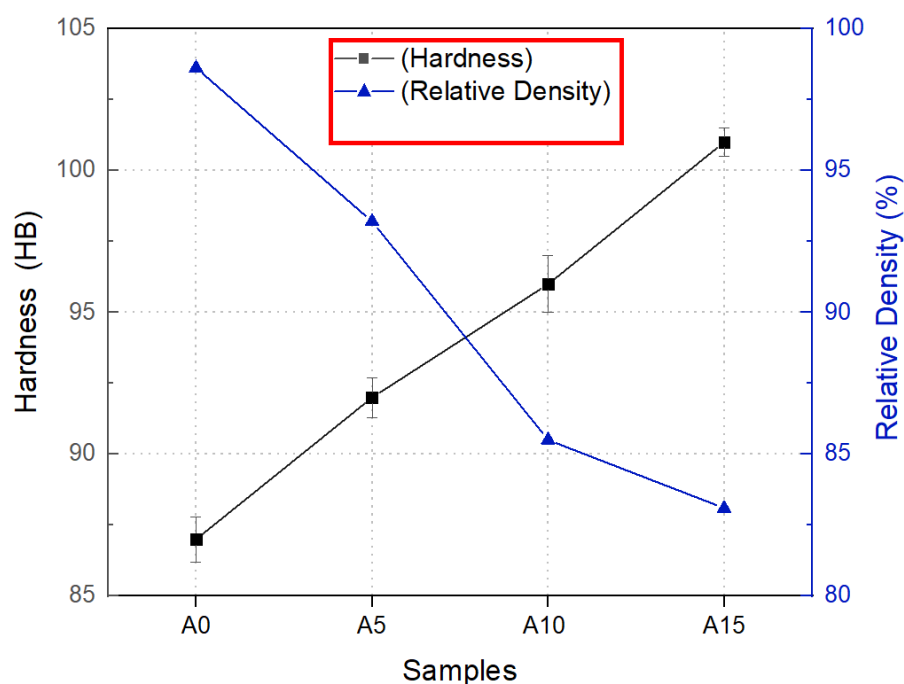


Figure 3. Graphs of the hardness and relative density of the samples

3.3. Tensile strength

Figure 4 shows the tensile stress-strain curves of the composite samples. Upon examination of Figure 4, it is observed that the highest tensile strength value is obtained in sample A15, while the lowest value is obtained in sample A0. However, it is noted that the elongation values decrease with increasing reinforcement content, indicating a decrease in ductility values. The increase in tensile strength with increasing Ni content can be attributed to the high elastic modulus of nickel, which is significantly higher than that of the AA5083 alloy, and its transfer of this property to the matrix material. In other words, the nickel particles added to the structure directly contribute to an increase in strength. However, porosity examinations have indicated that the increase in Ni content also increases porosity. It has been observed in literature studies that an increase in porosity leads to a decrease in strength values; hence, there appears to be a contradiction between porosity and strength values in this study. This phenomenon can be explained by the strength property of nickel, which is transferred to the composite structure and compensates for the loss due to porosity. Similar examples can be found in

the literature. Another result obtained from tensile tests is the decrease in elongation with increasing nickel content. While the AA5083 alloy exhibits good ductility, the nickel particles added to the structure hinder dislocation movement, creating resistance to plastic deformation. Additionally, nickel particles can cause stress concentrations at matrix-matrix and matrix-reinforcement interfaces, further impeding plastic deformation and adversely affecting the ductility properties of the composite material.

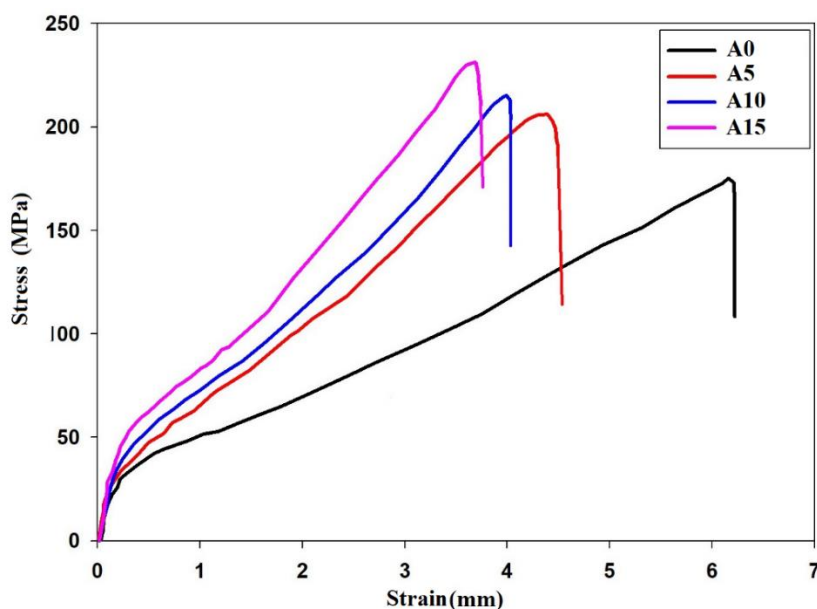


Figure 4. Stress-strain plots of samples

3.3. Investigation of corrosion

The Tafel plots and the numerical results obtained from these plots are given in Figure 5 and Table 2 respectively. Firstly, when we evaluate the samples in terms of corrosion potential, we see that the A10 sample has the highest E_{corr} value (-695 mV). This indicates that it is in a more passive state compared to the other samples and has a lower tendency to corrode. When we examine the values for the A15 sample, we observe that it has the lowest E_{corr} value, meaning that the A15 sample has the highest tendency to corrode. In terms of corrosion current density, the A5 sample has the highest I_{corr} value ($9.00 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), and therefore, the highest corrosion rate. The A15 sample, on the other hand, has the lowest I_{corr} value, indicating that it has the lowest corrosion rate. There is a contradiction between the E_{corr} and I_{corr} values; while the A15 sample has the highest corrosion potential when evaluated in terms of E_{corr} , it also has the lowest corrosion rate when evaluated in terms of I_{corr} . This situation is due to the high potential of the A15 sample to transition from a passive to an active state due to the influence of intermetallics in the structure, despite its low corrosion rate. The A0 sample has a moderate corrosion potential, and its corrosion resistance is better than that of the A5 and A10 samples but lower than that of the A15 sample. The A10 sample, with an E_{corr} of -695 mV, has the most positive corrosion potential, meaning it has the lowest tendency to corrode. However, with a corrosion current density of $7.59 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, the A10 sample has a moderate corrosion rate, indicating that its corrosion resistance is lower than that of the A15 sample but better than that of the A5 and A0 samples. In conclusion, the A15 sample, despite having the lowest corrosion rate, should be examined carefully in the long term due to its highly negative corrosion potential. The A10 sample has the most positive corrosion potential, indicating the lowest tendency to corrode, but it has a moderate corrosion rate. The A5 sample has the highest corrosion rate and the lowest corrosion resistance. The A0 sample, in general, has moderate corrosion resistance and rate. These analyses provide important insights into the corrosion resistance and behavior of each sample in a given environment.

Table 2. Corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current of the samples obtained from Tafel plots

Sample Code	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)
A0	-746	5.33
A5	-723	9.00
A10	-695	7.59
A15	-749	3.35

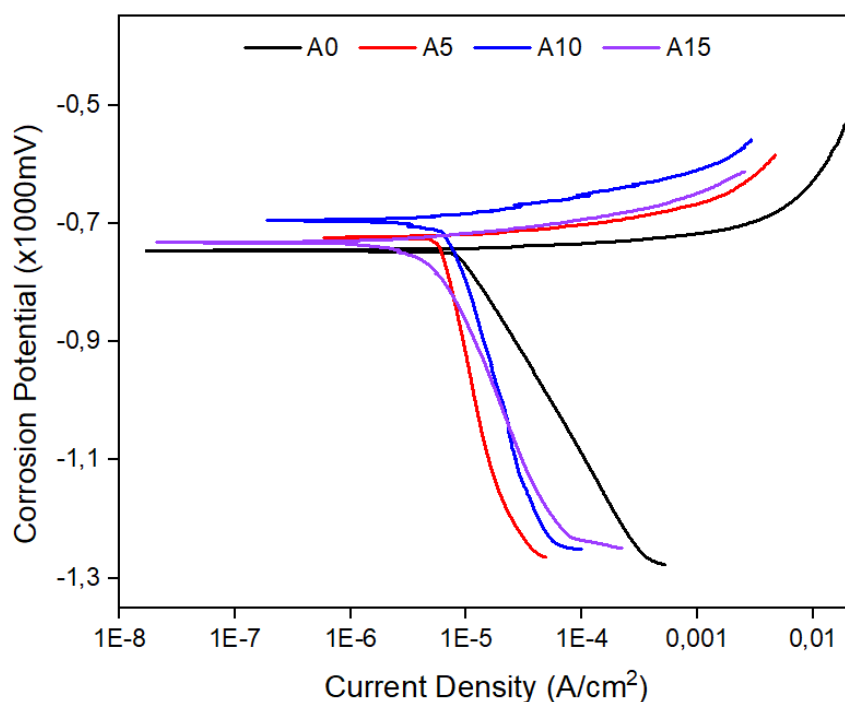


Figure 5. Tafel plot of the A0, A5, A10 and A15 samples in 3.5 wt.% NaCl solution

4. Conclusions

AA5083-Ni matrix metal-metal composites were successfully produced using the powder metallurgy method, which involves compacting and sintering metal powders to create a solid material. This method proved effective in achieving a uniform distribution of nickel particles within the AA5083 matrix. The homogeneous dispersion of nickel particles was evident in the microstructure, where an intermetallic phase formed between the nickel particles and the AA5083 matrix, indicating a strong bond and interaction between the two components. The study revealed that increasing the nickel content in the composites had a significant impact on their mechanical properties. Specifically, higher nickel concentrations resulted in increased hardness values. This enhancement in hardness can be attributed to the presence of the hard intermetallic phases and the reinforcement effect of the nickel particles. However, a trade-off was observed, as the relative density values of the composites decreased with higher nickel content. This decrease in density might be due to the introduction of porosity or voids during the powder metallurgy process, which could not be entirely eliminated. Furthermore, the tensile strength of the composites improved with the addition of more nickel. This increase in tensile strength suggests that the nickel particles effectively reinforced the AA5083 matrix, enhancing its ability to withstand tensile loads. On the other hand, the elongation values of the composites decreased as the nickel content increased. This reduction in ductility is likely a consequence of the brittleness introduced by the intermetallic phases and the reduced capacity of the composite to undergo plastic deformation. Corrosion resistance was another critical aspect evaluated in the study. The A15 sample,

with the highest nickel content, exhibited the highest corrosion potential when assessed in terms of the corrosion potential (E_{corr}). This indicates that the A15 sample was more resistant to corrosion compared to the other samples. Conversely, the A10 sample showed the lowest tendency to corrode, suggesting that its corrosion resistance was the least effective among the samples tested. These findings highlight the complex interplay between nickel content and the various properties of AA5083-Ni composites, providing valuable insights for optimizing their composition for specific applications.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] N. M. Jasmin, M. Saravanakumar, R. N. Suja, A. Deshini, S. Srikanth, S. Ram and S. D. Kumar, "Influence of AlN reinforcement on properties of AA5083 matrix composite," *Mater Today Proc*, vol. 74, pp. 64–67, Jan. 2023. doi:10.1016/J.MATPR.2022.11.103
- [2] C. N. Shyam Kumar, D. Yadav, R. Bauri, and G. D. Janaki Ram, "Effects of ball milling and particle size on microstructure and properties 5083 Al-Ni composites fabricated by friction stir processing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 645, pp. 205–212, Oct. 2015. doi:10.1016/j.msea.2015.08.026
- [3] A. Canakci, S. Ozkaya, F. Erdemir, A. H. Karabacak, and M. Celebi, "Effects of Fe–Al intermetallic compounds on the wear and corrosion performances of AA2024/316L SS metal/metal composites," *J Alloys Compd*, vol. 845, no. 2020, 2020. doi:10.1016/j.jallcom.2020.156236
- [4] G. Singh and N. Sharma, "Evolution of Physical and Mechanical Properties of Al5083/B4C Composites fabricated through Stir Casting," *Mater Today Proc*, vol. 21, pp. 1229–1233, Jan. 2020. doi:10.1016/J.MATPR.2020.01.074
- [5] S. A. Hosseini, K. Ranjbar, R. Dehmlaei, and A. R. Amirani, "Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing," *J Alloys Compd*, vol. 622, pp. 725–733, Feb. 2015. doi:10.1016/J.JALLCOM.2014.10.158
- [6] H. Jamshidi Aval and I. Galvão, "Microstructural characterization and corrosion-resistance behavior of friction stir-welded A390/10 wt% SiC composites-AA2024 Al alloy joints," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, Apr. 2024. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e27714
- [7] A. M. Sadoun, A. F. Meselhy, and A. W. Abdallah, "Microstructural, mechanical and wear behavior of electroless assisted silver coated Al203–Cu nanocomposites," *Mater Chem Phys*, vol. 266, p. 124562, Jul. 2021. doi:10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124562
- [8] A. Canakci, T. Varol, H. Cuvalci, F. Erdemir, S. Ozkaya, and E. D. Yalcin, "Synthesis of novel CuSn10-graphite nanocomposite powders by mechanical alloying," *Micro Nano Lett*, vol. 9, no. 2, pp. 109–112, 2014. doi:10.1049/MNL.2013.0715
- [9] G.V.N.B. Prabhakar, Y.V.R.S.N.P. Kumar, P. D. Kumar, B. P. Kumar, M. G. Raju, Sk. Naseema, N. R. Kumar, M. Jagannatham and B. R. Sunil, "Producing Al5083-CNT composites by friction stir processing: influence of grain refinement and CNT on mechanical and corrosion properties," *Mater Today Proc*, vol. 15, pp. 44–49, Jan. 2019. doi:10.1016/J.MATPR.2019.05.022
- [10] A. H. Karabacak, A. Çanakçı, F. Erdemir, S. Özkaya, and M. Çelebi, "Effect of different reinforcement on the microstructure and mechanical properties of AA2024-based metal matrix nanocomposites," *International Journal of Materials Research*, vol. 111, no. 5, pp. 416–423, May 2020. doi:10.3139/146.111901
- [11] H. Jamshidi Aval and I. Galvão, "Microstructure and corrosion behavior of A390-10 wt.% SiC composite-AA2024-T6 aluminum alloy dissimilar joint: effect of post-weld heat treatment," *Mater Chem Phys*, p. 129468, May 2024. doi:10.1016/J.MATCHEMPHYS.2024.129468
- [12] T. Varol, A. Çanakçı, Ş. Özşahin, M. Beder, and S. B. Akçay, "Prediction of effect of fabrication parameters on the properties of B4C ceramic particle reinforced AA2024 matrix nanocomposites using neural networks," *Mater Today Commun*, p. 109279, May 2024. doi:10.1016/J.MTCOMM.2024.109279
- [13] Y. Wang, C. Weng, H. Sun, and B. Jiang, "Tribological properties and corrosion resistance of nickel-based composite mold inserts containing lubricant nanoparticles for micro-injection molding," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 5280–5293, Sep. 2023. doi:10.1016/J.JMRT.2023.08.241
- [14] S. Tabrez, K. K. Gaur, V. Kumar, P. Jha, H. Nautiyal, A. Salam and S. Singh, "Nickel metal matrix composites reinforced with solid lubricants: A comprehensive review," *Mater Today Proc*, Jul. 2023. doi:10.1016/J.MATPR.2023.07.081
- [15] M. Bala, V. D. Shivling, and S. Tyagi, "Synergistic impact of nickel ferrite and titanium dioxide composites for improving microwave absorption in X-band," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 304, p. 117388, Jun. 2024. doi:10.1016/J.MSEB.2024.117388

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Fuzzy Backstepping Control of Industrial Liquid Level System

Nursel Sahin^a, Meral Ozarslan Yatak^{*b}

Submitted: 09.05.2024 Revised: 02.07.2024 Accepted: 07.07.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A08

ABSTRACT

Keywords: backstepping control, fuzzy backstepping, liquid level, process control, GUNT RT 512

^a, Gazi University,
Institute of Science,
Dept. of Electrical and Electronics
Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4328-4221
e mail: nursel.sahin1@gazi.edu.tr

^{b*} Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Electrical and Electronics
Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1091-1647

*Corresponding author:
ozarslanm@gazi.edu.tr

This paper presents a fuzzy backstepping controller design to improve the control performance of GUNT RT 512 industrial liquid level system. This system performs the process of reaching the liquid in the level tank to the level reference entered by the controller on it. The original control algorithm run on the ontroller is PID. In this study, the system is tested with a classical backstepping controller and fuzzy backstepping controller. The fuzzy logic controller determines one of the most important parameters of the backstepping controller. Constant and variable liquid levels are applied to the liquid level controller system. The system's dynamic responses are evaluated on response time, settling time, overshoot, and especially steady-state error. The parameter most in need of improvement is the steady-state error for the classical backstepping controller as this controller typically offers asymptotic tracking. Furthermore, the fuzzy backstepping proposes the exact tracking. The simulation results show that improvement has been achieved in almost all performance parameters with the proposed controller.

Endüstriyel Sıvı Seviye Sisteminin Bulanık Geri Adımlı Kontrolü

ÖZ

Bu makale, GUNT RT 512 endüstriyel sıvı seviye sisteminin denetim performansını iyileştirmek için, bir bulanık geri adımlı kontrolör tasarımı sunmaktadır. Bu sistem, seviye tankındaki sıvının, girilen seviye referansına ulaşması işlemini denetleyici ile gerçekleştirmektedir. Denetleyici üzerinde çalıştırılan orijinal denetim algoritması PID'dir. Bu çalışmada sistem klasik geri adımlı denetleyici ve bulanık geri adımlı denetleyici ile test edilmiştir. Bulanık mantık denetleyici, geri adımlı denetleyicinin en önemli parametrelerinden birini belirlemektedir. Sıvı seviye denetim sistemine sabit ve değişken sıvı seviyeleri uygulanmıştır. Sistemin dinamik tepkileri tepki süresi, yerleşme süresi, aşım ve özellikle kararlı durum hatası açısından değerlendirilmiştir. İyileştirmeye en çok ihtiyaç duyulan parametre, klasik geri adımlı denetleyici için kararlı durum hatasıdır. Çünkü bu denetleyici tipik olarak asimptotik izleme sunmaktadır. Tersine, bulanık geri adımlı tam izleme önermektedir. Simülasyon sonuçları, önerilen denetleyici ile neredeyse tüm performans parametrelerinde iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: geri adımlı kontrol, bulanık geri adımlama, sıvı seviyesi, süreç kontrolü, GUNT RT 512

1. Introduction

Liquid level control is crucial for production continuity and quality in industrial processes. This control plays an important role in many different systems such as tanks, reactors, storage tanks, pipelines, and chemical processes. For instance, controlling the liquid level in oil storage tanks is critical to the efficiency and safety of refinery operations in the petroleum industry [1]. In the chemical industry, accurately controlling the liquid level in reactors has a direct impact on product quality and process efficiency. Controlling the liquid level in storage tanks is critical for maintaining product quality and the proper execution of processes in the food industry.

Industrial liquid level systems measure liquid level through sensors and generate the necessary control signals based on these measurements with a control algorithm. The control input is used to maintain the liquid level at the reference value or to monitor a specific reference level. This process ensures that the liquid level is continuously monitored and intervenes when necessary to maintain the desired level.

PID controllers are frequently used to control liquid level systems due to their reliability, simple structure, and easy parameter tuning [2-4]. However, these controllers with fixed parameters are often inadequate in eliminating system errors and are generally unsuitable for the control of nonlinear systems since they cannot adapt to changing conditions. Therefore, various control methods such as fuzzy control, backstepping control, adaptive control, and sliding mode control are used to deal with nonlinearity and parameter uncertainties in temperature, pressure, level, humidity, velocity, and flow.

The backstepping approach is used to control nonlinear systems through feedback. The determination of the control rule is based on the Lyapunov theorem [5]. The main advantage of using this method is the fast response to disturbances by taking into account the nonlinearity of the system. Especially in nonlinear systems such as liquid level control, the ability of the backstepping approach to react quickly to disturbances is an important advantage. Literature reviews support that this method can be quickly adapted to liquid level control systems and provide the desired performance. Recent studies show that the backstepping approach in liquid level control is increasing. Yang et al. [6] suggest a robust backstepping control method based on a finite-time disturbance observer for output tracking of a three-tank system in the presence of uncertainties. A finite-time virtual control is designed for the output tracking of the system along with a dynamic surface control technique. Theoretical analysis is performed on the whole system. Gomaa et al. [7] proposed a command-filtered backstepping control method for liquid level monitoring in a nonlinear coupled three-tank system. The standard backstepping controller was tested experimentally and found that the control signal fluctuates rapidly between two thresholds, which would damage the pump. The obtained results confirm the effectiveness and practical use of the proposed approach. Meng et al. [8] present an integral backstepping control approach based on a disturbance observer for a two-tank liquid level system under external disturbances. The simulation and experimental findings validate that the integral backstepping control methodology based on disturbance observer exhibits favorable dynamic and static performance compared to the disturbance observer-based sliding mode control approach. Meng et al. [9] extended a compound control method and implemented a novel disturbance observer-based feedback linearization control strategy for a four-tank liquid level system. The simulation and experimental studies, as well as comparisons between the PID control of the system and the proposed control strategy, show that it offers significant advantages including minor control errors and robust disturbance suppression capabilities. Table 1 shows the summary of key findings for the literature.

The main objective of the liquid level controller is to reach the reference level quickly, accurately, and stable. This can be ensured with robust control algorithms. Among them, the backstepping controller, which is based on the Lyapunov Theorem, guarantees stability. However, it does not guarantee the exact desired level. So, there is mostly steady state error with the classical backstepping controller. To overcome this, fuzzy logic control is used and the system response is improved.

In this study, modeling of the liquid level control using the fuzzy backstepping method is carried out. The backstepping control method offers an effective control strategy with repeated backward steps to reach the reference value. Nevertheless, the classical backstepping method enables asymptotic tracking. Upon reaching the target state, the system typically stabilizes at a position that is close to the target but not precisely at the target. This results in a continuous steady-state error. To solve this problem, fuzzy logic controller is used in this study.

Table 1. Key findings of existing research

Name	System	Approach	Results
Robust nonlinear control of a three-tank system using finite-time disturbance observers [6]	Inteco three-tank system	Finite-time disturbance observer-based robust control method by using backstepping design	The system exhibits input-to-state practical stability (ISpS), ensuring that the total error remains bounded despite the presence of uncertainties. These uncertainties no longer significantly influence the system's long-term behavior."
Command-Filtered Backstepping Control of Multitank System [7]	Inteco three-tank system	Command-Filtered Backstepping Control	Demonstrates robust tracking performance for liquid level and control signal
Disturbance Observer-Based Integral Backstepping Control for a Two-Tank Liquid Level System Subject to External Disturbances [8]	Liquid level system with two tanks of four-tank NTC-I type.	Disturbance observer-based integral backstepping control	The disturbance observer-based integral backstepping control methodology exhibits superior dynamic and static performance compared to the disturbance observer-based sliding mode control approach. The proposed controller demonstrates significantly improved steady-state and transient response characteristics relative to various complex algorithms.
Disturbance Observer-Based Feedback Linearization Control for a Quadruple-Tank Liquid Level System [9]	Quadruple-tank liquid level (QTLL) system	Input/output feedback linearization control method by utilizing nonlinear disturbance observer	The proposed control scheme demonstrates superior performance relative to PID control and disturbance observer-based sliding mode control (DO-SMC). This advantage manifests in reduced control error and enhanced disturbance rejection capabilities.
This study	GUNT RT 512 single tank liquid level system	Fuzzy backstepping control	The proposed controller overcomes the steady state error exactly. The control performance gets better with the fuzzy approach.

Fuzzy logic controllers are used to address the uncertainties inherent in the system, to improve the decision algorithm, and to control nonlinearities more adaptively. In this study, a fuzzy backstepping control algorithm is established by adjusting the backstepping stability constant. The fuzzy backstepping algorithm provides robust control by managing the uncertainties and variations of the system. Classical backstepping control and fuzzy backstepping control algorithms are implemented for the liquid level system to compare the control performance. The performance criteria for the controllers are the desired characteristics for the transient and steady-state terms of the dynamic response, which are steady-state error (e_{ss}), rise time (t_r), peak time (t_p), settling time (t_s), and percentage overshoot (M_p %). The results show that the fuzzy backstepping approach has improved the control performance. The designed controllers are tested for increasing-decreasing trajectories with fixed reference values. As a result, it is shown that fuzzy backstepping control provides more effective control than classical backstepping control.

The organization of this paper is as follows: Section 2 covers the technical specifications of the controlled system, its mathematical model, the backstepping control algorithm, and fuzzy logic control. Section 3 details the design of the fuzzy backstepping controller. Section 4 presents the simulation results for specific level data. Finally, section 5 presents the conclusions drawn.

2. System Description and Problem Statement

2.1. System description

The GUNT RT 512 liquid level controller has a similar operation to the process controllers commonly used in industry. The block diagram including the components of the system is shown in Figure 1. The main purpose of the system is to arrange the liquid in the level tube to the specified value. For this purpose, the pressure information of the liquid is sensed and converted into current information with the pressure/current sensor and compared with the reference level information by the controller. Accordingly, the current information to be transmitted to the pneumatic control valve is determined by the controller. The liquid in the system circulates in a continuous loop, as the liquid pump continuously delivers liquid to the level tube and the outlet valve continuously discharges liquid. The controller adjusts the current information controlling the pneumatic control valve to achieve the desired liquid level.

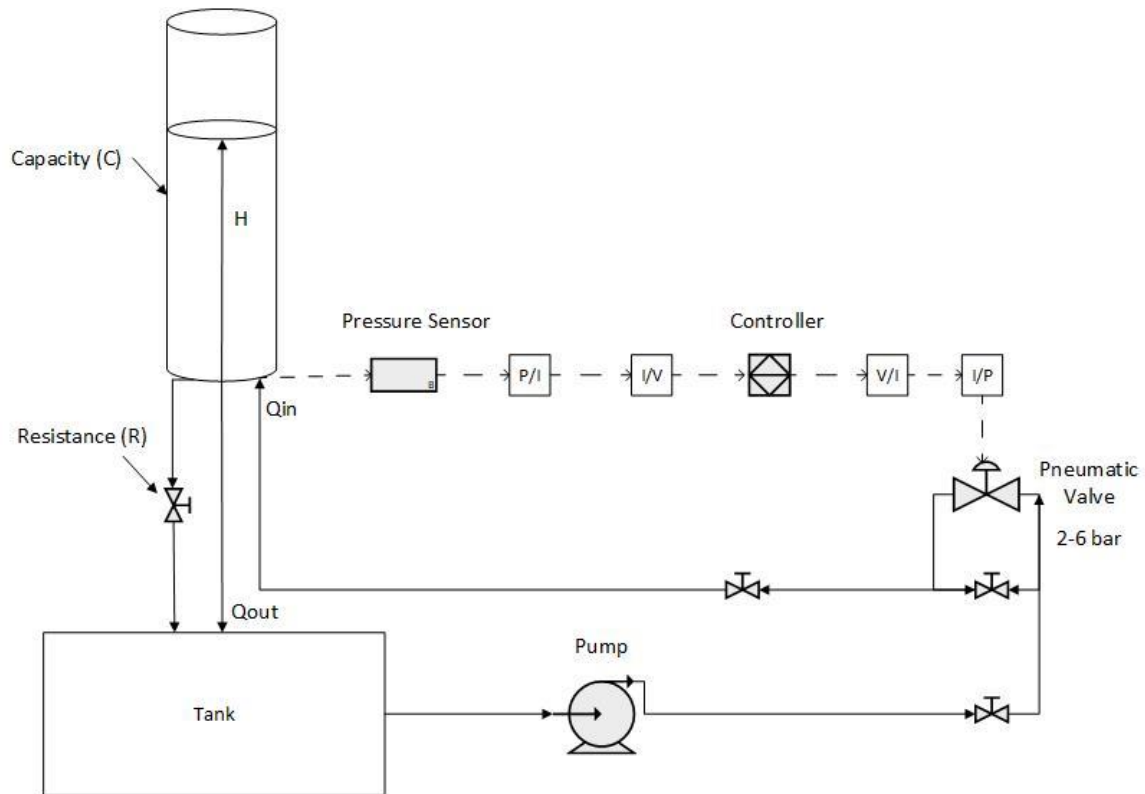


Figure 1. System components of the liquid level controller, GUNT RT 512.

Since there is a pipe valve at the outlet of the GUNT RT 512 liquid level system, resistance occurs in the system. This resistance R is expressed by change in liquid height in the system H with liquid flow out of the liquid level tank Q_{out} . The resistance of the system is found in Equation 1.

$$R = \frac{\text{Change in liquid height (mm)}}{\text{Fluid flow to the outside (mm}^3/\text{sn)}} = \frac{H}{Q_{out}} \quad (1)$$

The ratio of the change in liquid volume to the change in liquid height is the capacity of the level tank, C , and is expressed by Equation 2.

$$C = \frac{\text{Change in liquid volume (mm}^3\text{)}}{\text{Change in liquid height (mm)}} = \frac{dV}{dH} \quad (2)$$

In this case, the level tank is thought to be linear, the difference between the flow of water entering the level tank and the flow leaving the level tank is expressed in Equation 3, taking into account the capacity.

$$C \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3)$$

Using Equation 1 and Equation 3, Equation 4 is obtained.

$$RC \frac{dH}{dt} + H = RQ_{in} \quad (4)$$

Equation after taking the Laplace transform of Equation 4, Equation 5 is obtained.

$$G_t(s) = \frac{H(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{R}{RAs+1} \quad (5)$$

Fluid resistance to obtain a mathematical model of the system R and capacitance C values should be calculated. Ergüzel calculated these values as $R=0.012$ and $A=10032$ in his study [5]. In this case, the Transfer Function is obtained as Equation 6.

$$G_t(s) = \frac{0.012}{(0.012 \cdot 10032)s + 1} = \frac{0.012}{120.38s + 1} \quad (6)$$

The amount of liquid sent to the liquid level tube depends on the opening of the pneumatic valve. The pneumatic valve used in the system is controlled by current. With the 4-20 mA current supplied to the pneumatic valve, the valve operates and the liquid is transferred to the liquid level tube via Q_{in} , which is the liquid flow at the valve outlet. The gain of the pneumatic valve is calculated as $K_v = 14000$ in the case indicated by [10]. In this case, the Transfer Function of the process is obtained in Equation 7.

$$\begin{aligned} G_p(s) &= K_v(s) * G_t(s) \\ &= 14000 * \frac{0.012}{(0.012 \cdot 10032)s + 1} = \frac{168}{120.38s + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2. Backstepping control

Backstepping is a control strategy used in the control of dynamic systems. This strategy is often effective in controlling systems with nonlinearities and uncertainties. Stabilizing the system's states in the direction of the origin, which is thought to be the equilibrium point is the control objective. Backstepping control's fundamental concept is to decompose a complex nonlinear system into smaller subsystems that don't go beyond the system's order, and then create a virtual control element based on Lyapunov functions for each smaller subsystem [11].

Backstepping control defines control surfaces and designs control laws for these surfaces to guide the system to the desired target. In backstepping control, there is a control signal, called virtual control, which is not applied on the real system but is calculated as a part of the backstepping algorithm. The virtual control is used to determine the control surfaces in the backstepping steps performed and to steer the system towards the desired behavior. Self-iteration is important in determining the success of the backstepping control algorithm and how fast the system reaches the desired goal. A Lyapunov function is formulated to encompass the entirety of the system, incorporating parameter estimations. The Lyapunov function is used to analyze the stability of the backstepping control algorithm. As an example, the mathematical model of the backstepping control algorithm of a third-order system is considered.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + x_2^2 \\ \dot{x}_3 &= u \end{aligned} \quad (8)$$

The state variables are x_1 , x_2 , and x_3 . The control input is u . Designing a state feedback control for asymptotically stabilizing the origin is the control's goal.

1. The first state variable is $x_1 = z_1$ and the derivative of this state variable is expressed in Equation 9.

$$\dot{x}_1 = \dot{z}_1 = x_2 + x_1^2 \quad (9)$$

x_2 is considered to be a real control variable. Additionally, a virtual control law is described for Equation 9 and a variable, α_1 is defined. z_2 is the error that is the difference between the real and virtual control variables. It is given in Equation 10.

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (10)$$

Equation 9 is rewritten in Equation 11.

$$\dot{z}_1 = \alpha_1 + x_1^2 + z_2 \quad (11)$$

The goal is to design a virtual control law α_1 while $z_1 \rightarrow 0$. At this stage, the first Lyapunov candidate function is defined as in Equation 12.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (12)$$

The derivative of the Lyapunov function is calculated in Equation 13.

$$\dot{V}_1 = z_1(\alpha_1 + x_1^2) + z_1 z_2 \quad (13)$$

A suitable virtual control α_1 is selected to stabilize the first-order system.

$$\alpha_1 = -C_1 z_1 - x_1^2 \quad (14)$$

$$\dot{\alpha}_1 = -(C_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (15)$$

The derivative of V_1 is rewritten with positive C_1 in Equation 16.

$$\dot{V}_1 = -C_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (16)$$

If z_2 is 0, in other words, the real control variable equals the virtual control, then $\dot{V}_1 = -C_1 z_1^2$ and a asymptotic convergence of z_1 to zero is assured.

2. The derivative of the error, z_2 , and a virtual control law is expressed in Equation 17.

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \\ &= x_3 + x_2^2 + (C_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \end{aligned} \quad (17)$$

α_2 is selected as a virtual control law. A virtual control input, x_3 , is identified. z_3 is calculated as an error to define the difference between real and virtual controls.

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (18)$$

Equation 17 is updated.

$$\dot{z}_2 = z_3 + \alpha_2 + x_2^2 + (C_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (19)$$

The aim is to $z_2 \rightarrow 0$. Here, new Lyapunov function is defined.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (20)$$

The derivative of this function is expressed in Equation 21.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -C_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2(z_3 + \alpha_2 + x_2^2 + (C_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2)) \\ &= -C_2 z_2^2 + z_2(\alpha_2 + z_1 + x_2^2 + (C_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2)) + z_2 z_3 \end{aligned} \quad (21)$$

A suitable virtual control α_2 is selected.

$$\alpha_2 = -z_1 - C_2 z_2 - x_2^2 - (C_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (22)$$

\dot{V}_2 is recalculated.

$$\dot{V}_2 = -C_1 z_1^2 - C_2 z_2^2 + z_2 z_3 = -\sum_{i=1}^2 C_i z_i^2 + z_2 z_3 \quad (23)$$

There is an asymptotic assurance that z_1 and z_2 converge to zero if $z_3 = 0$ and so $\dot{V}_2 = -\sum_{i=1}^2 C_i z_i^2$.

3. The steps are repeated for the error, $z_3 = x_3 - \alpha_2$.

$$\dot{z}_3 = u - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1}(x_2 + x_1^2) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2}(x_3 + x_2^2) \quad (24)$$

As mentioned above, $x_3 = u$ and so the real control input is u . The aim is designing the real control input u so that z_1, z_2 , and z_3 converge to zero. The selected Lyapunov candidate function V_3 is in

Equation 25.

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2 \quad (25)$$

The derivative is given in Equation 26.

$$\dot{V}_3 = - \sum_{i=1}^2 C_i z_i^2 + z_3(u + z_2 - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1}(x_2 + x_1^2) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2}(x_3 + x_2^2)) \quad (26)$$

The control input u is designed for $\dot{V}_3 \leq 0$.

$$u = -z_2 - C_3 z_3 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1}(x_2 + x_1^2) + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2}(x_3 + x_2^2) \quad (27)$$

Derivative of the Lyapunov candidate function V_3 is taken.

$$\dot{V}_3 = - \sum_{i=1}^3 c_i z_i^2 \quad (28)$$

2.3. Fuzzy Logic Control

A fuzzy logic controller, an effective tool for modeling and regulating complex systems, offers more adaptable and flexible solutions in real-world applications. This presents a problem-solving methodology within control systems, offering an algorithmic framework for converting expert-derived linguistic control strategies into automatic control strategies [12].

Fuzzy logic controllers are primarily based on fuzzy sets and fuzzy rules and effectively employ uncertainty and non-discrete concepts to comprehend and forecast the system's behavior, which enhances control performance and guarantees system stability.

An iterative control method, backstepping control, offers obvious advantages for control systems with mismatched uncertainty and is useful for nonlinear systems to handle disturbances and uncertainties [13]. However, in general, backstepping control algorithms are thought to be ineffective control strategies for fixing steady-state errors. This is because backstepping typically offers asymptotic tracking, meaning the system keeps going until it reaches the desired state. Nevertheless, upon reaching the target state, the system generally attains stabilization in proximity to the target rather than precisely at the target location. To overcome this and enhance the robustness and effectiveness while simultaneously improving the dynamic response of the systems, some methods have been developed. Backstepping control with an integral function is the most common method to lower the steady-state error [14]. The other method is to use a fuzzy logic controller [13].

In this study, the function of fuzzy logic in fuzzy backstepping control is to adjust the parameter of the corresponding backstepping controller, c_2 control gain, according to the state of the system. Thus, a stepback controller with variable control gain is obtained. The fuzzy logic controller has two inputs and one output. The relevant error z_1 and its derivative, \dot{z}_1 , in other words, z_2 , are taken as inputs and are given with Equation 29 and Equation 30. The control gain c_2 is the control input value for the liquid level control system. The block diagram of the fuzzy logic backstepping controller is given in Figure 2.

$$z_1 = h_{ref} - h_{out} \quad (29)$$

$$z_2 = \dot{z}_1 \quad (30)$$

h_{ref} is the reference liquid level value and h_{out} is the system liquid level output.

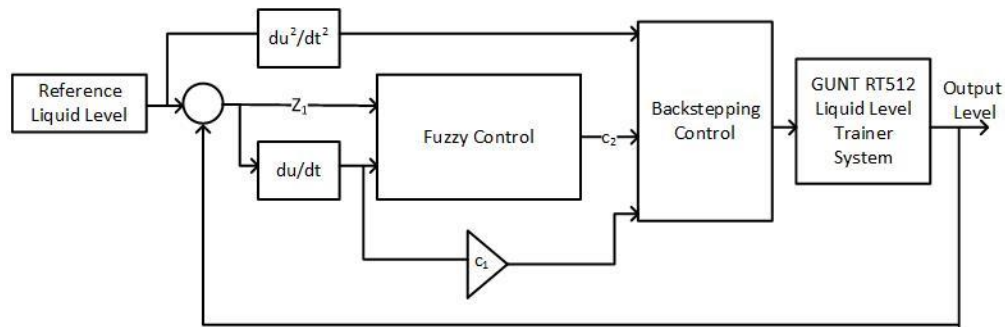
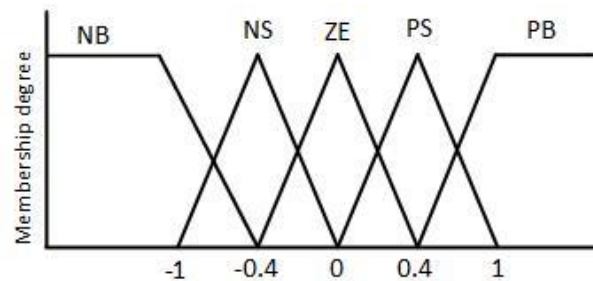


Figure 2: Block diagram of liquid level control system with fuzzy backstepping control

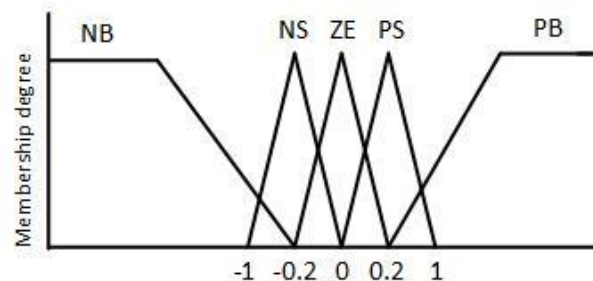
3. Fuzzy Backstepping Control Design

In regulating problems, the error variable is tried to be made zero. The controller and the dynamics of the system determine whether it drops or reaches zero. In this algorithm, the control gain c_2 , which is effective in reducing the error term, is adjusted with fuzzy logic to make the error variable z_1 zero as fast as possible and thus improve the system performance. When the error, z_1 is large, the control gain value c_2 is chosen sufficiently large, and when the error z_1 is small, the control gain value c_2 is chosen small. Also, by evaluating the variable z_2 in addition to z_1 , the control gain is changed according to the change trend of z_1 .

Figures 3 (a) and (b) show the inputs for the error z_1 and derivative of error z_2 using five triangular normalized membership functions (MFs), which are the most commonly employed in fuzzy logic control design. Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (ZE), Positive Small (PS), and Positive Big (PB) are the linguistic variables. Positive Medium (PM) and Negative Medium (NM) are the additive linguistic labels for the output MFs.



a) Fuzzy logic control input MFs for error, z_1



b) Fuzzy logic control input MFs for the derivative of error, z_2

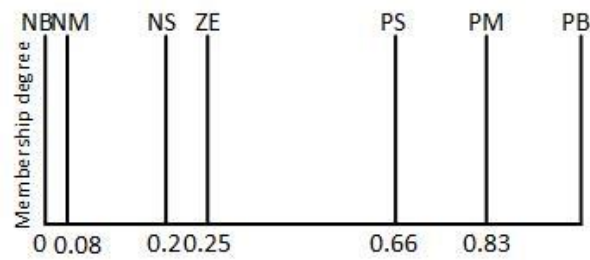
c) Fuzzy logic control output singleton MFs for c_2 control gain

Figure 3. The MFs for the fuzzy backstepping controller

The rule base for the fuzzy logic control is given in Table 2. It is obtained from the Mac-Vicar Whelan rule base.

Table 2. Rule base for control gain c_2

z_1	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NS	NB	NM	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PM
PS	ZE	ZE	ZE	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PM	PB

4. Results and Discussion

There are various criteria used to evaluate the performance of the dynamic systems. These criteria are important for determining the ability of the system to perform the desired behaviors. Response time and settling time determine how quickly the system reaches the desired state and settles to the desired values, while overshoot evaluates unwanted overreactions. These performance criteria play an important role in system design and control processes.

MATLAB/Simulink was used to simulate the liquid level controller in this study. A comparative analysis of the results obtained from a classical backstepping controller has been used to evaluate the performance of the suggested fuzzy backstepping controller. Various performance criteria have been observed as overshoot, rising time, and especially steady-state error.

Since the backstepping control is based directly on the principles of mathematical modeling and control theory, the system models should generally be linear and deterministic. However, in fuzzy backstepping control, according to the principles of fuzzy logic and control theory, system models can often contain uncertainty and do not require linearity assumptions. To verify the effectiveness of the controllers, the system model was created and the test was performed at different liquid levels and for changing levels.

Figure 4 shows both system responses for the constant reference liquid level, 25 cm. The level is described with a Constant Simulink block. The figure shows the continuous steady-state error with classical backstepping. This error problem is solved with the fuzzy backstepping controller.

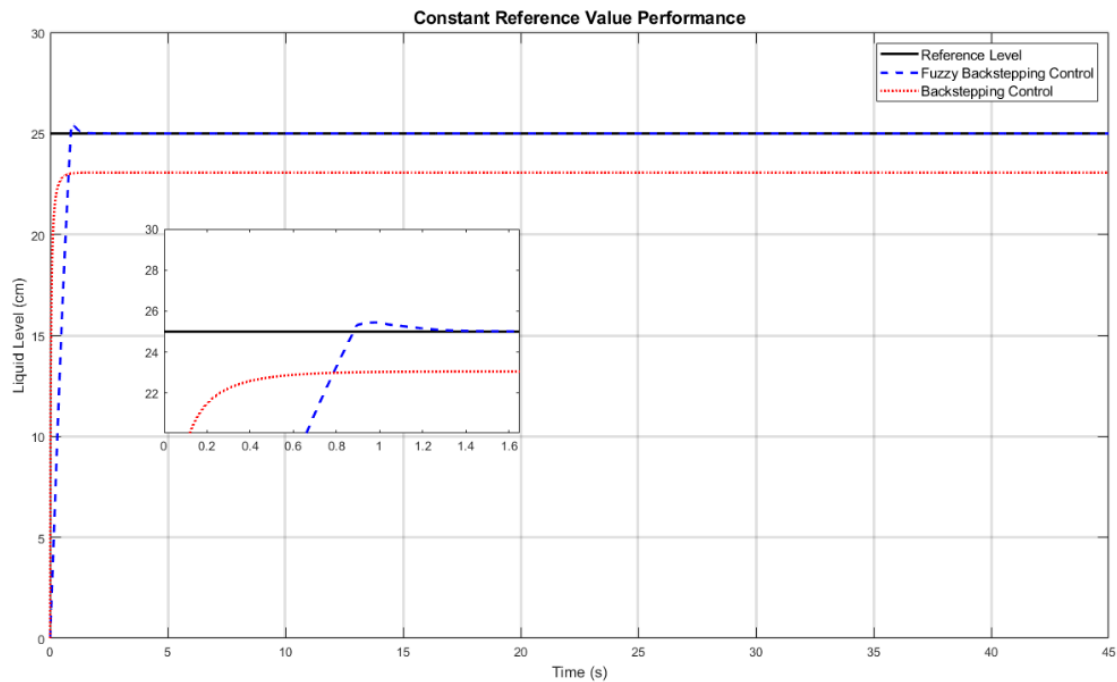


Figure 4. System responses for constant 25 cm liquid level

To test the system behavior for the rising reference levels, the reference liquid level was set to 30 cm for the first 15 seconds and the reference was changed to 45 cm on the 15th second. This situation is shown in Figure 5. The rising time for the classical and fuzzy backstepping controller is nearly the same and additionally, there is no overshoot and no steady state error with the fuzzy backstepping controller. The steady-state error is still a problem with the classical backstepping controller.

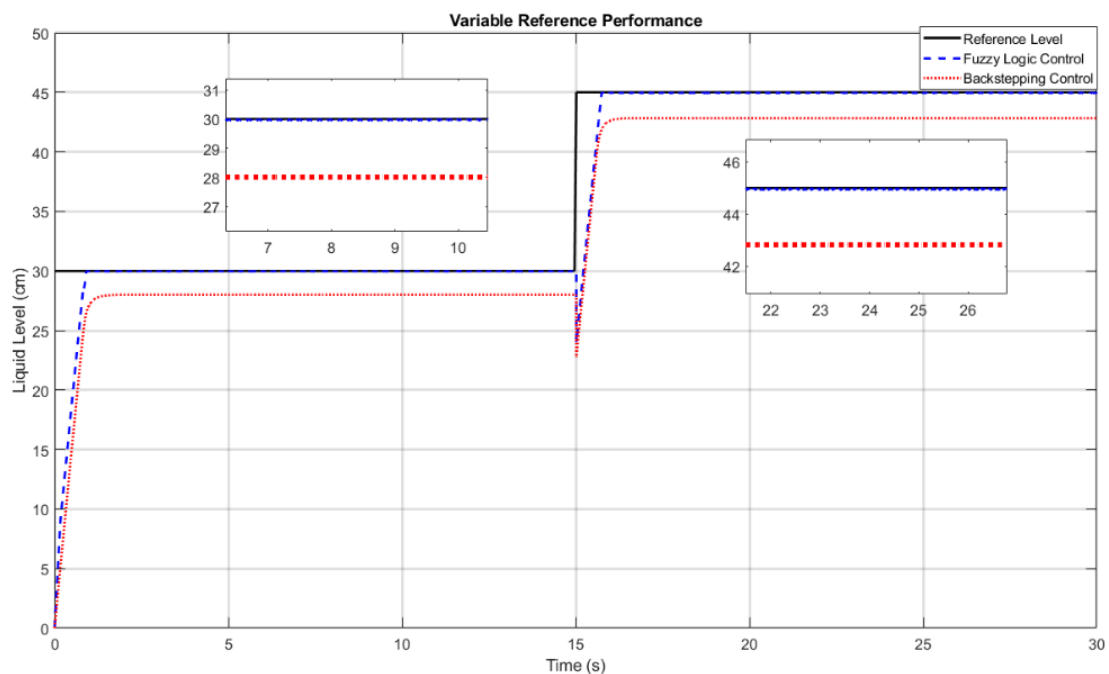


Figure 5. System responses for interval constant liquid level (increasing constant liquid level)

The test was repeated to decrease reference liquid levels. For the first 20 seconds, the reference was set to 45 cm, and for the rest simulation time, the reference was set to 30 cm. As seen in Figure 6, there is still a steady state error with the classical backstepping controller.

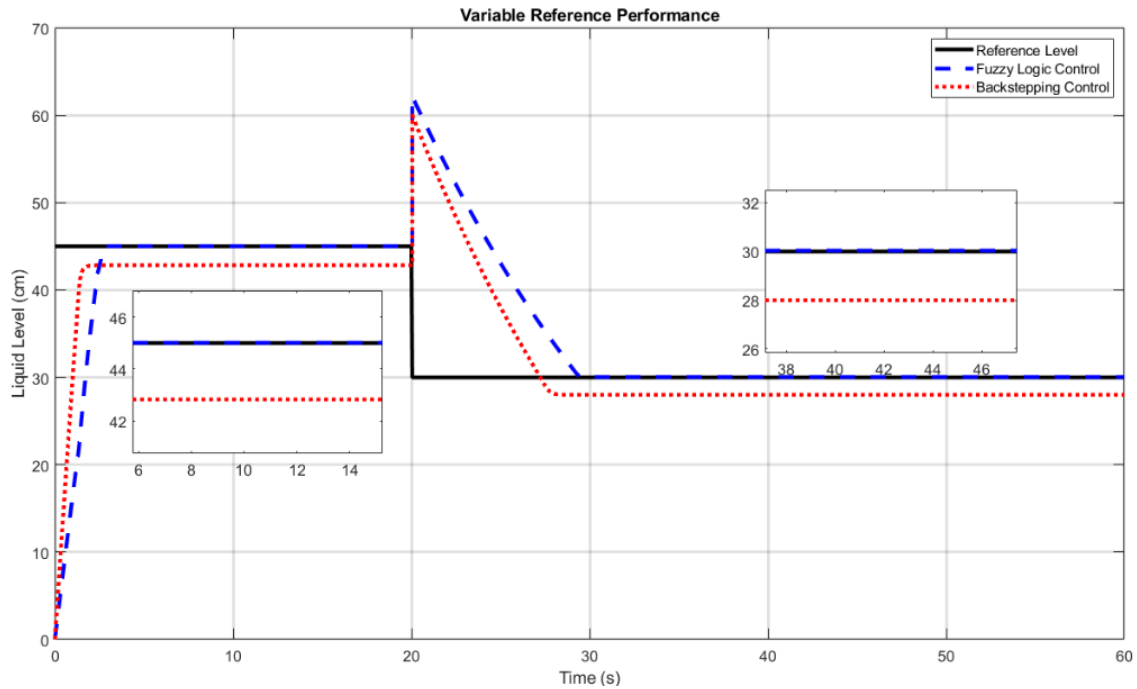


Figure 6. System responses for interval constant liquid level (decreasing constant liquid level)

To test the tracking performance of the controllers, the reference input is set to the time-variant level as seen in Figure 7. The response of the fuzzy backstepping controller is the same as the reference signal. However, the classical backstepping controller tracks the reference signal with a steady-state error.

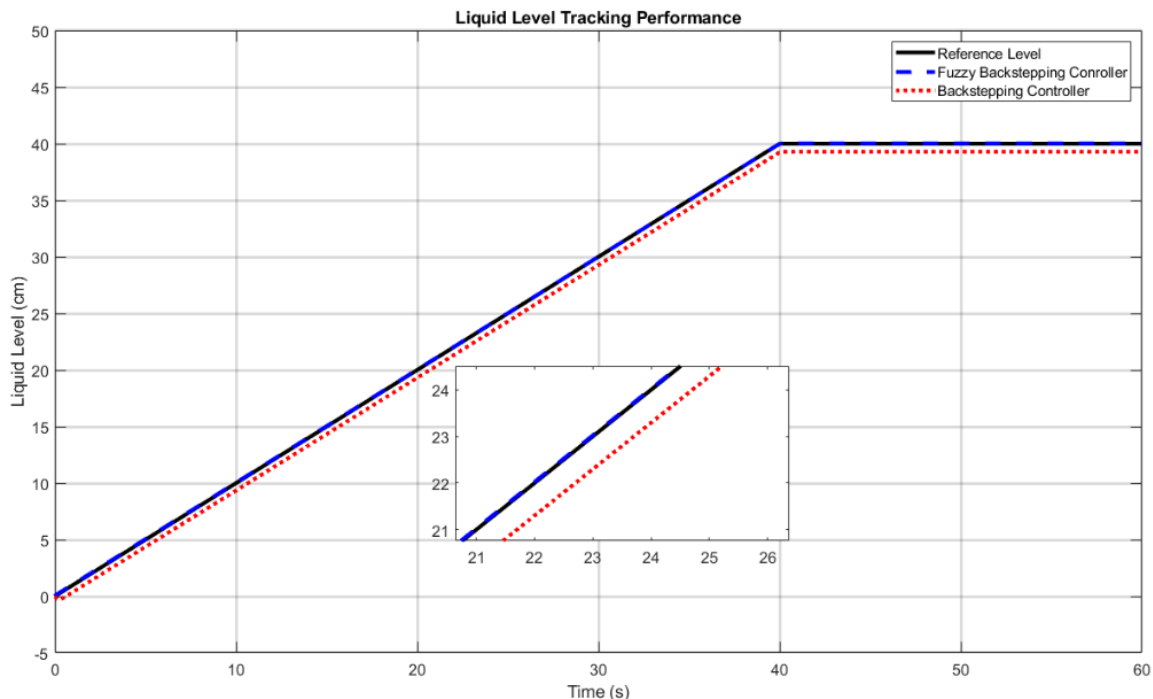


Figure 7. System responses for tracking.

The performance characteristics of the controllers are shown in Table 3. This table provides the steady-state error (e_{ss}), the rise time (t_r), the peak time (t_p), the settling time (t_s), and the overshoot (M_p %) for the classical backstepping controller and the fuzzy backstepping controller. These values' improved or deterioration percentages are shown with the up or down arrows.

The e_{ss} plays an important role for establishing the controller performance. It shows the tracking performance to the reference value of the output of the system. The accuracy, stability, efficiency, and

the security of the system highly depend on this value. It is obtained with the error between the reference input signal applied to a control system and the output of the system after it settles into a steady state. The classical backstepping controller guarantees the asymptotic stability not the exact value, so it generally has steady state error. As can be seen from Table 3, fuzzy backstepping controller is 100% effective on the steady state error. The t_r is achieved by taking the time between the signal value crossing 10% value to 90% value. Whereas the classical controller seems as advantageous, it does not reach the reference value, which is the most fundamental objective of the controller. Besides, the rise and settling time can be reduced for the fuzzy controller by waiving the overshoot. The t_p and M_p % are not calculated for the classical controller as the signal has not overshoot. These values are shown as Non-Applicable (NA) in the table. Settling time is NA too, as this dynamic response does not reach the reference value. Additionally, t_p and t_s are acceptable and the overshoot is only 1.7% for the fuzzy backstepping controller. Consequently, as can be seen from the table, the fuzzy backstepping controller overcomes the steady state error with a little overshoot and a little delay.

Table 3. Performance parameters for the controllers

	Classical Backstepping Controller	Fuzzy Backstepping Controller	Improvement
$e_{ss} (cm)$	1.94	$5 \cdot 10^{-6}$	↑100%
$t_r (s)$	0.377	0.69	↓45%
$t_p (s)$	NA	0.9	NA
$t_s (s)$	NA	1.2	NA
$M_p (%)$	NA	1.75%	NA

5. Conclusion

This paper presents a fuzzy backstepping controller for the liquid level system to improve the system performance. The transfer function and state-space model of the system have been obtained. The proposed controller has been compared with the classical backstepping controller. The motivation of this study is to overcome the steady-state error of the system response that emerged with the classical backstepping controller. For this reason, the important coefficient of the backstepping controller has been arranged with the fuzzy logic controller. Adapting to changes and uncertainties in the system, Fuzzy backstepping control can deal with uncertainties and tolerate model uncertainties. The results have revealed that the proposed controller has solved the steady state error and the system response has been optimized.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] M. F. Çakır, "Mechatronic system design and implementation for liquid level measurement," *Gazi Journal of Engineering Sciences* vol. 8, no.1, pp. 150-157, April 2022. doi:10.30855/gmbd.2022.01.14
- [2] L. Chen, "Principle and simulation PID Controller of liquid level system," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1757, no. 1, pp. 012187, January 2021. doi:10.1088/1742-6596/1757/1/012187
- [3] X. Meng, H. Yu, H. Wu, and T. Xu, "Liquid Level control of four-tank system based on active disturbance rejection technology,"

Measurement, vol.175, pp. 109146, 2021. doi:10.1016/j.measurement.2021.109146

[4] J. Bhookya, M. V. Kumar, J. R. Kumar, and A. S. Rao, "Implementation of PID controller for liquid level system using mGWO and integration of IoT application," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, pp. 100368, 2022. doi:10.1016/j.jii.2022.100368

[5] B. Ata, "Bir top ve çubuk sisteminin ayrıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrolü," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 35, no. 3, pp. 659-668, 2020. doi:10.21605/cukurovaummfd.846402

[6] Z. J Yang and H. Sugiura, "Robust nonlinear control of a three-tank system using finite-time disturbance observers," *Control Engineering Practice*, vol. 84, pp. 63-71, 2019. doi:10.1016/j.conengprac.2018.11.013

[7] M. O. Goma, A. H. Hamouda, and A. A. E.- Badawy, "Command-filtered Backstepping control of multitank system," in *7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, November 06-08, 2019. Delft, Netherlands, pp. 73-77. doi:10.1109/ICCMA46720.2019.8988698

[8] X. Meng, H. Yu, H. Wu, and T. Xu, "Disturbance observer-based integral backstepping control for a two-tank liquid level system subject to external disturbances," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 6801205, 2020. doi:10.1155/2020/6801205

[9] X. Meng, H. Yu, J. Zhang, T. Xu, H. Wu, and K. Yan, "Disturbance observer-based feedback linearization control for a quadruple-tank liquid level system," *ISA Transactions*, vol. 122, pp. 146-162, 2022. doi:10.1016/j.isatra.2021.04.021

[10] T. Erguzel, "A hybrid PSO-PID Approach for trajectory tracking application of a liquid level control process," *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 63-73, 2015. doi:10.11121/ijocta.01.2015.0024

[11] Y. Ma and Y. Liang, "Design of adaptive fuzzy backstepping control algorithm for multi-joint series manipulator," in *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering-ICMRE'19*, February 16-19, 2019. Rome, Italy, pp. 161-166. doi:10.1145/3314493.3318457

[12] M. Ozarslan and O.F. Bay, "Fuzzy control of a grid connected three phase two stage photovoltaic system," in *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, May 11-13, 2011, Malaga, Spain, pp. 1-6. doi:10.1109/PowerEng.2011.6036477.

[13] X. Shen, T. Xie, and T. Wang, "A Fuzzy Adaptive Backstepping Control Strategy for Marine Current Turbine under Disturbances and Uncertainties," *Energies*, vol. 13, no. 24, pp. 6550, 2020. doi:10.3390/en13246550

[14] Y. Tan, J. Chang, H. Tan, and J. Hu, "Integral backstepping control and experimental implementation for motion system," in *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications, Conference Proceedings*, September 25-27, 2000, Anchorage, USA, pp. 367-372. doi:10.1109/CCA.2000.897452

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Traditional Houses in Materials Analysis; Konuralp, Düzce Example

Büşra Sabuncu^a, Özlem Sallı Bideci ^{*b}

Submitted: 10.06.2024 Revised: 02.07.2024 Accepted: 12.07.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A06

ABSTRACT

Keywords: Traditional Building,
Prusias ad Hypium, Konuralp
Houses, Material Analysis

In this study, mortar and plaster samples taken from a traditional house (1799 parcel) located in the neighborhood Konuralp, Düzce Province, were subjected to acid loss, ignition loss, loss of aggregates sieve analysis after acid, protein, and fat tests, tests of salt, as well as Petrographic and SEM-EDX analyses. Brick samples underwent physical examinations microscopic analyses and mechanical in addition to SEM-EDX analyses. For wood samples, macroscopic and microscopic analyses were conducted to determine their types. Based on these analyses, recommendations have been made to contribute to the repair and reuse of the material properties of the selection processes of traditional structures.

^a Duzce University,
Graduate School of Education
Department of Architecture
81000 - Düzce, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1857-3088
e mail: busrasemercioglu@duzce.edu.tr

^b Düzce University,
Art, Design and Architecture Faculty,
Department of Architecture
81000 - Düzce, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9699-6003

*Corresponding author:
ozlembideci@duzce.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Geleneksel
yapı, Prusias ad Hypium,
Konuralp evleri, Malzeme analizi

Malzeme Analizinde Geleneksel Evler; Düzce, Konuralp Örneği

ÖZ

Bu çalışmada, Düzce İli, Konuralp Mahallesi'nde bulunan geleneksel konuttan (1799 parsel) alınan harç ve sıva örneklerine; asit kaybı, kızdırma kaybı, asit kaybı sonrası agregalara elek analizi, protein yağ testleri, tuz testleri ile petrografik ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Tuğla örneklerine; fiziksel ve mekanik analizlerin yanı sıra mikroskobik incelemeler ile SEM-EDX analizleri, ahşap örneklerine ise cinslerinin tayin edilebilmesi için makroskobik ve mikroskobik analizler yapılmıştır. Bu analizler doğrultusunda geleneksel yapıların onarım ve yeniden kullanım süreçlerinde seçilen malzeme özelliklerine katkı sağlamaya yönelik öneriler getirilmiştir.

1. Introduction

Culture for centuries, by affecting the individual's worldview, values, lifestyle, the area, and the person who performs all the actions on this occasion has been one of the most basic elements of organizing. Through transfer from generation to generation, all the values we have today are the richness of the cultural heritage. Protecting this wealth and transferring it to the next generations in a healthy way are of importance for each individual [1]. The protection of traditional buildings is an area of practice that has been secured by many legal studies on the subject.

The research on this subject has enabled the conservation discipline to include both monuments and more modest structures and the textures formed from them. In this context, all kinds of buildings and building groups with features worth protecting are considered as architectural heritage, and multifaceted studies are conducted to transfer them to the future. Traditional houses which are among the leading structures are mostly considered as modest works and are taken under protection [2].

The establishment of the settlement known as Konuralp today dates back to B.C. This settlement of Düzce province in the western Black Sea region has a multilayered historical structure covering the Bithynia, Roman, Byzantine, and Ottoman periods. These historical buildings include cultural heritage elements such as ancient theatre, archaeological sites, aqueducts, and necropolises as well as traditional houses that are examples of civil architecture [3]. The historical texture of Konuralp, which has hosted many civilizations since the centuries before Christ until today (Üskübü) with the increasing acceleration of urbanization since the second half of the century, has faced a difficult situation in terms of rural life and its most important element, the traditional houses remaining in the city ensuring its cultural continuity. Such structures that have not lost their original qualities are frequently encountered in the Konuralp settlement.

In terms of building materials and systems, the construction observed in the Konuralp neighborhood is based on the wooden frame system. The rainy climate and presence of forests in the region have allowed wood to be frequently preferred as a building material. In this system called humish, the columns and beams that make up the skeleton are made of wood. In wood frame systems, a foundation of approximately one meter is dug and a stone foundation wall is built on top of it. The exterior walls in the upper parts of the building are plastered or the wall-filling can be left visible without plastering, as is the dominant character in Konuralp buildings [4]. The main building materials that make up the buildings consist of brick, wood, and stone.

In the study, physical, chemical, mechanical, and petrographic analyses of the materials taken from Konuralp traditional building, which have survived to the present day while preserving their original structural features, were carried out, and the data obtained in line with these analyses was aimed to contribute to the material properties selected in the repair and reuse processes of the building.

2. Materials and Method

2.1. Materials

2.1.1. Building with plot number 1799

The building with parcel number 1799, located in the Konuralp District of Düzce province, is located approximately 60 meters south of the ancient theater known as 40 Steps, dating from the Roman Period. It is located within the borders that have been declared as a 2nd-degree archaeological site by the decision of the Kocaeli Cultural Heritage Preservation Regional Board dated 13.03.2013 and numbered 889. The building was registered as a 2nd Group cultural asset by the same board's decision dated 30.09.2015 and numbered 2221. A general perspective and bird's eye view of the location of the parcel in question is shown in Figure 1.



Figure 1. Structure of electric vehicle types

2.1.1. Sampling and identification of samples

Before taking samples from the buildings, the building materials that determine the character of the building were identified and the bricks, mortar, plaster, and wood of the buildings were analyzed observationally. In order to proceed systematically during the sample collection and to record the locations of the samples taken, survey drawings of the building obtained from Düzce Municipality [5] were used. Figure 2 shows the ground, first-floor, and second-floor sampling sheets.



Figure 2. 1799 parcels numbered floor, first floor, and II. sampling sheet of a plan

Samples of definitions and coding system is shown in Table 1.

Sample Code	Type	Building it belongs to
T1	Brick	1799 Parcel
T2	Brick	
T3	Brick	
H1	Masonry mortar	
H2	Internal plaster	
H3	Internal plaster	
H4	Masonry mortar	
A1	Wooden window joinery	

For parcel number 1799; Brick samples were taken from different points of the building, which form the unique character of the building, are used as filling material between the wooden frames, and are thought to contribute to the structure of the building (Figure 3).

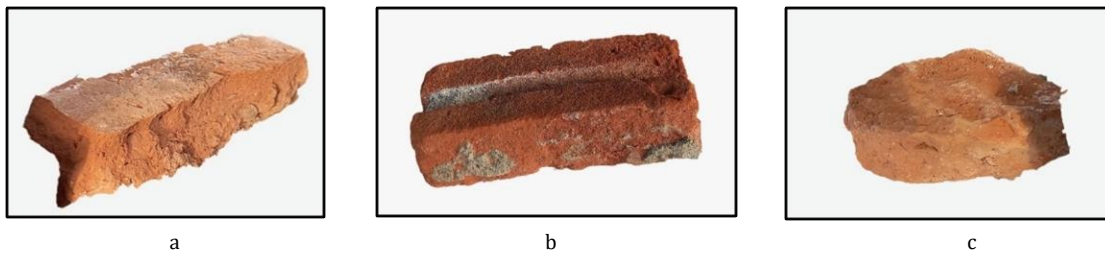


Figure 3. Brick samples from building number 1799 (a) T1-numbered sample (b) T2-numbered sample (c) T3 numbered sample

Mortar and plaster samples (Figure 4) were taken from different points in the interior of the building.

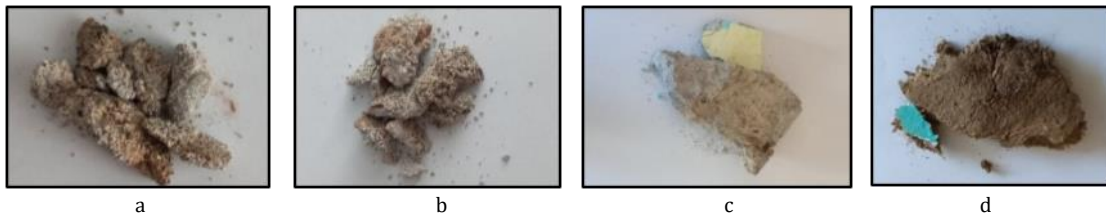


Figure 4. 1799. the mesh structure of the mortar and plaster interior of the samples (a) H1 masonry mortar (b) H4 masonry mortar (c) H2 interior plaster (d) H3 interior plaster

For type determination, a guillotine window joinery sample (Figure 5) was taken from the second floor of the building.



Figure 5. The structure of wood joinery number 1799 A1

2.2. Method

Within the scope of the analysis studies, a specific gravity test was carried out according to TS EN 1936 [6], a unit volume weight test according to TS EN 1936, total water absorption tests according to TS EN 13755 [7] and complexity and porosity tests were carried out according to TS EN 1936 standards in order to determine the physical properties of the brick material. To determine the mechanical properties, the compressive strength test was carried out on brick samples with a load increase of 2 kN/s, using a 500kN capacity Matest test device according to TS EN 772-1+A1 [8] standard. Mortar and plaster samples; Sieve analysis (sieve analysis with 5000 μ , 2500 μ , 1000 μ , 500 μ , 250 μ , 125 μ , and 63 μ sized sieves), protein-oil tests, and salt tests were performed on the aggregates remaining after acid loss, superheating loss, and acid loss; The definitions and textural properties of the aggregates and

minerals were determined by petrographic analysis of the samples, thin and thick sections of which were prepared, using a stereo microscope and a polarizing microscope. Macroscopic and microscopic examinations of the materials for petrography analysis were carried out in accordance with TS EN 12407 [9] and TS EN 12440 [10] standards. Section preparation for petrographic examination of the samples was carried out with a METKON brand GEOFORM model section preparation device. Stereomicroscope imaging is performed with Nikon brand, SMZ 800 model and the camera integrated into the microscope, TOUPCAM brand, E3ISPM20000KPA model device; Polarizing microscope imaging was performed with a Nikon brand, Eclipse Ci-POL model, and a camera integrated into the microscope, Imaging Source brand, DFK NME33UX265 model device. In microscopic examinations and SEM-EDX analyses of brick samples and elemental oxide distributions, the Carl Zeiss brand EVO LS 10 model SEM device was used for imaging, and the Bruker brand and Quantax 200 model device was used for energy Dispersive X-ray spectrophotometry (EDX). Sample preparation for wood species determination was carried out with a LEICA brand SM 2400 model microtome, and cross-sectional examination was performed with the Zen/Zencore program using a Carl Zeiss brand, AxioscopeA1 model microscope and a Carl Zeiss Microimaging Axiocam HRC model camera integrated into the microscope.

In the study, chemical and petrographic analyses of mortar and plaster, SEM-EDS (EDX) analyses, and type determination analyses of wooden materials were carried out by the Restoration and Conservation Laboratory of the Istanbul Metropolitan Municipality Cultural Heritage Department, Directorate of Conservation Application and Inspection [11]. Physical experiments on brick samples were carried out at Düzce University Civil Engineering Materials Laboratory.

3. Results and Discussion

3.1. Physical analysis

Physical analyses of brick samples taken from the building belonging to parcel number 1799 were carried out. The results of the total water absorption rates, unit volume weight, specific gravity, compactness, and porosity values of the samples are given in Table 2.

Table 2. Physical properties of brick samples

Sample Code	Unit Weight (kg/m ³)	Specific Gravity (kg/m ³)	Total Water Absorption (%)	Open Porosity Porosity (%)	Composite
T11	1,763	2,655	12,45	22,12	77,88
T12	1,725	2,581	15,06	25,30	74,70
T13	1,708	2,552	15,51	27,19	72,81
T1average	1,732	2,596	14,34	24,87	75,13
T21	1,825	2,497	8,93	16,89	83,11
T22	1,813	2,461	9,96	18,15	81,85
T23	1,810	2,449	10,84	19,08	80,92
T2average	1,816	2,469	9,91	18,04	81,96
T3	Physical analysis could not be made due to the dissolution of samples.				

Brick samples from the physical analysis of the structure according to the results, the specific gravity of the brick T1 value 2,596 kg/m³, while the value of the bricks T2 2,469 kg/m³ was determined. 1,732 kg/m³ bricks with specific weights in inverse proportion to T1 unit weights in kg/m³ of bricks with a value of T2 1,816 kg/m³ lower than the value that has been identified. The water absorption rate of the samples' porosity values correlated with the 24,87% porosity water absorption of bricks T1, which has the value 14,34%; 18,04% porosity water absorption of bricks with T2 value 9,91% that have been identified based on Çağlar (2018) [12]; threshing bricks the average of the value of the unit weight of 1.85 g/cm³, specific gravity value 2,69 g/cm³ and a porosity rate is 26.75%; 8% boron waste, the value of the average unit weight of bricks additive blending of 2 g/cm³, the specific gravity of the value of 3.01 g/cm³ porosity have been identified as 20,80%. Koç (2019) [13] scholarship in the study of Gölyazı traditional brick structures that is used in the average unit weights of the samples of 1,64-2,48 g/cm³, specific gravity 1,72-2,64 g/cm³, porosity of %has stated that a value is in the range 25%-37%. The values in the structure examined in the literature agree with that found it is seen.

3.2. Mechanical analysis

The values are given in Table 3 the results of the compressive strength of the bricks.

Table 3. Samples applied to brick compressive strength test results

Sample Code	Dimension (mm)	Breaking Load (N)	Compressive Strength (MPa)
T1a	40x40x40	12249	7,65
Diseases	40x40x40	5243	3,27
T1d	40x40x40	3903	2,56
T1Average		7131	4,49
T2W	40x40x40	8876	6,75
T2b	40x40x40	10238	7,79
T2d	40x40x40	8746	6,75
T2 Average		9286	7,09
T3 Average	Due to the dissolution of samples in the mechanical analysis could be made.		

From the structure according to the test results on samples retrieved brick compressive strength, the compressive strength of the brick T2 (7,09 MPa) and compressive strength of bricks by T1 (4,49 MPa) were high, it was determined that. The bricks of T1 4,49 MPa compressive strength value, and porosity seem to support each other with the fact that the value is high. Harman bricks in the relevant standards, the compressive strength of at least 4.00 N/mm² and the average is 5.00 N/mm² was estimated to be. The average compressive strength of bricks is over the specified value of T2 when T1 is the value of the compressive strength of the bricks at the conclusion that the limit value is reached. Çağlar (2018); in the study, the average compressive strength of the bricks 2,98 MPa, 8% boron waste, the average compressive strength of bricks 5,94 MPa have been identified as [12]. Brick raw material sources resistance may vary according to differences in samples and production techniques. At the same time exposed to different heat treatments at different points in the kiln during the firing of the bricks, bricks can be shown among the reasons that affect the properties of threshing [14].

3.3. Chemical analysis

Loss on ignition, acid loss, post-acid loss sieve analysis, salt tests, and protein-oil tests were performed on the mortar and plaster samples taken from the building. Ignition loss and acid loss are given in Table 4 and Table 5, respectively, and sieve analysis results are given in Figure 6.

Table 4. The results of the analysis of mortars and plasters belonging to mass loss

Sample Code	Mass Loss (%)		
	Moisture At 105°C	Relative Humidity Water/Organic Additives 550°C	CaCO ₃ 1050°C
H1 (masonry mortar)	1,00	3,39	22,92
H2 (Interior plaster)	0,94	2,21	21,18
H3 (Interior plaster)	2,51	4,32	7,00
H4 (masonry mortar)	0,75	2,18	16,78

When the ignition loss analysis results were examined, it was seen that the weight losses at 105 °C were between 0.94% and 2.51%. The results show that all samples contain small amounts of moisture. When the weight losses at 550 °C were examined, it was determined that the samples contained relative water and organic additives between 2.18% and 4.32%. According to the loss of ignition at 1050 °C, it was determined that the amount of CaCO₃ in the H1 and H2 samples was at the highest level because they were lime mortar.

Table 5. The results of the analysis belonging to acid loss mortars and plasters

Sample Code	Acid Loss (%)	
	Missing	Remaining
H1 (masonry mortar)	21,14	78,86
H2 (Interior plaster)	21,79	78,21
H3 (Interior plaster)	10,62	89,38
H4 (masonry mortar)	21,83	78,17

When the acid loss and sieve analysis results were examined, the binder-aggregate ratios of the mortar and plasters belonging to H1, H2, and H4 samples were determined as 1:4, while the binder-aggregate ratio of the interior plaster sample numbered H3 of the same building was determined as 1:8-10. It is thought that the plaster number H3 was applied later for repair purposes.

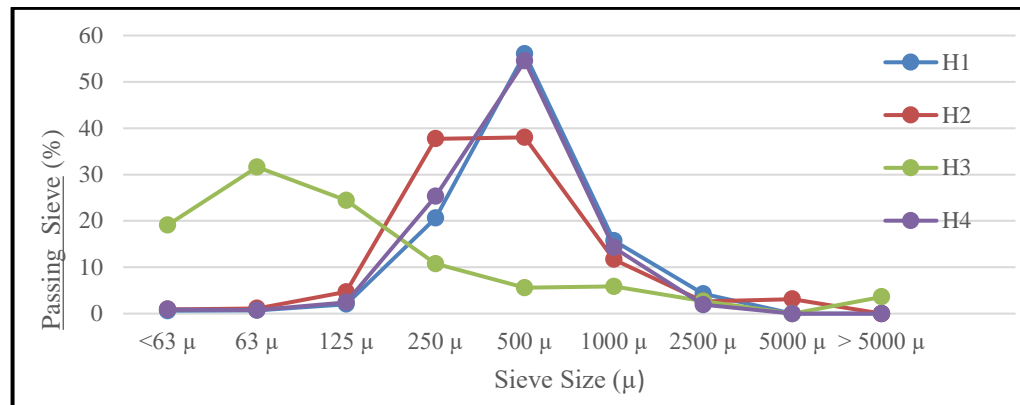


Figure 6. Particle size distributions of aggregates

Analysis results of water-soluble salts analysis and conductivity measurement values of mortars and plasters, as well as protein and oil test results, are given in Table 6. As a result of the salt tests carried out on mortars and plasters, no serious salinization problem was found, while a small amount of chlorine and nitrate was detected in the H2 sample, and a small amount of chlorine was detected in the H3 sample. The conductivity values of the samples were parallel to the salt tests. It was observed that the conductivity values of mortar and plaster varied between 150-241 μS and the detected salt amounts varied between 1.32-1.52%. When the protein and oil test results were examined, the presence of oil was not found in any of the mortar and plaster samples, while the presence of protein was detected in all samples. The presence of protein in the samples indicates the use of organic additives such as egg whites etc. to improve the properties of the mortar and strengthen its binding properties. Such additives reduce the brittle structure of the mortar and increase its plasticity [15].

Table 6. Table of mortar and plaster with water-soluble salts of analysis and conductivity measurement

No	Salt Tests				Conductivity (μS)	% Salt	Protein-Fat Test	
	Chlorine (Cl^-)	Sulfate (SO_4^{2-})	Carbonate (CO_3^{2-})	Nitrate (NO_3^-)			Protein	Oil
H1	-	-	-	-	154	-	+	-
H2	+	-	-	+	209	1,32	+	-
H3	+	-	-	-	241	1,52	+	-
H4	-	-	-	-	150	-	+	-

-: No; +: less; Var: more; +++: more; ++++: have too many

3.4. Petrographic analysis

3.4.1. Thick and thin-section analysis

The H1 sample was taken from the southwest wall of the ground floor of the building; It is a white-coloured, weak-structured knitting mortar sample containing sand aggregates and white masses, and its binder was determined to be slaked cream lime. A very small amount of the aggregates of the mortar, which has a binder ratio of 15-20% by area, contains brick fragments as contamination, while 2-3% contains limestone and marble fragments, etc. It was determined that the remaining aggregates of the sample, which contained a small amount of lime lumps and fossil shell fragments, were all black sand and consisted of mineral and rock fragments. Its minerals generally contain quartz, plagioclase, and small amounts of amphibole. Stereomicroscope and polarizing microscope images of the sample are given in Figure 7.

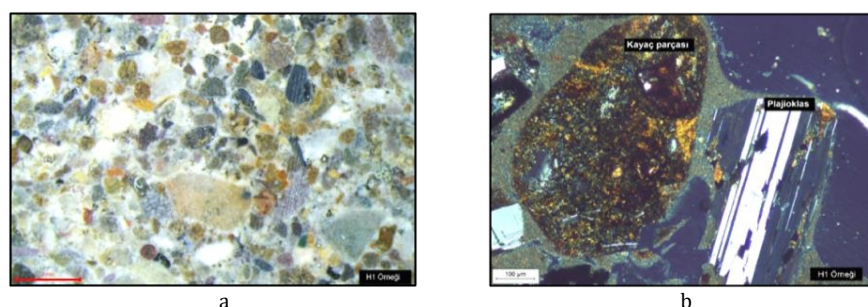


Figure 7. Sample of H1 (a) stereo microscope and (b) with a polarizing microscope image

The H2 sample was taken from the southwest wall of the ground floor of the building; It is a white-colored, weakly structured plaster mortar sample containing sand aggregates and white masses, and its binder was determined to be slaked cream lime. 3-5% of the aggregates of the mortar, whose area binder ratio is in the range of 15-20%, are carbonate rock particles and all of the aggregates are black sand. It is generally composed of volcanic rock types and contains quartz and feldspar minerals. Stereomicroscope and polarizing microscope images of the sample are given in Figure 8.

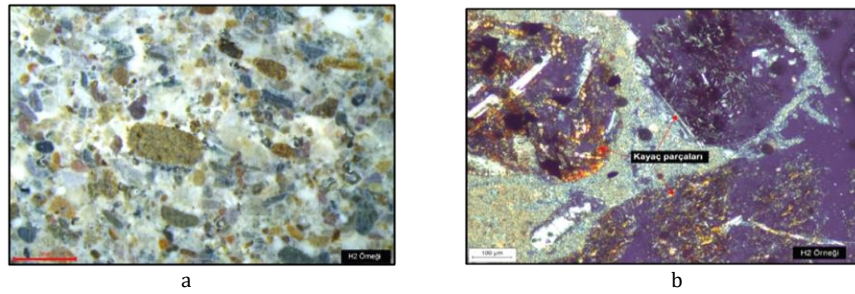


Figure 8. A sample of H2 (a) stereo microscope and (b) with a polarizing microscope image

The H3 sample was taken from the south wall of the ground floor of the building; It is a brown-coloured, weak-structured plaster mortar sample with plenty of tows in it, and its binder was determined to be 5-10% slaked cream lime reinforced soil. Approximately 3-5% of the sample aggregates are ash, and all the remaining aggregates are soil of terrestrial origin. The soil aggregate content contains 2-3% limestone fragments up to 1 mm in size, small amounts of quartzite and meta sandstones, and contains quartz, feldspar, and small amounts of mica minerals. Stereomicroscope and polarizing microscope images of the sample are given in Figure 9.

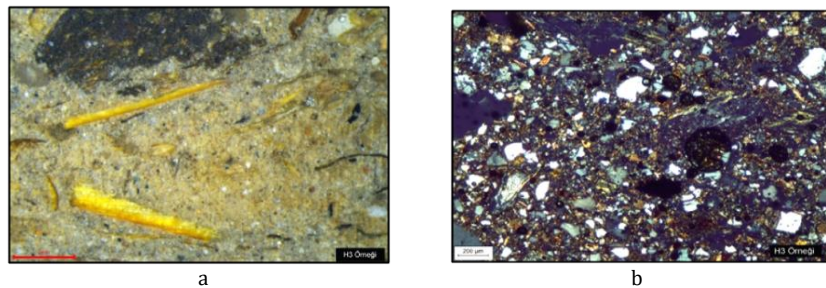


Figure 9. Sample of H2 (a) stereo microscope and (b) with a polarizing microscope image

The H4 sample was taken from the 2nd-floor northeast wall of the building; It is a white-colored, weak-structured knitting mortar sample containing sand aggregates and white masses, and its binder was determined to be 15-20% slaked cream lime by area. It was determined that all sample aggregates were black sand. The mortar paste contains 1-2% carbonated lime lump particles, 1-2% fossil shells, and pollution tow particles. In addition, although the majority of its aggregates are volcanic rocks, there are small amounts of rocks such as meta sandstones and mica schist. It forms quartz, feldspar, and rarely pyroxene minerals. Stereomicroscope and polarizing microscope images of the sample are given in Figure 10.

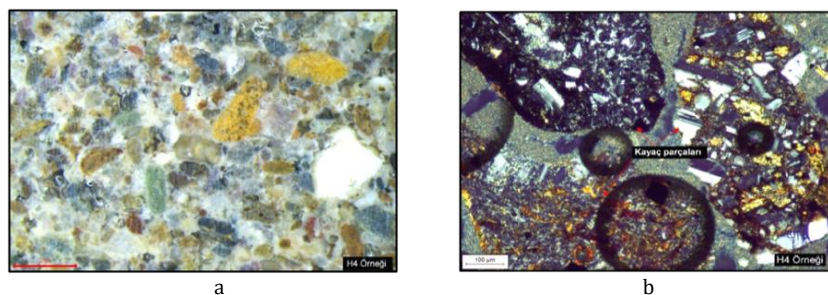


Figure 10. A sample of H4 (a) stereo microscope and (b) with a polarizing microscope image

According to the cross-sectional analysis of the T1 sample, the sample is a well-prepared and

compressed blend brick sample with dimensions of approximately 4x4 mm, with voids of less than 5% and small diameter pores of less than 1 mm in the range of 5-10%. It was understood that approximately 10% of the sample area contained calcium carbonate (limestone particles) up to 0.5 mm in size, quartz (sand) particles in the same proportion, and the remaining part was soil with baked clay and a high content of iron oxide (Fe_2O_3). According to the cross-section analysis of the T2 sample, the sample is a better prepared, compressed, and fired blend brick sample than the T1 sample, with 1-2% of the pores smaller than 0.2 mm, except for the gap of approximately 5x8 mm. In the sample area, there is approximately 10% calcium carbonate (limestone particles) up to 0.25 mm in size, the proportion of quartz (sand) particles up to 1 mm in size is in the range of 15-20%, and the remaining part is baked clay and a high percentage of iron oxide (Fe_2O_3). It was understood that it was soil-containing according to the cross-sectional analysis of the T3 sample, it is a non-highly compressed blend brick sample with a medium amount of voids in the range of 1-5 mm and less than 5% porosity of approximately 0.5 mm. In the sample area, the proportion of calcium carbonate (limestone particles) and quartz (sand) particles up to 0.5 mm in size is approximately 10-15%, and the remaining part is soil containing baked clay and high amounts of iron oxide (Fe_2O_3). It turned out that it was. The production material of T3 brick is considered to be good but its preparation and firing are poor. The stereo microscope image of the samples is given in Figure 11.

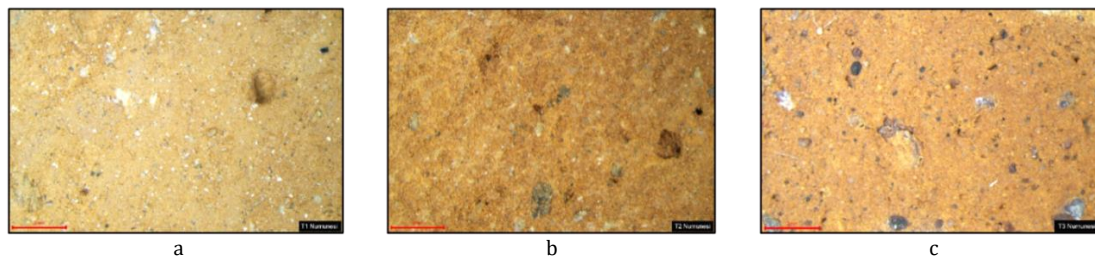


Figure 11. (a) T1, (b) T2, and (c) T3 samples from stereo microscope images

3.5. SEM-EDS (EDX) analysis

3.5.1. Mortar analysis

With SEM-EDX analyses, SEM images were taken from the binding parts of the mortar samples and EDX analyzes were performed on the marked areas on these images. SEM images and EDX analysis element and oxide ratios of H1, H2, H3, H4 samples are given in Figure 12.

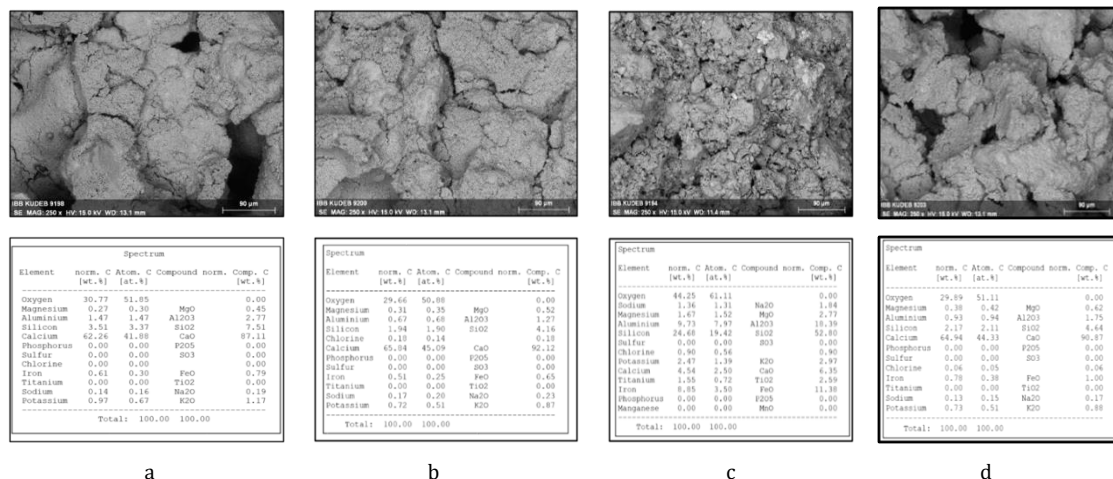


Figure 12. (a) H1, (b) H2, (c) H3 and (d) H4 SEM image and EDX Elemental analysis and oxide ratios of samples

As shown in Figure 12, the binder of the H1 mesh mortar sample is lime-derived calcium carbonate, which contains clay formed by the decomposition of feldspars in the range of approximately 10-12%. While the sample contained 87.11% calcium originating from lime, it was determined that this element contained much smaller amounts of silicon, aluminum, potassium, iron, magnesium, and sodium. The binder of the H2 plaster mortar sample is lime-derived calcium carbonate, which contains clay formed by the decomposition of feldspars in the range of approximately 5-6%. It was determined that the sample contained 92.12% calcium, originating from lime, and much less of this element, silicon,

aluminum, potassium, iron, magnesium, sodium, and chlorine. H3 plaster mortar sample; The binder is approximately 8-10% lime-derived calcium carbonate, and the remainder is clay formed by the decomposition of potassium and sodium-based feldspars. It was determined that the sample contained 52.80% silicon, originating from clay, and smaller amounts of this element, aluminum, iron, calcium, potassium, magnesium, titanium, sodium, and chlorine. The binder of the H4 mesh mortar sample is lime-derived calcium carbonate, which contains clay formed by the decomposition of feldspars in the range of approximately 10-12%. It was determined that the sample contained 90.87% calcium, originating from lime, and much less of this element, silicon, aluminum, iron, potassium, magnesium, sodium, and chlorine.

3.5.2. Brick analysis

SEM images and EDX analysis of element and oxide ratios of T1, T2 and T3 samples are given in Figure 13.

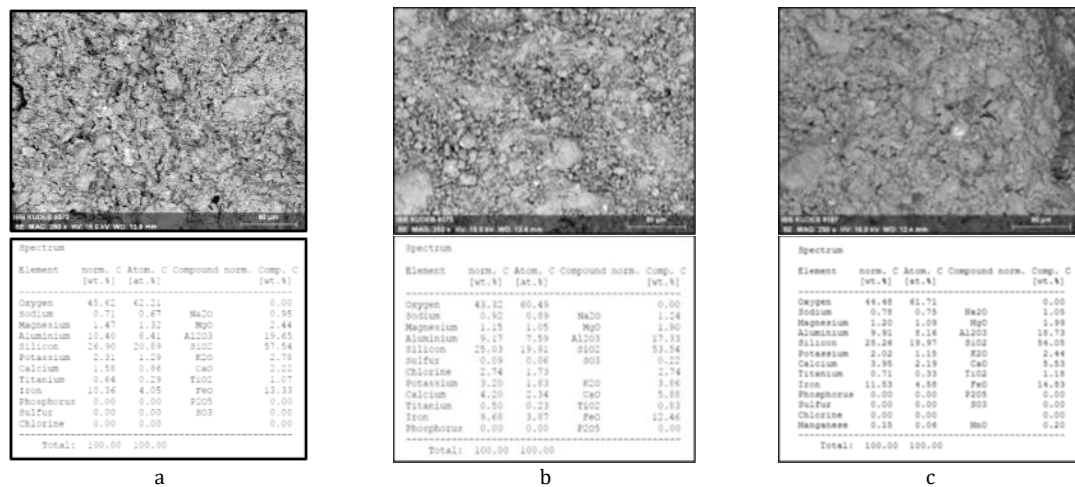


Figure 13. (a) T1, (b) T2 and (c) T3, SEM image and EDX Elemental analysis and oxide ratios of samples

Calcium carbonate was detected in the range of 2-3% in the content of the T1 brick sample, and it was observed that there were silt and clay-sized particles in the area determined as clay in the sample examination area. It was determined that the sample contained 57.54% silicon, and smaller amounts of this element, aluminum, iron, potassium, magnesium, calcium, titanium and sodium. Calcium carbonate was detected in the range of 5-6% in the T2 brick sample, and it was observed that there were silt and clay-sized particles in the area determined as clay in the sample examination area. It was determined that the sample contained 53.54% silicon, and smaller amounts of this element, aluminum, iron, calcium, potassium, chlorine, magnesium, sodium, titanium and sulfur. T3 brick sample; It was determined that the sample contained 54.05% silicon, and smaller amounts of this element, aluminum, iron, calcium, potassium, magnesium, titanium, sodium and manganese. The most suitable soils for brick making are clay soils. Generally, clays include illite, montmorillonite, kaolinite, quartz, limestone and iron minerals. When these minerals are fired between 800-1200 °C, they have the strength required for bricks. Illite and kaolinite clays are the most suitable for brick and tile making [16]. SiO₂/Al₂O₃ ratio of kaolin type minerals is 2/1; In montmorillonite, illite and chlorite type minerals, it is 3/1 [17]. Since these ratios are more than 3/1 in the brick samples taken from the building, it can be concluded that the bricks are not kaolinite in structure.

3.6. Analysis of The Type of Wood

The cross-sectional features of sample number A1, which was taken from the window joinery of the building and was a wood sample with a layer of white paint on it and was damaged by fungus and insects, were examined (Figure 14). In the examination, it was observed that it has a ringed tracheal structure, the summerwood trachea diameters are gradually decreasing, and it forms narrow radial or oblique, sometimes bifurcated rows. In radial section features, the core rays have a homogeneous structure, the perforation trays are of simple type, and sometimes ladder-like perforation trays are observed in the summerwood trachees. In the tangential section features, it was determined that the core rays were single cell wide and mostly 5-30 cells high. As a result of macroscopic and microscopic examinations, the type of sample A1 taken from the window joinery was determined as chestnut

(*Castanea sativa* Mill.).

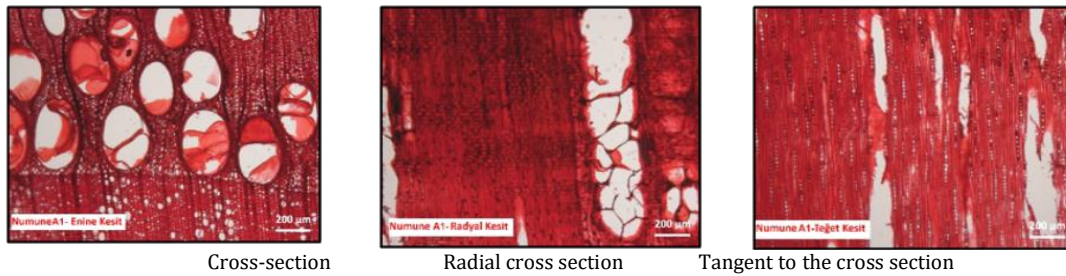


Figure 14. Thin section images of sample A1

4. Conclusions

The results obtained by physical, chemical, mechanical, and petrographic analysis of the materials taken from the Konuralp traditional house (1799 parcel), which has survived to the present day while preserving its original structural features, are shared below.

According to the physical property results of the brick samples; unit volume weights are within the range of the specified standard values (1600-1800 kg/m³); Although the specific gravity of T1 brick is high; It was found that T2 brick has lower water absorption rate and porosity. When its mechanical properties are examined, the compressive strength of blend brick is predicted to be at least 4.00 N/mm² and an average of 5.00 N/mm² in the relevant standards. It was concluded that while the average compressive strength of T2 brick was above the specified values, the compressive strength of T1 brick was at the limit value. In addition, it was determined that T1, T2, and T3 samples contained silicon at the rates of 57.54%, 53.54%, and 54.05%, respectively, and generally fewer amounts of this element: aluminum, iron, potassium, magnesium, calcium, titanium and sodium.

When we examined the mortar samples, according to the acid loss results of the mesh mortar samples numbered H1 and H4, the binder-aggregate ratio was 1:4, and according to the petrographic analysis results, it was determined that the binders were slaked cream lime. The aggregates of the masonry mortar samples showed similar properties, and the remaining aggregates consisted of black sand, except for brick fragments and carbonated lime lumps in terms of contamination. Only a very small amount of tow pieces (flax) were detected in the H4 mortar. When we examine the plaster samples from the same building, the binder ratio of plaster mortar numbered H2 is approximately 20% and the binder is slaked cream lime. The aggregates of the sample consist of small amounts of carbonate rock fragments, while the rest is entirely black sand. The H3 sample is a soil mortar reinforced with lime in the range of 5-10% and the binder-aggregate ratio is in the range of 1:8-10. The sample aggregates are a small amount of ash, and all the aggregates are soil of terrestrial origin. Although there are less than 1% black slag particles in the sample paste, 4-5 kg of straw tow was added per cubic meter. While sample H2 is a sample of the original plaster used in the building, sample H3 is thought to be an adobe mortar applied later for repair purposes.

According to the results of ignition loss applied to mortar and plaster; The relative water and organic contribution rates in the samples vary between 2.18% and 4.32%. According to the results of salt tests, while samples H2 and H3 contain a small amount of chlorine, sample H2 also contains a small amount of nitrate. Apart from this, no significant salinization problem was detected in either structure.

When the protein and oil test results were examined, the presence of oil was not found in any of the mortar and plaster samples, while the presence of a small amount of protein was detected in all samples. This indicates that organic additives are used in the creation of mortars and plasters.

According to the SEM-EDX results of the mortar samples, it is understood that the binder parts of the mortars numbered H1, H2, and H4 contain a very high amount of calcium originating from lime, while the amount of silica in the H3 mortar is quite high due to the high clay it contains. It was determined that the wood of the window frame taken from the second floor of building number 1799 was chestnut (*Castanea sativa* Mill.). It was envisaged that the same type of wood as the tree species specific to the region could be used during the repair phase.

Acknowledgment

This study was produced from the thesis titled "The importance of material analysis in the reuse and repair of traditional houses: The case of Düzce-Konuralp", written at Düzce University, Institute of Science, Department of Architecture.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] M. Can. "Work report-Kültürel Miras ve Müzecilik Çalışma Raporu," *teftis.ktb.gov.tr*, Kültür ve Turizm Bakanlığı, September, 2009. [Online]. Available: <https://teftis.ktb.gov.tr/Eklenti/1279,muserrefcanpdf.pdf>. [Accessed: July, 15, 2022].
- [2] T. N. Olğun. "An Investigation on the conservation of traditional buildings in Elazığ/Hüseyinik neighborhood: The case of house No 23," *International Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences*, vol. 9, no. 68, pp. 3467-3485, September 2023. doi:10.29228/JOSH AS.72142
- [3] E. Besli, "Examination of traditional Turkish house architecture: Case of Düzce-Konuralp," Master's Thesis, Düzce University Institute of Science and Technology, Düzce, Türkiye, 2019.
- [4] H. Arslan, D. Gökçen, A. Tanrıverdi Kaya, *Konuralp antik tiyatro 1. derece arkeolojik sit alaninin mekânsal analizi*. Düzce'de Tarih, Kültür ve Sanat, Gaye Kitabevi, Bursa, Türkiye, 2015, pp.246-253.
- [5] Düzce municipality reports, 2022.
- [6] TS EN 1936 "Natural stones - Test methods - Determination of true density, apparent density, total and open porosity," Turkish Standardization Institute, Ankara, 2010.
- [7] TS EN 13755 "Natural stones - Test methods - Water absorption pattern at atmospheric pressure," Turkish Standardization Institute, Ankara, 2009.
- [8] TS EN 772-1+A1 "Masonry units - test methods - Part 1: Determination of compressive strength," Turkish Standardization Institute, Ankara, 2018.
- [9] TS EN 12407 "Natural Stones- Test methods-petrographic examination". Turkish Standardization Institute, Ankara, 2019.
- [10] TS EN 12440 "Natural stones naming criteria" Turkish Standardization Institute, Ankara, 2010.
- [11] İ.B.B. KUDEB, *Restoration and conservation laboratories book*, Şan Matbaası, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [12] A. Çağlar. "Experimental research on improvement with boron waste additive of properties of blend brick used in traditional Kastamonu houses," Ph.D. thesis, Selçuk University Institute of Science and Technology, Konya, Türkiye, 2018.
- [13] K. Koç, "Documentation and investigation of constructional characteristics belong to Bursa Gölyazı region," Master's Thesis, Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [14] S. Kurugöl, Ç. Tekin. "Evaluation of physical, chemical and mechanical characteristic of bricks used in castle structures of byzantine period", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ*, vol. 25, no. 4, pp.767-777, March 2010.
- [15] Ö. Özgen. "Horasan harcı üzerine deneysel çalışmalar," Specialization Thesis, T.R. Ministry of Culture and Tourism Istanbul Surveying and Monuments Directorate, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [16] G. Özışık. *Yapı Mühendisliğinde Tuğla Elemanlar ve Yapı Sistemleri*. Birsan Yayınevi, Ankara, Türkiye, 2000.
- [17] Ö. Akıncı. "Seramik killeri ve jeolojisi," *Journal of Mineral Research and Exploration*, *dergi.mta.gov.tr*, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 1968. [Online]. 1968. Available: https://dergi.mta.gov.tr/dosyalar/images/mtadergi/makaleler/tr/20151013144716_804_22796a01.pdf. [Accessed: July, 15, 2022]

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Evaluation of a Direct Current Electric Motor Modelled Based on the Artificial Intelligence in the Sense of Stability

Ege Cömert^a, Salih Karaaslan^b, Bülent Özkan^{*c}

Submitted: 15.02.2023 Revised: 31.05.2024 Accepted: 28.007.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A13

ABSTRACT

Keywords: Artificial intelligence, dynamic system, modelling, direct current electrical motor, stability

^a TUSAŞ-Turkish Aerospace Industries, Inc, 06980-Ankara, Türkiye

^b Gazi University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 06570-Ankara, Türkiye

^{c*} Gazi University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 06570-Ankara, Türkiye
ORCID: 0000-0003-3112-9723

*Corresponding author:
bozkan@gazi.edu.tr

Artificial intelligence (AI), which has an important place in today's technology and is called "artificial intelligence" as an English term in the literature, is among the basic building blocks of innovation. Basically, artificial intelligence is a software that can create its own algorithm without the need for any algorithm, whose algorithms are unpredictable and can make its own decisions, that is, it is like the ones and zeros versions of the human brain and behaviors. The sequence of ones and zeros to create codes can be seen as artificial cells of artificial neural system and computational programs designed in the 1950s and inspired by the human neural system. With the application of artificial intelligence, information is modeled and learning is provided quickly, and the quality and value of the work increases by decreasing the workforce to be done. It is necessary for the system performance to be accurate and sustainable in line with the targets and the stability criterion in the system is extremely important in this regard. In this study, first, the essential techniques considered within the extent of the artificial intelligence are explained in addition to their advantages and disadvantages. Secondly, the stability of dynamic systems is mentioned and a stability investigation is carried out over the artificial intelligent-based model of a direct current electrical motor under consideration. Finally, a general evaluation is presented upon the stability of the artificial-intelligence-based model of the considered system.

Yapay Zekâ Esaslı Modellenen Doğrusal Akımlı Bir Elektrik Motorunun Kararlılık Bakımından Değerlendirilmesi

ÖZ

Günümüz teknolojisi içerisinde önemli yer tutan ve literatürde İngilizce karşılığı "artificial intelligence" olarak adlandırılan yapay zekâ, yeniliğin temel yapıtaşları arasında yer almaktadır. Temel olarak yapay zekâ, herhangi bir algoritmaya ihtiyaç duymadan kendi algoritmasını oluşturabilen, algoritmaları önceden öngörülemeyen ve kendi kararlarını verebilen, yani insan beyni ve davranışlarının birler ve sıfırlar sürümü gibi olan bir yazılımdır. Kodlar oluşturmak için birler ve sıfırların sıralanması, 1950'lerde tasarlanan ve insanın sinir sisteminden esinlenen yapay sinir ağları ile hesaplama programlarının yapay hücreleri olarak görülebilir. Yapay zekâ uygulaması ile bilgiler modellenerek hızlı bir şekilde öğrenme sağlanıp yapılacak işgücü azalarak işin kalitesi ve değeri artmaktadır. Hedefler doğrultusunda sistem performansının doğru ve sürdürülebilir olması gerekli olup, bu hususta sistemdeki kararlılık kriteri son derece önemlidir. Bu çalışmada, yapay zekâ kapsamında göz önünde bulundurulmuş temel teknikler anlatılarak üstünlük ve zayıflıkları vurgulanmış, ardından dinamik sistemlerin kararlılığından bahsedilerek ele alınan doğrusal akımlı bir elektrik motorunun yapay zekâ esaslı modeli üzerinden kararlılık incelemesi yapılmıştır. Son olarak, ele alınan sistemin yapay zekâ esaslı modelinin kararlılığı üzerine genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Yapay zekâ, dinamik sistem, modelleme, doğrusal akımlı elektrik motoru, kararlılık

1. Giriş (Introduction)

Yapay zekâ, son dönemde bilimsel ve entelektüel gelişmelerin önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Gelişimini her daim sürdüren yapay zekâ, insan zekâsına benzer şekilde görevleri benimseyen, aldığı verilere göre tekrarlı bir şekilde kendisini geliştirebilen sistem veya algoritma olarak ifade edilebilir. Düşünülenin aksine, yapay zekânın hedefi insanların yerini almak değil insanın yeteneklerini daha da geliştirerek katkı sağlamaktır. Yapay zekâ yaklaşımı, farklı alanlarda ve birçok akıllı uygulamada kullanılıp fayda sağlayan bir metodolojidir. İnsan beyninin aynı anda çalıştırabileceği işlem sayısı, hesaplama sistemine kıyasla çok daha azdır. Oysa makine ve sistemler asla yorulmaz, dikkati dağılmaz, dinlenmeye ihtiyaçları yoktur ve kararlılığın söz konusu olduğu durumda temel hesaplamaları nanosaniyeler içinde güvenilir ve doğru bir şekilde yapabilir. Bu hususta kararlılığın değerlendirilmesi yani izleme ve istikrarsızlığın erken tespiti, sistemlerin güvenli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasında önemli rol oynamaktadır.

Yapay zekâ, sistem veya makinenin öğrenme, sonuca varma, planlama ve harekete geçme gibi insan zekâsı ile ilişkili görevleri yerine getirebilme yeteneğidir. Ayrıca yapay zekâ robotik alanında da nesnelerin konumlarını değiştirebilme gibi otonom özelliklere sahiptir. Yapay zekânın teknoloji ve dijitalleşme alanındaki başarısı artarak ilerlemekte ve beklentileri yükseltmektedir [1,2].

Yapay zekâ teknolojisinin birçok üstünlüğünün yanı sıra bazı zayıflıkları da mevcuttur. Bu zayıflıklardan dolayı oluşan riskler de iyi analiz edilmeli ve gerekirse önlemler alınmalıdır. Risklerin başında güvenilirlik problemi gelmektedir. Teknolojinin insanlar tarafından kullanılabilmesi için güvenilir olması şarttır. Yapay zekâ uygulamalarında karşılaşılan önemli sorunlardan biri de kararlılık (İng. stability) koşulunun her zaman sağlanamamasıdır. Ele alınan kullanım sahalarına bağlı olarak farklı yaklaşımlar göz önünde bulunuyor olsa da yapay zekâ temelli denetim (kontrol) sistemlerinin kararlılığını garanti edecek doğrulanmış analitik bir yöntem hali hazırda mevcut değildir [3].

Günümüzde yapay zekâ, tarımdan sağlık hizmetlerine, sanayiden finansa ve ulaşımdan kamu politikalarına kadar hayatın neredeyse tüm alan ve sektörlerinde kullanılmaktadır. Örneğin otonom araçlar yollarda görülmekte olup çiftçiler ürünlerini yapay zekâ ile ilgili uygulamalar aracılığıyla uydulardan takip etmektedir. Bu alandaki gelişmeler akademinin de ilgisini çekmekte olup 2011 yılında yapay zekâ ile ilgili 1355 adet makale yayınlanmıştır. Ayrıca, Web of Science veri tabanına göre sadece 2019 yılına ait yapay zekâ içerikli 9110 adet makaleye rastlanmaktadır. Bu alanda dünya ölçeğindeki gelişme ve beklentiler doğrultusunda ülkemizde de yapay zekâ ve dijitalleşme kalkınmada öncelikli alanlar olarak görülmektedir. Bir yandan devlet mekanizması içinde yapay zekâ ile ilgili yeni kurumlar kurulurken, diğer yandan mevcut kuruluş ve politikalar yapılarını yeni yapay zekâ gelişmelerine uyarlamaya çalışmaktadır. Cumhurbaşkanlığı bünyesinde 2018 yılında devlet mekanizması içinde dijitalleşme ve yapay zekâdan sorumlu Dijital Dönüşüm Ofisi (DDO) adında bir organ oluşturulmuştur. Üniversiteler yapay zekâ programlarını kapsayan lisans ve yüksek lisans düzeyinde öğretim vermeye başlamış, yapay zekâ ile ilgilenen uzmanları, profesyonelleri ve diğer paydaşları bir araya getirmek amacıyla farklı sivil toplum kuruluşları da kurulmuştur [4].

Bu çalışmada, hidrolik sistemlerin önemli bileşenlerinden olan oransal valflerin eyletimini (tahriğini) sağlayan doğrusal akımlı bir elektrik motorunun yapay sinir ağları esaslı yapay zekâ temelli açık çevrim modellemesi ve tanımlanan girdi sinyalleri vasıtasıyla bu modelden elde edilen cevapların karşılaştırılması yapılmaktadır. Literatürde, elektrik motorlarının dinamik modellemesi, denetimi ve kararlılıklarının incelenmesi üzerine çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Bunlar arasında geleneksel yöntemlerle birlikte bulanık mantık esaslı klasik ve gürbüz denetim yaklaşımlarının ele alındığı uygulamalar yer almaktadır [5-8]. Mevcut çalışma, bahsedilen model tabanlı modelleme, denetim ve kararlılık yaklaşımlarından farklı olarak, dinamik davranışı doğrusal olarak tanımlanabilen ikinci mertebeden bir sistem için oluşturulan basit bir yapay sinir ağı modelinin sistemi ne kadar temsil edebildiğini gösterip ele alınan sayısal veri setinin büyüklüğüne göre farklı genlikteki çıktı sinyalleri üzerinden valfin kararlılığı hakkında genel bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlaması bakımından yapay zekâ esaslı kararlılık çözümlerine bir katkı sunmaktadır.

2. Yapay Zekâyı Oluşturan Temel Teknikler (Basic Techniques of Artificial Intelligence)

Yapay zekânın çalışma alanları Şekil 1 ile şematik olarak verilmiştir. Bu kapsamda makine öğrenmesi (İng. machine learning, ML), cihazın geçmişte karşılaştığı benzer durumları öğrenmesi olarak

tanımlanabilir. ML karşılaştığı problemi, bu tür benzer özelliklere sahip bir olay ile kıyaslayarak ve tümevarım yöntemini kullanarak çözmektedir. Bu durumda temel prensip, gözlenen durumlarda verilerin makine tarafından tutulması ve öğrenilmesidir. ML; pekiştirmeli öğrenme, denetimli ve denetimsiz öğrenme olmak üzere üç alt başlıkta incelenebilir. Yapay sinir ağları (İng. artificial neural networks, ANN), insan beyninin sahip olduğu bilgi işleme yeteneğinden esinlenerek oluşturulmuştur. Bu ağ sayesinde gözlemlenen olaylar birbirleriyle ağ bakımından yakınsama yapmakta olup girdi ve çıktı verileri çözümlenebilmektedir. ANN'deki ilk katman girdi ve son katman çıktı katmanı olarak adlandırılmaktadır. Derin öğrenme ise, makine öğrenmesinin bir alt dalı olup 2015 yılında LeCun tarafından şöyle tanımlanmıştır: "Derin öğrenme yöntemleri, birden çok temsil düzeyine sahip ve ham girdiden başlayarak her düzeydeki temsili gittikçe yükselen, ayrıca ele alınan unsurları biraz daha soyut bir temsile dönüştüren basit ama doğrusal olmayan modüller kullanılarak elde edilen ve birden çok temsil düzeyine sahip bir öğrenmedir." Derin öğrenme çok katmanlı ANN kullanılarak oluşturulmaktadır [9].



Şekil 1. Yapay zekânın çalışma alanları
(Working areas of artificial intelligence)

Bu doğrultuda yapay zekâyı oluşturan temel teknikler, maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Benzetimli Tavlama,
- Uzman Sistemler,
- Bilgisayarlı Görü,
- Konuşma Tanıma,
- Yapay Sinir Ağları,
- Bulanık Mantık,
- Genetik Algoritmalar,
- Robotik,
- Hibrid (Karma) Sistemler.

Benzetimli Tavlama tekniği en çok tercih edilen tekniklerden biri olup görüntü veya video işleme ve yazılım gibi alanlarda karşılaşılan problemlere en faydalı çözümü çok hızlı sürede vermektedir. Alanındaki önemli başarıları sayesinde literatür çalışmalarında da sıklıkla bu tekniğe yer verilmektedir [10].

Uzman Sistemler modeli, herhangi bir karmaşık sistemde uzman kişinin yaptığı işleri yapan bir bilgisayar programı gibi düşünülebilir. Bu teknik, uzmanın düşünce biçimini bir anlamda taklit ederek, o konudaki önemli problemleri çözmeye yönelik yazılımlar sunmaktadır. Bu yazılımlar genellikle arayüz, veri tabanı ve kural tabanı gibi birden çok programdan oluştuğu için sistem adını almaktadır. Uzman sistemler tavsiye verebilen, problem analiz edebilen, sınıflandırabilen, iletişim kurabilen, tasarım yapıp tahmin yürütebilen, belirleyen, denetleyebilen (kontrol edebilen) ve programlayabilen yazılımlardır [11].

Bilgisayarlı Görü, sayısal veya sembolik bilgi üretmek için dijital görüntüleri elde etme, işleme ve analiz etmede kullanılan bir tekniktir. Ayrıca bilgisayarlı görü ile gerçek dünyadan yüksek boyutlu verilerin çıkarılmasına yönelik uygulamaları da içermektedir.

Konuşma Tanıma, teknolojik süreçte kullanılan yapay zekâ tekniklerinden biri olup insan sesinin mikrofon vasıtasıyla bilgisayar tarafından algılanarak tanınması işlemidir. Bu teknik insan ile bilgisayar arasındaki iletişimde son derece önemlidir [12].

Yapay Sinir Ağları, önceki bölümde de bahsedildiği gibi, klasik programlama gibi belirli bir algoritma çerçevesinde programlanmazlar. Sinir ağları konusu algılama, akıl yürütme ve planlama gibi çeşitli robotik problemleri de kapsamaktadır. Özellikle araştırmacılar, farklı robot platformlarında sinir ağları ile denetim politikaları eğitimi konusunda büyük başarılar elde etmiştir. Tipik olarak bu denetim politikaları, pekiştirmeli öğrenme (İng. reinforced learning, RL) algoritmaları yoluyla elde edilmektedir. Bu alandaki çalışmalarda son derece başarılı olunmasına rağmen, sinir ağı denetleyicileri performansları üzerinde güvenlik açısından kritik birçok uygulama güvenilir teorik temelden hala yoksundur. Sinir ağı denetleyicileri için eksik olan önemli bir nokta, kapalı döngü sisteminin kararlılığı; özellikle Lyapunov kararlılığıdır. Lyapunov teriminde sistem, aslında bölgesel olarak kararlıdır ve bir bölgedeki herhangi bir durumdan başlayarak sistem sonunda bir dengeye yakınsamaktadır. Bu bölge çekim bölgesi (İng. region of attraction, ROA) olarak tabir edilmektedir. Lyapunov kararlılığı, çekim bölgesindeki herhangi bir durum için sistemin asimptotik davranışı üzerinde güçlü bir garanti sağlamaktadır. Bir sistemin Lyapunov kararlı olduğu, ancak ve ancak kesinlikle pozitif tanımlı ve hedef denge durumu dışında her yerde kesinlikle azalan bir Lyapunov fonksiyonu olarak bilinmektedir [13].

Bulanık Mantık tekniği, ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesi'ndeki araştırma ve çalışmalar sonucu bilim dünyasına girmiştir. Bu teknik "saçaklı mantık" olarak da bilinmektedir. Günümüzde önemi daha da artan bulanık mantık, belirsizliklerin tanımı, anlatımı ve çalışılabilmesi için oluşturulmuş katı bir matematik düzenine sahiptir. Bir başka deyişle insanın düşünce sistemini klasik mantığa kıyasla daha iyi modelleyip, deneyimlerini matematiksel ifadeye doğru bir şekilde dönüştürebilmektedir. Bulanık mantıkta hedef bir sonuca ulaşmaktır [14].

Genetik Algoritma tekniği, problem analizinde çözüm uzayı sonsuz nokta ile taranarak oluşturulmaktadır. Bu yaklaşımda, elde edilen çözümler en uygun adayın bulunması amacıyla bir tür yapay seçilime dönüştürülmektedir [15].

Robotik kavramı, yapay zekânın önemli uygulama alanı olan endüstri alanında sıklıkla karşılaşılan bir tekniktir. Düşünülenin aksine, robotik elemanlar bilim kurgu filmlerinde görülen robotlardan görünüm ve işlevsel açıdan çok farklıdır. Endüstriyel robotlar tekrarlı ve günlük işler için daha uygun olup otomotiv sektörü robotlardan en çok faydalanan sektördür. Bu sektörde robotlardan boyama ve bütünleme (montaj) işlemlerinde istifade edilmektedir. Elektronik sektöründe de devrelerin test ve yongaların yerleştirilmesi işlemlerinde robotlar kullanılmaktadır [16].

Hibrid (Karma) Sistemler ise yukarıda bahsedilen tekniklerin bir veya birkaçının birlikte kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Bahsedilen birimler son yıllarda mühendislik problemlerinin test, tasarım ve analizinde etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır [14-17].

3. Dinamik Sistemlerde Kararlılık (Stability in Dynamic Systems)

Dinamik bir sistemin en önemli gereklilik ve karakteristiklerinden biri kararlılıktır. Kararsız bir sistem, sınırı olmayan, işe yaramayan ve istenilmeyen yanıtlar (çıktılar) üretmektedir. Bu nedenle, ele alınan sistemde kararsızlık durumunun hangi şartlar altında olduğunu ve kararlı hale nasıl geçilebileceğine mümkün olduğu kadar dikkat edilmelidir. Dinamik sistemlerde gelen yanıt artan genlikli titreşimler halinde ise kararsızlık söz konusudur. Bu durumda sistemin cevabı sonsuza kadar artamayacağından dolayı sistemde hasar meydana gelebilir. Kararlılık söz konusu olduğunda ise sistemde yanıt azalan genlikli titreşimler şeklinde oluşmaktadır. Sistemin kararlılığını belirlemek için ideal olan yöntem, transfer fonksiyonundan yararlanarak kutuplarını belirlemek ve kutupların karmaşık düzlemdeki konumunu incelemektir. Kutupların belirlenmesi ikinci mertebeden yüksek seviyeli sistemlerde zaman alabilmektedir. Ulaşılmak istenen hedef, kararlılığı sağlamak için bilinmeyen sistem parametrelerini bulmaksa, transfer fonksiyonundan kutupları tespit etme durumu uygulanamaz hale gelmektedir. Bu hususta en çok kullanılan cebirsel kararlılık testi Routh-Hurwitz kararlılık kistasıdır (kriteridir). Bu

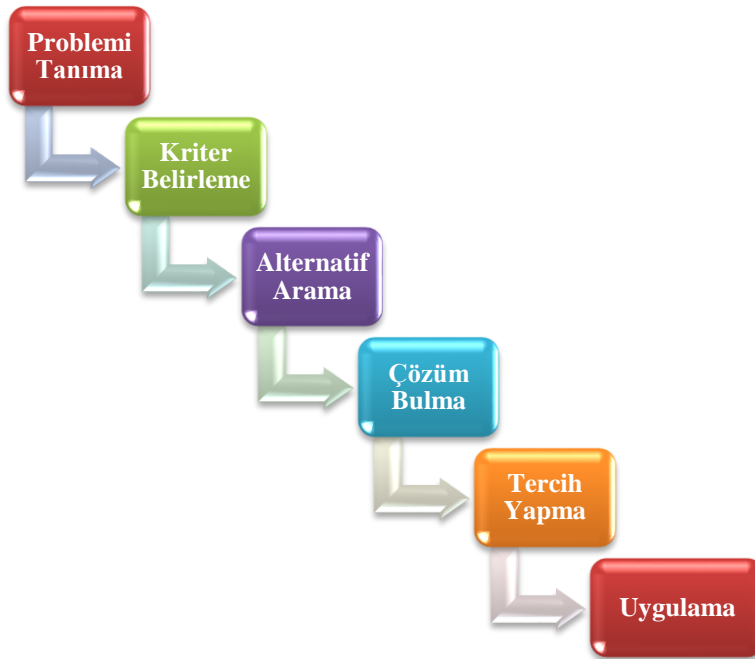
yöntem sistemin kutuplarını bulmadan basit bir teknik ile kararlı olup olmadığını göstermekte ve sistemde kararsızlık tespit edilirse bu durumdan sorumlu köklerin yer ve sayısını belirlemektedir. Routh-Hurwitz kararlılık kistası, ilk tarama olarak bilinen Hurwitz testinden ve uygulanması önemli olan Routh tablosu incelemesinden oluşmaktadır. Sistemler için Routh-Hurwitz kararlılık kistasının yanı sıra Nyquist, Bode ve Nichols diyagramları da sıklıkla kullanılan kararlılık test yöntemlerindedir [18,19].

Yapay zekâ alanının önde gelen tekniklerinden biri olan ANN, kararsız tahmin ediciler olmasına rağmen tıbbi karar destek sistemlerinde sınıflandırma veya regresyon analizleri olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bu kararsızlık, modeli oluşturmak için kullanılan verilerdeki küçük değişikliklerin farklı modellerle sonuçlanabileceği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, farklı veri setleri farklı genelleme doğruluklarına sahip modeller üretebilmektedir. Yapay zekâ, elektrik şebekelerinde de kararlılık değerlendirmesi için uygun bir yol olarak ortaya çıkabilmektedir. Benzetim tabanlı yaklaşımlarla karşılaştırıldığında yapay zekâ, kararlılık değerlendirmesinde model geliştirme ve sayısal hesaplamada potansiyel olarak zaman kazandırabilmektedir. Güç sistemi kararlılık değerlendirmesi için, gerçek zamanlı güç sistemi dinamik modeli temeline dayanan ve önemli hesaplamalar gerektiren zaman kümesindeki benzetim çalışmalarının yapılması gerekmektedir [20].

Model benzetiminin yanı sıra, kararlılık değerlendirmesi için başka bir yöntem de veriye dayalı yaklaşımlardır. Bu yöntemler, ölçüme ve yapay zekâyâ dayalı yaklaşımlar olmak üzere iki alt grupta incelenebilir. Ölçüme dayalı yöntemler, kararlılık değerlendirmesi için basitleştirilmiş modeller geliştirmek için ölçüm verilerini kullanmaktadır. Belirtilen tekniklerde ayrıntılı modellere dayalı zaman alan benzetime kıyasla daha az hesaplama süresi gerekmektedir. Ancak ölçüme dayalı basitleştirilmiş modellerin geliştirilmesi ciddiye alınması gereken bir işlemdir. Buna karşılık, yapay zekâyâ dayalı kararlılık değerlendirmesi veriye dayalıdır ve doğrudan fiziksel ilkelere dayanmamaktadır. Benzetim veya ölçüm verileri kullanılarak oluşturulan yapay zekâ modelleri, sistem özellik girdilerine dayalı olarak kararlılık değerlendirmesi yapabilmektedir. Makine öğrenimi tabanlı yaklaşımların birçoğu da yalnızca bir tür kararlılığı değerlendirebilir. Giriş özellikleri, genellikle belirli bir makine öğrenimi modelinde deneme-yanılma yoluyla seçilmektedir. Kısa süreli kararlılık, bir iletim hattında kısa süre gibi ciddi bir bozulmaya maruz kaldığında güç sisteminin eşzamanlılığını (senkronizasyonunu) sürdürme yeteneğidir. Geçici kararlılığı değerlendirmek amacıyla, yapay zekâyı esas alan sinir ağı, destek vektör makinesi ve karar ağacı temelli yaklaşımlar önerilmektedir. Bunun yanında kararlılık durumu, sistemin her zaman beklenen başarımlarını gereksinimlerini sağlayacağı anlamına gelmemektedir. Örneğin, osilatörlerde sınırlı kararlılık tercih edilmekte olup sınımları azaltmak amacıyla karakteristik denklem kökleri gerçek eksene getirilmeye çalışılmaktadır. Bahsedilen uygulama benzeri alanlarda, kararsızlığın istendiği durumlar da söz konusu olabilmektedir. Örneğin savaş uçaklarında kararlılık, komutların yavaşlamasına ve manevra kabiliyetinin azalmasına neden olduğundan istenmeyen bir durumdur. Sonuç olarak kararlılık isteri, ele alınan duruma göre farklılık gösterebilmektedir [21].

Problem çözme yöntemleri ile ilgili alanda birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Araştırmacıların çoğu problem çözme ve karar verme aşamalarını; problemi saptama ve tanımlama, çözüm için kistas belirleme, alternatif arama, çözüm bulma ve sonuçlandırma, tercih yapma ve uygulamaya koyma olarak sıralamıştır. Bazı araştırmacılar ise bu yaklaşımda değişik sınıflandırmalar kullanmışlardır. Örneğin klasik yaklaşımda üç evre vardır ve bunlar zekâ, tasarım ve seçimi kapsamaktadır.

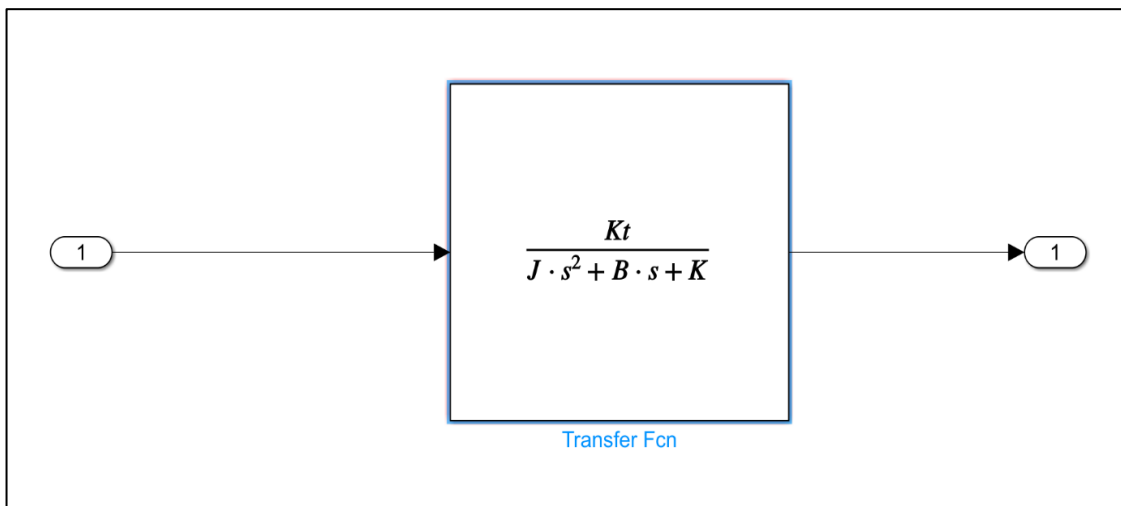
Yapay zekâ teknolojisi, Şekil 2 ile gösterilen bütün adımları desteklemek için kullanılsa da hareketlerinin çoğu dört ve beşinci adımda gerçekleşmektedir. Uzman sistemler, alternatiflerden çözüm bulmak için kullanılmakta olup burada yapay zekânın görevi arama ve değerlendirmeyi sonuç bulma yeteneklerini kullanarak yönetmektir [22].



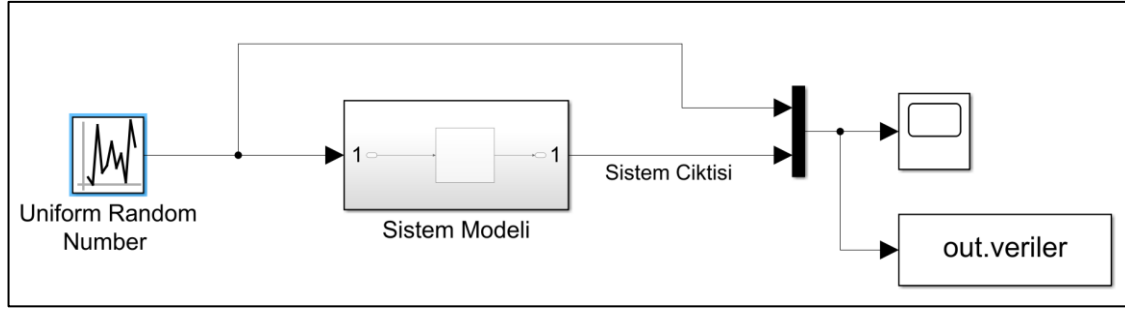
Şekil 2. Problem çözme süreci
(Problem solving process)

4. Bilgisayar Benzetimleri (Computer Simulations)

Çalışma kapsamında ele alınan ve oransal valf eyletimde kullanılan doğrusal akımlı elektrik motorunun matematiksel modeli öncelikle MATLAB® Simulink® üzerinde Şekil 3 ile verildiği üzere modellenmiştir. Ardından sisteme ait girdi verileri, örnek bir valf motorunun teknik veri dosyasından alınarak, hazırlanan MATLAB® kodu ile tanımlanarak bilgisayar benzetimi çalıştırılmıştır. Bahsedilen veriler ele alınan motor için gerçekte uygulanan parametrelerle akım genliği değerlerini içermekte olup çalışma kapsamında kurgulanan benzetim modelinin çalıştırılması için yeterli olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3. Oransal valf eyletim motoruna ait sistem modeli
(System model of the actuation motor of the proportional valve)



Şekil 4. Rastlantısal sayı giriшли orijinal sisteme ait benzetim modeli
(Simulation model belonging to the original system with an input of random numbers)

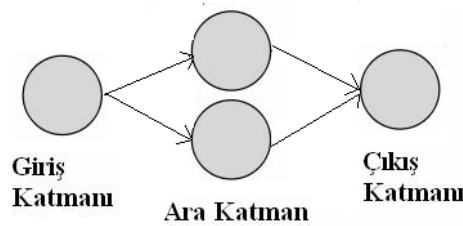
Orijinal sistemin Şekil 4 ile verildiği gibi modellenmesinde rastlantısal sayı girişı amacıyla kullanılan "Uniform Random Number" bloğu için, benzer bir valf motorunun veri kataloğunda belirtildiği üzere uygulanacak girdi akımının "Amper" cinsinden alt ve üst sınırlarına karşılık gelecek şekilde asgari 6 ve azami 6 değeri belirlenmiştir. Ardından ele alınan motora ait sistem modelinde bulunan katsayılar, MATLAB® üzerinde aşağıdaki gibi kararlaştırılmıştır:

- $K_t=0,15 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$
- $J=3\times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $B=0,01 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
- $K=0,1 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$

Girdi verileri tanımlandıktan sonra benzetim modeli 30 saniye süreyle çalıştırılarak çıktı verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen orijinal sistem verilerinin haricinde veri sayılarını artırıp azaltmak yöntemiyle üç farklı girdi ve çıktı verisi elde edilmiştir. Bu veri setleri, benzer çalışmalardaki yaklaşımlar göz önünde bulundurularak 100, 1000 ve 2000 veri sayısına sahip olarak belirlenmiş ve veri setlerinin elde edilmesi sırasında rastlantısal sayı bloğundaki zaman parametresi orantılı olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, her bir benzetimden elde edilen girdi ve çıktı verileri kaydedilmiştir. Burada, 306 adet veriye ait değerler orijinal sistem modelinin çıktıları kabul edilmiştir.

Akabinde, Şekil 5 ile gösterilen yapıda tek giriş-tek çıkışlı (giriş ve çıkış katmanlarında birer hücre bulunan), iki hücreden oluşan tek ara (gizli) katmanlı ve aktivasyon fonksiyonu (1) numaralı eşitlikte verildiği gibi tanımlanan bir yapay sinir ağı oluşturulmuştur.

$$y = \frac{2}{1+e^{-net(x)}} - 1 \quad (1)$$

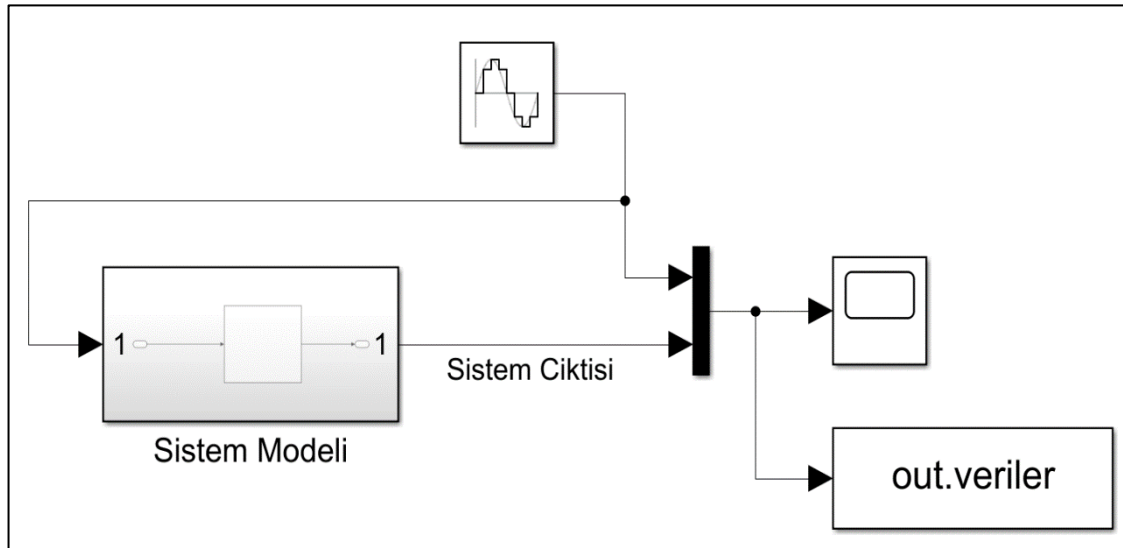


Şekil 5. Oluşturulan yapay sinir ağı yapısı
(Constructed artificial neural network structure)

Burada x , $net(x)$ ve y tabirleri sırasıyla hesaplamannın yapıldığı sinir ağı hücresinin girdi sinyali, girdi sinyalinin ilgili ağırlık fonksiyonu ile çarpılmış hali ve çıktı sinyaline karşılık gelmektedir.

Yapay sinir ağı modelinde hücreler arasında yer alan ağırlık fonksiyonları, geri yayılım (İng. back propagation) algoritması kullanılarak, oluşturulan üç farklı veri seti beslenerek, %1 olarak atanan hata (gerçek değerden sapma) miktarı için hesaplanmıştır. Ağ yapısının momentum katsayısı ve öğrenme hızı da sırasıyla 0,1 ve 0,9 olarak atanmıştır.

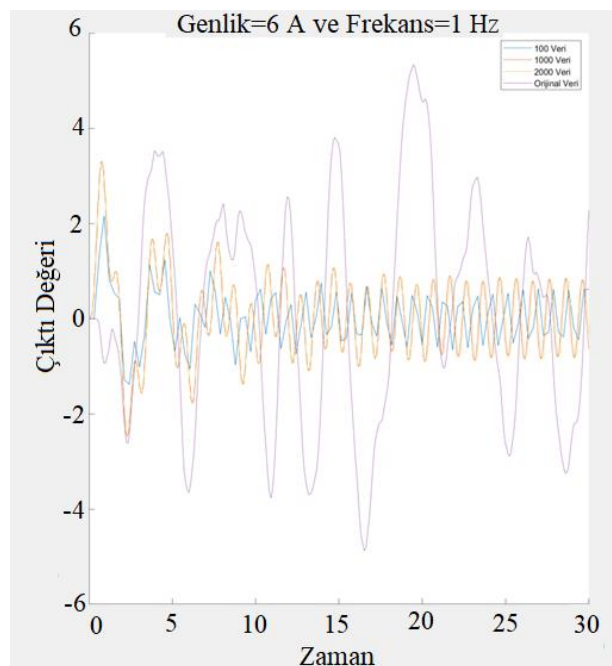
Tüm hesaplama ve öğrenme işlemleri bitirildikten sonra MATLAB® Simulink® üzerinden 100,1000 ve 2000 adet veri seti için sinüs girdileri uygulanarak yapay sinir ağı esaslı elektrik motoru modelinin çıktıları kaydedilmiştir. Bu işlem yapılırken Şekil 6 ile verilen benzetim modeli kullanılmıştır.



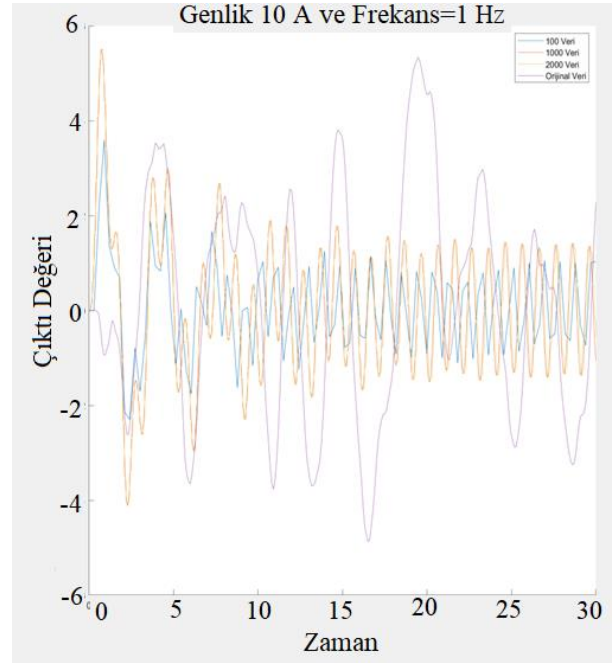
Şekil 6. Sinüs dalgası girişli sisteme ait benzetim modeli
(Simulation model belonging to the system with an input of sine wave)

Yapay sinir ağları ile modellenen sisteme sağlanan sinüs dalgası öncelikle 6 A genlik ve 1 Hz frekansında, sonrasında 10 A genlik ve 1 Hz frekansında ve son olarak da 20 A genlik ve 1 Hz frekansında uygulanmış ve sistem çıktıları kaydedilmiştir. Bu işlemin yapılmasındaki amaç orijinal sistemin 6 A genlikteki girdi çıktı verileriyle sinüs dalgası şeklindeki girdinin verilerinin karşılaştırılması ve kararlılık analizinin yapılmasıdır. Aynı zamanda veri sayısındaki artışın kararlılık açısından sağladığı katkıyı incelemektir.

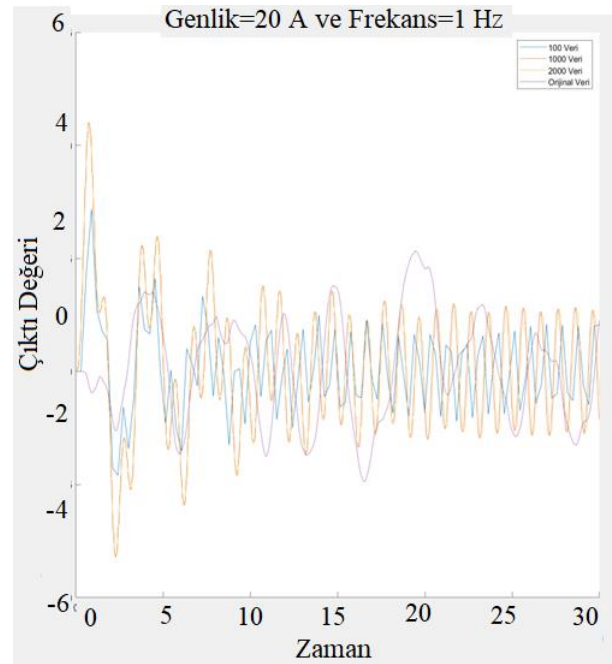
100, 1000 ve 2000 adetlik veri setlerinin üç farklı genlik değerinde çalıştırılmasının ardından çıktılar MATLAB® Workspace® bölümüne 100x1, 1000x1 ve 2000x1'lik matrisler olarak kaydedilmiştir. Sonuçta, bulunan çıktı verileri kullanılarak, veri setleri Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 ile gösterilen tek bir grafik üzerinde kıyaslanmıştır.



Şekil 7. Kıyaslama grafiği (6 A genlikli sinüs girdisi için)
(Comparison plot for a sine wave input with a width of 6 A)



Şekil 8. Kıyaslama grafiği (10 A genlikli sinüs girdisi için)
(Comparison plot for a sine wave input with a width of 10 A)



Şekil 9. Kıyaslama grafiği (20 A genlikli sinüs girdisi için)
(Comparison plot for a sine wave input with a width of 20 A)

Oluşturulan yapay sinir ağları esaslı modellerin eğitiminde kullanılan veri sayısı arttıkça yani 100 veriden 2000 veriye gittikçe, bu verilere karşılık gelen sistem cevaplarının genlik değerlerinin orijinal sistem cevabının genliğine yaklaştığı görülmektedir.

Orijinal sistem cevabının elde edildiği azami girdi genliği olan 6 A'dan daha büyük genlikli (10 ve 20 A) bir sinüs girdisi uygulandığı zaman, başlangıçtaki kısa süre dışında sistem cevabının genliği orijinal sistem cevabı genliğinden genellikle daha fazla gözlenmiştir. Teorik olarak sonsuz veriyle eğitilen yapay sinir ağı bir modelin çıktısının genliği en fazla orijinal sistem çıktısının genliği kadar olabilmektedir. Dolayısıyla, sonsuzdan daha az veriyle eğitilen yapay sinir ağı bir sistemin cevabı

orijinal sisteminkinden büyük oluyorsa, bu durum, ilgili yapay sinir ağı modelin kararsızlığına işaret etmektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Oransal valf eyletiminde kullanılan doğrusal akımlı bir elektrik motoru modeli üzerinden gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri sonucunda, ele alınan üç farklı giriş sinyali genliği için de yapay sinir ağı eğitiminde kullanılan veri setindeki eleman sayısının artışına bağlı olarak sistem kararlılığında iyileşmenin gözlenmesi, nispeten basit yapıda olan bir valf modeli üzerinden yapılan çalışmanın mütevazı bir katkısı olarak değerlendirilebilir. Göz önüne alınan elektrik motorunun doğrusallaştırılmış dinamik modeline sağlanan girdi akımına karşılık elde edilen cevap sinyallerinin oluşturulan yapay sinir ağı temelli sistem modelinin çıktılarıyla karşılaştırılması sonucunda, girdi akımı genliğine bağlı olmaksızın ağ eğitiminde kullanılan veri sayısının artışıyla doğru olarak sistem kararlılığının da iyileştiği gözlenmiştir. Elektrik motoru gibi nispeten basit bir dinamiğe sahip bir bileşen üzerinden yapılan bu incelemenin sonuçları, daha karmaşık ve kapsamlı sistemlerin kararlılık incelemesinde de dikkate alınabilecektir.

Genel anlamda, yapay zekâ temelli algoritmalar, özellikle son yıllarda gerçekleşen kayda değer ilerlemelere rağmen, kararlılık bakımından istenilen seviyeye henüz ulaşamamıştır. Bahsedilen olumsuzluk, yalnızca sivil uygulamalarda değil, doğruluk ve hassasiyetin son derece büyük önem arz ettiği askeri alanda da yapay zekâ esaslı platform ve mühimmatın kullanımına sınırlama getirmektedir. Bu durum, geliştirilen yapay zekâ esaslı sistemlerin yalnızca belirlenen koşullar dahilinde sınırlı kullanımına neden olmaktadır. Kararlılıkla ilgili genel ve kapsayıcı bir yaklaşımın geliştirilmesi, yapay zekânın sivil ve askeri maksatlı kullanım sahasını önemli ölçüde genişletecek ve çok daha güvenli ve güvenilir hale getirecektir [23].

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] N. Yüksel ve H. R. Börklü, "Yapay zeka destekli kavramsal tasarım: tekerlekli sandalye tasarım seçenekleri değerlendirmede bulanık mantık kullanımı," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt: 7, No: 3, Sayfa: 309-319, 2021. doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.13
- [2] G. Yıldırım, F. Şahiner ve H. T. Kahraman, "Proje yönetiminde yapay zekâ tabanlı paydaş analizi aracının tasarımı," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt: 7, No: 2, Sayfa: 81-89, 2021. doi.org/10.30855/gmbd.2021.02.01
- [3] M. F. Erkoç, *Yapay Zekâ Perspektifinde Eğitime Yönelik Uzman Sistem Modellemesi*, Marmara Üniversitesi, Türkiye, 2008.
- [4] A.T. Yekeler, *Between Global and National Expectations: A Study of Artificial Intelligence in Turkey*, Maastricht Üniversitesi, Hollanda, 2020.
- [5] B. Zhang, P. Niu, X. Guo and J. He, "Fuzzy PID control of permanent magnet synchronous motor electric steering engine by improved beetle antennae search algorithm," *Scientific Reports*, vol. 14, 2898, 2024. doi: 10.1038/s41598-024-52600-8
- [6] A. Bahadır and Ömer Aydoğdu, "Modeling of a brushless dc motor driven electric vehicle and its pid-fuzzy control with dSPACE," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 41, no. 1, pp. 156-177, 2023. doi:10.14744/sigma.2023.00015
- [7] D.F. Azizah, K. Dedes, A.B.P. Utama and A. Aripriharta, "DC motor speed modeling and simulation using fuzzy logic control method," *Proc. of the 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)*, Malang, Endonezya, 2021. doi:10.1109/ICEEIE52663.2021.9616636
- [8] V. Yarlagadda, G.S. Kumar, G. Radhika, R. Gnanendar and K. Rajesh, "Robust fuzzy logic controller for DC motor stability enhancement under load disturbances," *Intelligent Computing in Control and Communication*, 2021.
- [9] Y. LeCun, Y. Bengio, Y. and G. Hinton, G, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.
- [10] B. Karasulu, "Benzetimli tavlama tekniğini kullanan eniyilenmiş görüntü ve video işleme üzerine kısa bir literatür araştırması," *Electronic Journal of Vocational Colleges*, Cilt: 8, No: 2, Sayfa: 35-40, 2018.
- [11] Ö. Civalık, "Mühendislik sistemlerinde kullanılan uzman sistemlerin (US) temel prensipleri," *Yapı Dünyası*, 2002.
- [12] N. Yalçın, "Konuşma tanıma teorisi ve teknikleri," *Kastamonu Eğitim Dergisi*, Cilt: 16, No: 1, Sayfa: 249-266, 2008.

- [13] H. Dai, B. Landry, L. Yang, M. Pavone and R. Tedrake, "Lyapunov-stable neural-network control," *arXiv preprint arXiv:2109*, no. 14152, 2021.
- [14] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 3-28, 1978.
- [15] N. Çetin, "Genetik algoritma," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2002.
- [16] K. S. Fu, R. C. Gonzalez and C. G. Lee, C. G., *Robotics*, IEEE Computer Society Press, 1983.
- [17] Q. He, H. Zheng, X. Ma, L. Wang, H. Kong and Z. Zhu, Z., "Artificial intelligence application in a renewable energy-driven desalination system: A critical review," *Energy and AI*, no. 100123, pp. 1-14, 2022.
- [18] E. X. DeJesus and C. Kaufman, C., "Routh-Hurwitz criterion in the examination of eigenvalues of a system of nonlinear ordinary differential equations," *Physical Review A*, vol. 35, no. 12, pp. 52-88, 1987.
- [19] S. Çaylan, "Dinamik Sistemlerin Kararlılık Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye, 2004.
- [20] P. Cunningham, J. Carney and S. Jacob, "Stability problems with artificial neural networks and the ensemble solution," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 20, no. 3, pp. 217-225, 2000.
- [21] S. You, Y. Zhao, M. Mandich, Y. Cui, H. Li, H. Xiao and S. Fabus, "A review on artificial intelligence for grid stability assessment," *Proc. of the 2020 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids*, pp. 1-6, 2020.
- [22] F. Hayes-Roth, "The Knowledge-based expert system: A tutorial," *Computer*, vol. 17, no. 09, pp. 11-28, 1984.
- [23] E. Cömert, S. Karaaslan ve B. Özkan, "Yapay zekâ temelli sistemlerin kararlılık açısından değerlendirilmesi," 10. Savunma Teknolojileri Kongresi (SAVTEK 2022) Bildirileri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2022.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Biomimetic Based Underground Digging Robot Design

Ceyda Doğu^a, Adnan Akkurt^b

Submitted: 21.11.2023 Revised : 15.05.2024 Accepted: 28.06.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A14

ABSTRACT

Keywords: Biomimetic, underground digging robot, biomimetic robot

^{a*} Gazi Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5407-5209
e mail: ceyda.dogu@gazi.edu.tr

^b Gazi Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0622-1352

*Corresponding author:
ceyda.dogu@gazi.edu.tr

The field of robotics has long been inspired by notable adaptations and functionalities found in nature, leading to the development of biomimetic designs that mimic the abilities of living organisms. The design of underground excavation robots and various applications has been approached with a biomimetic perspective, offering numerous alternatives for innovation and new product development. These robots draw inspiration from a wide range of animals, including mammals, insects, and crustaceans, to develop effective excavation techniques and adaptability to complex underground environments. In this study, solutions for excavation tasks are presented, drawing inspiration from the armadillo. The robot mimics the unique anatomical structure of the armadillo and its digging function to perform effective and efficient excavation. The armadillo's ability to move rapidly and effectively underground serves as a primary inspiration for the robot's design. This study provides a detailed look into the design principles and methodologies used in the development of biomimetic underground excavation robots, demonstrating their potential utility in underground exploration, mining, and various other subterranean activities.

Biyomimetik Tabanlı Toprak Altı Kazma Robotu Tasarımı

ÖZ

Robotik alanı, uzun süredir doğanın dikkate değer adaptasyonlarından ve işlevselliklerinden ilham almış ve canlı organizmaların yeteneklerini taklit eden biyomimetik tasarımların geliştirilmesine yol açmıştır. Yeraltı kazı ve farklı uygulamaları için ihtiyaç duyulan bu robotların biyomimetik yaklaşım ile tasarlanması ve benzeri çalışmalar alternatif inovasyon ve yeni ürün geliştirmeye yönelik çalışmalarda birçok alternatifi kullanıma sunmuştur. Bu robotlar, etkili kazma tekniklerini ve karmaşık yer altı ortamlarına uyum sağlama yeteneklerini geliştirmek için memeliler, böcekler ve kabuklular da dahil olmak üzere yer altı ve yer üstü çok çeşitli hayvanlardan ilham alınmaktadır. Yapılan bu çalışmada armadillo canlısından ilham alarak kazma işlemleri için çözümler sunulmaktadır. Robot, armadillonun benzersiz anatomik yapısı ve toprak altında kazıma işlevini taklit ederek etkili ve verimli bir kazma işlemini gerçekleştirmektedir. Armadillonun toprak altındaki hızlı ve etkili ilerleyebilme yeteneği, robotun tasarımında temel bir ilham kaynağıdır. Yapılan çalışmada biyomimetik yer altı kazma robotlarının geliştirilmesinde kullanılan tasarım ilkeleri ve metodolojilerine detaylı bir bakış sunarak, yer altı keşfi, madencilik ve bunların dışında birçok yeraltı çalışmalarında kullanılabilir oldukları ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler:
Biyomimetik, yeraltı kazma robotu, biyomimetik robot

1. Giriş (Introduction)

Teknolojik gelişmeler her geçen gün mobil robotları karada, denizde ve uzayda olmak üzere birçok alanda kullanılmakta ve gelişimleri süreklilik arz etmektedir. Yapılan araştırmalarda mobil robotların yeraltı dünyası için çok fazla uygulamasının olmadığı tespit edilmiştir [1]. Oysaki basit bir su veya benzeri bir akışkanın transferi için yer üstünden aşağı doğru kanallar kazılmakta ve bu durum çevreye zarar vermekte, insanların rutinini gerçekleştirmelerinde problemlere sebep olmasının yanısıra görüntü kirliliğine de sebep olabilmektedir.

Yeraltı robotları, insanlar için tehlikeli ve zor olan önemli görevleri yerine getirerek büyük kolaylık sağlayabilmektedirler. Bu robotlar, kentsel alanlarda, yeşil alanlarda veya tarım arazilerinde kablo döşeme, tohum ekme gibi işlemleri gerçekleştirebilirken, savunma sanayiinde istihbarat toplama, jeolojik araştırmalar veya madencilik faaliyetleri gibi alanlarda da kullanılabilirler. Bu tür uygulamalar, yeraltı robotlarının çok yönlü ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Yeraltı robotlarının tipik olarak toprakta, kayada veya kumda kazma, gezinme, delme veya çevreyi algılama gibi görevleri gerçekleştirmeleri beklenmektedir. Yeraltı robotlarının tasarımındaki en önemli zorluklardan biri yeraltı ortamlarının farklı özelliklere sahip olması ve bu yapının oluşturduğu zorlu koşullarda hedeflenen görevlerini yapabilmelerini sağlamaktır. Yeraltında ilerleyebilmeleri için itme gücünü sağlayacak motora, manevra yapabilen bir gövde yapısına, toprak, kum, toza hatta yumuşak kayaç yapıda ilerlemesini sağlayacak hareket sisteminin yanı sıra çalışma ortamında oluşacak tozun hassas olan sistemlere sızmasını önlemek temel tasarımda en önemli kriterler olacaktır. İstenilen özelliklerde bir robot tasarlamak için doğada bulunan çözümlere bakmak en etkili yöntem olacaktır. Bu karışık problemlerin çözümü için doğadaki model, sistem ya da davranışları taklit ederek tasarımın gerçekleşmesinin değerlendirilmesine yönelik bir tasarım yaklaşımı olarak biyomimetik kullanılması önemli olacaktır [2].

Biyomimetik veya mühendislik tasarımında biyolojik sistemlerin ve yapıların taklidi, son yıllarda giderek daha gündemde olan bir çalışma alanı haline gelmiştir. Biyomimetik yeraltı kazma robotlarının tasarım süreci, oyuk açan, tünel kazın hayvanların anatomik ve davranışsal özelliklerinin analiz edilmesini ve bunların işlevsel mühendislik çözümlerine dönüştürülmesini içerir. Araştırmacılar, uzuv morfolojisi, yuva geometrisi ve kazma mekanizmaları gibi temel özellikleri belirlemek için solucanlar, köstebekler, kabuklu canlılar ve yengeçler dahil olmak üzere çeşitli organizmaları incelemişlerdir. Çeşitli canlıların yuva yapma yeteneklerinden ilham alarak tasarlanan bu olağanüstü makineler, doğanın yeraltı canlılarında bulunan verimliliği ve uyum sağlama yeteneğini taklit etmeyi amaçlamışlardır. Böylece tasarımcılar, bu özellikleri taklit ederek robotun zorlu yer altı ortamlarında verimli bir şekilde gezinme ve kazı yapma yeteneğini geliştirebilirler. Biyolojik benzerlerinin stratejilerini ve biyomekaniklerini taklit eden biyomimetik yeraltı kazma robotları, robot biliminde farklı bir bakış açısı sunarak, madencilik, altyapı geliştirme, tarım gibi alanlarda etkili büyük değişimler sağlayabilmeyi hedeflemektedir.

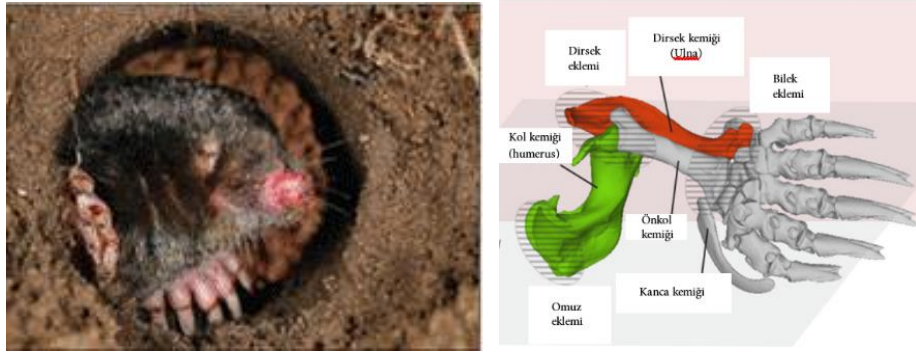
Yapılan çalışmada armadilloların anatomik özelliklerinden ilham alarak biyomimetik yeraltı kazma robotu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Armadilloları bu kadar yetenekli kazıcılar yapan özellikleri değerlendirilerek tasarım süreçleri kapsamında robot sistem ve mekanizmaları ile özelliklerinin daha verimli ve etkili bir kazıma makinesine dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonrası imalat süreçlerinin gerçekleştirilmesi sonucu sahada önemli bir boşluğu dolduracağı öngörülmektedir. Gerçekleştirilen tasarım makine, imalat, sanayi başta olmak üzere etkileşimli alanlarda biyomimetik potansiyel faydaları konusunda farkındalık oluşturmayı ve tasarımda yaygınlaştırılmasına katkı vererek daha geniş alanlarda kullanılmasını sağlamak hedeflenmiştir.

2. Literatür Araştırması (Literature Research)

Evrende yaşayan veya nesli tükenmiş canlılar milyonlarca yıl boyunca bir evrim süreci ile birlikte yaşadıkları çevreye uyum sağlamak için birçok farklı yeteneklerini geliştirmişlerdir [3]. Biyomimetik yeraltı kazma robotları, biyolojik sistemlerden ilham alan çeşitli hareket ve kazma mekanizmalarını kullanır. Bunlar arasında peristaltik sürünme, yılan benzeri hareket, vidalı tahrik ve pençe tabanlı kazı yer alır. Her mekanizma, manevra kabiliyeti, farklı toprak türlerine uyum sağlama ve enerji verimliliği açısından belirgin avantajlar sunar. Toprak altında ve toprak üstünde yaşayan hayvanlar, yaşadıkları ortamdaki çevre koşullarına, toprak türüne göre çeşitli kazma mekanizmaları geliştirmişlerdir.

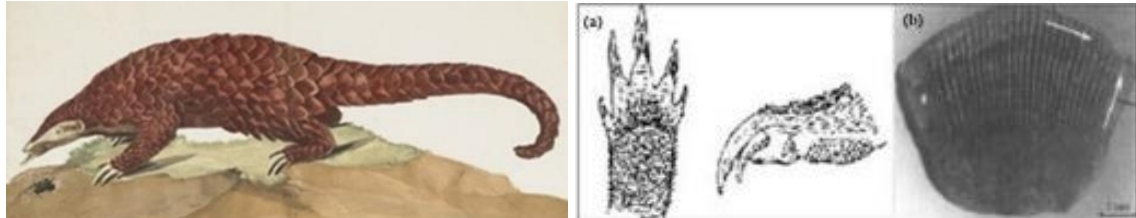
2.1. Omurgalı kazıcı hayvanlar (Vertebrate digging animals)

Kazıcı hayvanlar arasında yaşamının büyük çoğunluğunu toprak altında geçiren en popüler memeli hayvan köstebekler olarak bilinir (Şekil 1). Köstebek canlıları geniş ön ayakları ile vücut boyutları ile ilişkisi, toprağın verimli bir şekilde kazılmasına izin verir. Vücut boyutlarına göre büyük ve kazı için gelişmiş ön pençeleri ile çok iyi bir şekilde toprak altında hareket edebilirler [4]. Ayrıca araştırmacılar tarafından gözlemlenen birçok kazıcı omurgalıdan farklı olarak köstebek, kazı sırasında pençesini vücudu doğrultusunda çekerek toprağı vücudunun altına veya üzerine atmak yerine bileğini yaklaşık 90 derece çevirerek toprağı vücudunun yan tarafına doğru itmektir [5].



Şekil 1. Bir köstebek örneği ve köstebegin sol ön ayağının anatomisinin çizimi. Kol kemiği (Humerus) yeşil renklidir ve Dirsek kemiği (Ulna) kırmızı renklidir. (Pauline Costes, 2022) (Illustration of a mole specimen and the anatomy of the mole's left forelimb. Humerus is green colored and Ulna is red colored.)

Pangolin, vücudu pullarla kaplı bir diğer kazıcı omurgalı canlıdır (Şekil 2). Ön pençeleri ile 3 metreyi aşan derinliklerde tüneller kazabilirler [6]. Pangolinler kazma mekanizmasından ziyade vücudundaki pulların yeteneğindedir, pullar sayesinde toprak altında hareketinde sürtünmeye karşı direnç göstermesi ile zarar görmeden kolay hareket etmesini sağlar [7]. Ayrıca bu pulları çevresindeki tehlikelere karşı savunma aracı olarak kullanır [8].



Şekil 2. Bir pangolin örneği ve pangolin pençe yapısı: (a) Pangolinin ön pençesinin yandan ve alttan temsili çizimi (Pocock, 1924), (b) Pangolin pulu (Tong ve diğerleri, 2007) (An example of a pangolin and pangolin claw structure: (a) Representative drawing of the front paw of a pangolin from the side and from below (Pocock, 1924), (b) Pangolin scale)

Yer altında yuva yapan canlılar arasında memeli grubundan bir diğeri ise armadillolardır (Şekil 3). Armadillolar, yumuşak toprakta yuva yaparlar ancak nesli tükenmekte olan bir memeli olmasından dolayı çok bilinmeyen yönü olan fakat çok iyi kazıcı olarak bilinen hayvanlardır. Hatta memeliler arasında en yaygın kategori olan "çizik kazıcılar" olarak kabul edilirler. Çizik kazma, yeraltında ilerlerken ayakların yerden aşağı doğru hareket etmesi ve daha sonra geriye doğru çekmesidir [5]. Bu kazıyıcılar, ayaklarını toprağı saplayarak güç uygularlar ve ardından ayaklarını geriye doğru çekerek toprağı kazarak ilerlerler. Bu hareket ile aynı bir kazıcının toprağı kazması gibi işlevini gerçekleştirir. Dokuz şeritli armadilloların, toprağı arka ayaklarıyla geri itmeden önce burunları ve ön ayaklarıyla gevşettiği de bilinmektedir [9].

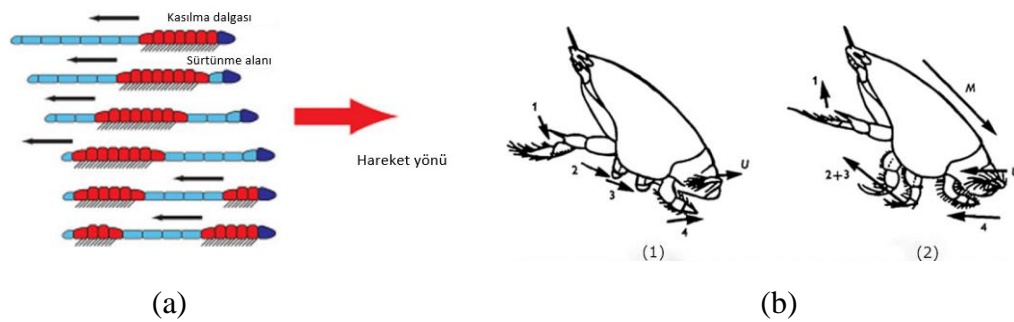


Şekil 3. Dokuz bantlı armadillo (Nine-banded armadillo)

2.2. Omurgasız kazıcı hayvanlar (Invertebrate burrowing animals)

Doğada, toprak altında yaşayan veya beslenme, saklanma gibi sebeplerle toprağı kazmayı tercih eden omurgasız hayvanlar da mevcuttur. Genellikle, omurgasız ve yumuşak gövdeli canlılar, penetrasyon direnci etkisinden dolayı vücutlarının sürekli kalınlaşmasını sağlayan peristaltizm benzeri bir hareketle yuva yaparlar. Penetrasyon direnci (PR), kök büyümesi için mekanik empedansa ve mahsul veriminin azalmasına neden olan sıkışma nedeniyle kısıtlamalara sahip alanların belirlenmesine izin veren bir toprak özelliğidir [10].

Solucanlar, yumuşak gövdeli ve omurgasız canlılara örnektir ve peristaltik bir hareketle toprağı girer. Peristaltik hareket aksel olarak uzayan ve radyal olarak genişleyen dalgaların ön segmentten arkaya yayıldığı bir hareket yöntemidir (Şekil 4 (a)).



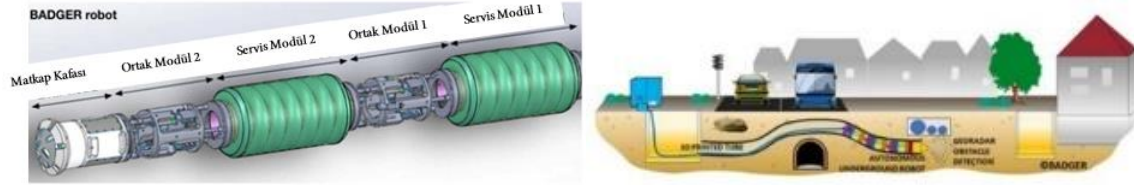
Şekil 4. (a) Bir solucanın peristaltik sürünme modeli (T. Nakatake, 2016) (b) Emerita kabuklunun kazma aşamaları: (1) kurtarma darbesi ve (2) güç vuruşunda limba ile oyuk açma sırasındaki konumu gösteren Emerita'nın yanıl açıdan diyagramı. Oklar hareketi gösterir. (1-4). (Trueman, 1970) (a) Peristaltic crawling model of an earthworm (T. Nakatake, 2016) (b) Digging stages of the Emerita crustacean: (1) rescue stroke and (2) diagram of Emerita from lateral angle showing the position during burrowing with the limba in the power stroke. Arrows indicate movement. (1-4).)

Emerita, kumsal bölgelerde yaşayan bir omurgasız canlıdır. Kumsal kumda gömülü kalabilmek bu canlılar için çok önemlidir. Emerita'nın telzon (arka) bölgesi kazacağı kuma ilk temas eden kısmı olmakla birlikte telzon bölgesindeki kuyruğumsu uzvu ve dördüncü yani en arka ayak çifti kazma görevini üstlenmektedir. Kalan göğüs bölgesindeki üç çift ayak ise toprak içerisinde hareketini sağlamaktadır (Şekil 4 (b)) [11].

2.3. Biyomimetik toprak altı kazma robotlarına örnekler (Examples of biomimetic underground digging robots)

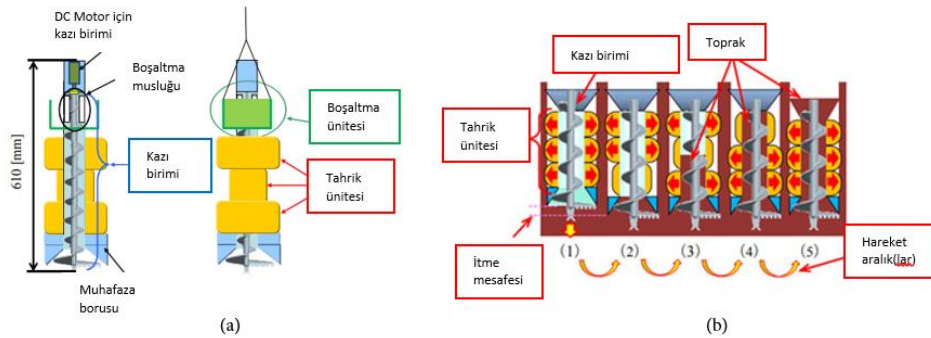
Biyomimetik yeraltı robot tasarımı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, çeşitli alanlarda önemli uygulamalara odaklanmaktadır. Bu çalışmalar arasında, yeni maden arayışı, ay toprağı (regolit) numune alımı, kimyasal kaynaklarının konum tespiti, yeraltı kabloları ve boru hatlarında hata arayışı gibi bir dizi farklı alan bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, özellikle uzay uygulamalarında toprak altının analizi için derin kazı işlemlerinin önemli olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, Ay'da ve diğer gezegenlerde yeraltı kaynaklarının incelenmesi için derin kazılar gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, yeni maden arayışlarında da benzer çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların birçoğu, tahrik mekanizmasını biyomimetik olarak solucanlar tarafından kullanılan peristaltik sürünme hareketine dayanmaktadır.

Uzay teknolojilerinde kullanılan ilk örnek: Badger Yeraltı Robotu, zorlu ortamlarda çalışmak için robotik tünel solucanıdır (Şekil 5). 2010 yılında NASA tarafından tasarlanan ve geliştirilen bir biyomimetik peristaltik sürünme tahrik mekanizması kullanır. Yeraltı boşluklarında açık kazıya ihtiyaç duymadan küçük çaplı kavisli tüneller inşa etmek için yeraltında delme ve manevra yapmak için kullanılır [12].



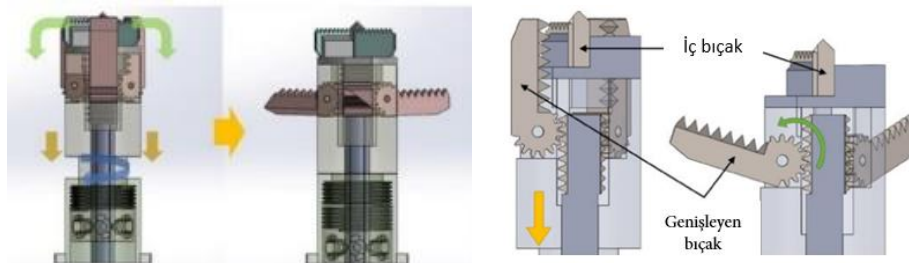
Şekil 5. Badger Yeraltı Robotunun CAD konsepti (P. Vartholomeos, 2021) (CAD concept of the Badger Underground Robot)

Solucanın hareket etmesini sağlayan peristaltik sürünmesinden ilham alarak yapılan bir başka tasarım, Ay'ın yeraltı araştırmaları içindir. Bu robot üç kısımdan oluşmaktadır: itme, kazma ve boşaltma kısımlarıdır (Şekil 6 (a)). Bu peristaltik hareket sayesinde, robot kararlı bir şekilde ilerler ve kazı reaksiyon kuvvetine karşı konumunu korur. Tahrik ünitesi, robotu peristaltik sürünme hareketiyle ilerletirken, hafriyat ünitesi toprağı bir burgu yardımıyla kazar ve böylece toprağı taşırır (Şekil 6 (b)) [13].



Şekil 6. (a) Hafriyat robotunun şeması (b) Robotun kazı yöntemi (T. Nakatake, 2016) (Diagram of the earthmoving robot (b) Excavation method of the robot)

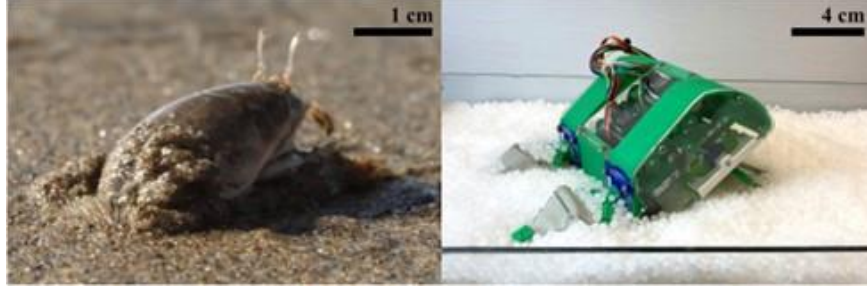
Yeni enerji kaynakların keşfi için önerilen biyo-esinli mekanizma ise, çıplak köstebek faresinin dişlerini ve geniş çene hareket aralığını taklit ederek genişleyebilen ve büzülebilen bir matkap ucu tasarlanmıştır (Şekil 7). Önerilen genişletilebilir matkap ucu, yalnızca bir dönüş motoru kullanarak delme için genişleme/büzülme işlevini ve dönüşü gerçekleştirir. Geliştirilen matkap ucu, hareket için bir gövde bölümü ve kazı için bir bıçak bölümünden oluşmaktadır. Delme ilerlediğinde, matkap ucu, çıplak bir köstebek faresinin geniş ağzı gibi genişlemiş bir durumda döner [14].



Şekil 7. Matkap ucunun genişletilmesi ve küçültülmesi (Junseok Lee, 2019) (Expanding and reducing the drill bit)

EMBUR (EMerita Burrowing Robot), Pasifik köstebek yengeci olan Emerita analogu'dan esinlenerek tasarlanmıştır. Bu robot, köstebek yengecinin kazma becerisini taklit etmek amacıyla geliştirilmiştir. EMBUR, köstebek yengecinin bacaklarını kullanarak granüler bir alt tabakaya dikey olarak

kazabilmesini sağlamak için benzer bir yöntem kullanılmıştır. Bu amaç ile köstebek yengedinin bacak çifti gruplarına benzer bir yapıda iki bacak çifti kullanılmış ve bu bacaklar aracılığıyla kazma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Köstebek yengeçleri, yaklaşık 1 cm/s hızında oyuk açma yeteneğine sahiptir ve diğer kabuklulara kıyasla dört kat daha hızlı hareket ederler (Dorgan, 2015). Bu özellikleri, zorlu intertidal substrata hızlı ve sağlam bir şekilde girmelerini sağlar. Bu nedenle, Emerita analoga biyomimetik tasarım için ideal bir model sistemidir ve ek tasarım ve kontrol ilkelerini belirlemek için kullanılabilir [15].



Şekil 8. Pasifik köstebek yengedinden Esinlenen Robot (Laura K.Treers, 2022) (Robot Inspired by Pacific Mole Crab)

Yapılan araştırmalar, biyomimetik yaklaşımın yeraltı kazma robotlarının performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu yaklaşım, robotların etkili kazma yeteneklerini, manevra kabiliyetini ve enerji verimliliğini geliştirmede kritik bir rol oynamaktadır. Doğal organizmaların biçim, form ve davranışları yeraltı kazıma işlevi için çok yönlü bir ilham kaynağı olmaktadır. İncelenen bu kazıcı organizmaların kazma davranışları detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Tablo 1’de belirtilen karşılaştırmalar, biyoilhamlı yeraltı kazma robotlarının tasarımını şekillendirirken performanslarını etkileyen birtakım faktörleri belirlemeye yardımcı olmaktadır.

Tablo 1. Kazıcı canlıların kazma davranışları karşılaştırılması (Comparison of digging behaviors of digger creatures)

Kazıcı Canlı	Kazı Stratejisi	Avantajlar	Dezavantajlar
Köstebek	Kapma itme	Keskin dişler sert toprağı delebilir. Ön pençeler tüneller kazmaya izin verir.	Küçük hareket alanı vardır. Karmaşık tüneller kazmak zor olabilir.
Armadillo	Kapma itme	Güçlü pençeler ve ön ayaklar kazma için gelişmiştir. Kabuk koruma ve toprak altında rahat hareket etmesini sağlar.	Yavaş hareket eder. Sığ tüneller kazma eğilimindedir.
Pangolin	Pullarla kaplı güçlü pençeler	Pullar kazarken koruma sağlar. Güçlü pençeler sert toprağı kazabilir.	Yavaş hareket eder. Derin tüneller kazmak zor olabilir.
Solucan	Peristaltik sürtünme	Küçük alanlarda kazmaya uygundur. Doğrusal olmayan tüneller kazabilir.	Zayıf ve savunmasızdır. Derin tüneller kazmak zor olabilir.
Pasifik Köstebek Yengeci	Dalgalanma	Kumda hızlı ve kolay kazıma sağlar.	Karmaşık tüneller kazmak zor olabilir. Sert topraklarda kazıma zorluğu.

3. Materyal ve Metod (Materials and Methods)

3.1. Biyomimetik tasarım (Biomimetic design)

Biyomimetik kelimesi Otto H. Schmitt tarafından 1969 yılında Yunanca “bios” (hayat) ve “mimisis” (taklit etme) kelimelerinden türetilmiştir (Schmitt, 1969). Aslında biyomimetik kavramı, daha sonra Janine Benyus’un “Biyomimetik: Doğadan İlham Alan İnovasyon (1997)” kitabı ile popüler olmuştur. Bu kitapta biyomimikri “doğanın modellerini inceleyen ve ardından insan sorunlarını çözmek için bu tasarımları ve süreçleri taklit eden veya bunlardan ilham alan yeni bir bilim” şeklinde tanımlanmaktadır. Biyomimetik, 'biyomimesis', 'biyomimikri', 'biyonik', 'biyolojik olarak esinlenmiş tasarım' ve biyolojiden kopyalamayı, uyarlamayı veya üretmeyi ima eden benzer kelime ve deyimlerle eş anlamlı olarak kastedilmektedir [16]. Türkçeye de birçok biçimde; biyo-esinlenilmiş, biyotaklit, biyomimikri şeklinde çevrilmiştir.

Janine Benyus tarafından kurulan Biyomimikri Enstitüsü'nün Biyomimikri 3.8 Kaynak El Kitabı'nda biyomimikri kavramını üç temel kavram ile tanımlar;

- Taklit etmek: Doğanın formlarından, sistemlerinden ve süreçlerini öğrenme ve bunları kopyalamanın bilimsel olarak uygulanmasıdır.
- Ethos (öz): Doğada yaşamın ne şekilde çalıştığını anlama ve bunu elverişli şartları destekleyen ve yaratan tasarımların oluşturma felsefesidir.
- Yeniden bağlan (reconnect): Görünüşte 'ayrı' olması ile aynı zamanda insanların ve doğanın aslında iç içe olduğunu anlayışını benimser. Yeniden bağlantı, insanlar ve doğanın arasındaki bu ilişkiyi araştıran ve derinleştiren bir pratik ve düşüncedir.

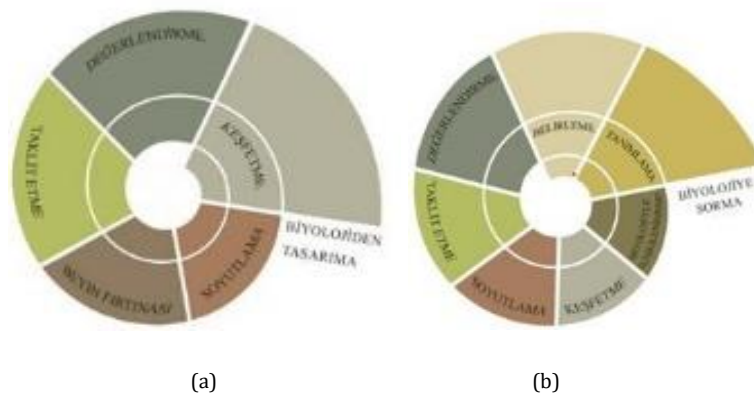
Doğayı taklit etmenin de sürecinde üç temel unsur bulunur. Bunlar:

- Şekil: Binlerce yıllık evrimleşmenin sonucu doğanın formlarından, yapısal sistemlerinden, morfolojilerinden örnek alır. Örneğin, daha güçlü binalara yol açan bir deniz kabuğunun yapısını taklit etmek.
- Süreç: Doğanın yapısının dışında yarıca doğanın davranış biçimlerinden de ilham alır. Örneğin fotosentez gibi kimyasal süreçleri taklit etmek. Doğanın kimyasal tarifleri, sürdürülebilir köpükler ve plastikler tasarlanmasına yardımcı olur.
- Ekosistem: Temel olarak, doğada çok karmaşık olan değişimleri, birbirleriyle olan ilişkileri ve dengeyi yeniden üretmek ile ilgilidir. Doğa her şeyi yeniden kullanır. Örneğin, Avustralya'nın yerel ekosistemleri bize orman gibi işleyen bir fabrikanın nasıl inşa edileceğini gösterebilir: Biyomimikri 3.8 ekibi, şirketlerin yüksek performanslı ekosistemlerle aynı faydaları sağlamak için tesisleri "sıfır ayak izi" nden dönüştürebilecekleri bir metodoloji geliştirdi. Bu metodolojiye "Orman Olarak Fabrika" deniliyor [17].

3.2. Biyomimetik tasarım metodolojisi (Biomimetic design methodology)

Biyomimetik tasarım, doğadan ilham alarak tasarım yapmayı amaçlayan bir yöntemdir ve bu yöntem doğal sistemlerin benzersiz özelliklerini taklit ederek tasarım yapma temeline dayanır. Bu yaklaşımın başarılı olabilmesi için tasarımcıların detaylı bir biyoloji bilgisine ihtiyaç duyması ve farklı disiplinlerden uzmanlarla iş birliği yapması gerektiği görülmüştür. Bu nedenle araştırmacılar, biyomimetik tasarım için çeşitli metodolojiler geliştirmişlerdir.

Biyomimetik tasarım metodolojilerinden, tasarım spirali olarak isimlendirilen şema iki farklı yöntemle açıklanmıştır [18]. Bu yöntemler, biyolojiden tasarıma ve biyolojiye sorma şeklindedir ve iki başlangıç noktasından dolayı farklılık gösterir. Biyolojiden tasarıma yöntemi, tasarım problemini, teknolojiden veya mühendislik çözümlerinden başlarken; biyolojiye sorma yöntemi, biyolojiden bir çözüm arayışına odaklanır. Bu tasarım süreçlerini problem odaklı (biyolojiden tasarıma) ve çözüm odaklı (biyolojiye sorma) olarak biyolojiden ilham almasıyla tanımlanmıştır [19]. Bu nedenle biyolojiye sorma yöntemi bir problem karşısında çözüm odaklı olmamızı sağlar ve bu çalışmada da biyolojiye sorma yöntemi seçilmiştir.



Şekil 9. (a) Biyolojiden tasarıma (b) Biyolojiye Sorma ((a) From biology to design (b) Asking Biology)

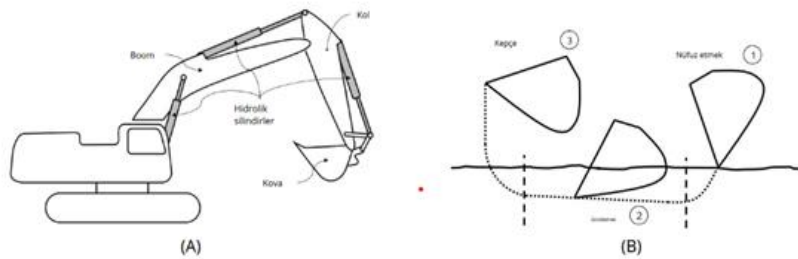
Biyolojiden tasarıma spiral aşamaları şöyledir; doğadaki modelleri keşfetme süreci, biyologlarla iş birliği yaparak veya biyolojik veri tabanlarını detaylı bir şekilde araştırarak başlar. Bu aşama, doğadaki canlılar ve sistemlerin incelenmesi ve keşfedilmesi gereken ilk adımdır. Biyolojik prensipleri soyutlaştırma aşamasında, bu incelemeler sonucunda belirlenen bir sistem, işlev ya da forma odaklanılır ve tasarımcılar tarafından soyut bir düzeye getirilir. Bu soyutlama süreci, biyolojiden tasarıma geçişi sağlar. Beyin fırtınası, bulunan çözümlerin ne tür alanlarda fayda sağlayabileceği veya mevcut problemlere nasıl bir çözüm olabileceği üzerine düşünmeyi içerir. Bu aşamada, soyutlanmış biyolojik prensipler tasarım stratejileri olarak düşünülür. Taklit etme aşamasında, belirlenen çözümler detaylandırılır ve sürdürülebilirlik tasarım prensipleri tasarıma dahil edilerek uygulanır. Bu, biyolojiden esinlenerek tasarımın gerçekleştirilmesini ifade eder. Son olarak, değerlendirme aşamasında çözüm belirli prensipler açısından değerlendirilir ve gözden geçirilir. Çözümün çevresel uyumluluğu, malzeme kullanımı, enerji tasarrufu gibi faktörler incelenir ve süreç tamamlanır. Bu aşama, tasarımın sonuçlarını değerlendirmeyi ve geliştirmeyi içerir [20].

Biyolojiye Sorma spiral aşamaları ise şöyledir; Tasarım sürecinin ilk adımı, işlevin belirlenmesidir. Bu aşamada, tasarımın ne yapması gerektiği sorusuna cevap aranır ve bu işlev, çözülmesi gereken probleme biyolojiden ilham alarak tanımlanır. Ardından, tasarımın kapsamı belirlenir ve detaylı faktörler, malzeme seçimi, enerji verimliliği, çevresel duyarlılık gibi unsurlar dahil edilir. Problemi biyoloji ile ilişkilendirme adımı, işlevin tanımlanmasını içerir. Burada, doğanın aynı işlevi nasıl gerçekleştirdiği ve bu konudaki biyolojik örnekler incelenir. Doğadaki örnekleri inceleme aşaması, belirlenen işlevlere göre doğadaki örneklerin gözden geçirilmesini içerir. Soyutlama adımı, belirlenen örneklerin sınıflandırılmasını ve ortak stratejilerin belirlenmesini kapsar. Bu stratejiler daha sonra tasarıma uyarlanmak üzere biyolojik terimlerden soyutlanır. Taklit etme adımı, bulunan çözümler detaylı bir şekilde incelenir ve tasarım çözümleri geliştirilir. Son olarak, tasarım değerlendirilir. Çözüm, belirli prensipler açısından değerlendirilir ve çevresel uyumluluk, malzeme kullanımı, enerji tasarrufu gibi faktörler göz önüne alınarak süreç tamamlanır [20]. Bu adımların izlenmesi, biyomimetik tasarımın etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlar.

Tablo 2. Biyolojiye sorma yöntemi ile kazıyıcı robot (Scraper robot by asking biology method)

Problemi belirleme	Kazı alanına erişim uzak veya sıkışık alanlarda kazı yapılmasının zorluğu
Problemi tanımlama	Zemini bozmadan yer altında kazı yapabilme ve ilerleme
Biyoloji ile ilişkilendirme	Doğada kazı yapan, oyuk açan, yeraltında yaşayan canlılar nedir
Keşfetme	Kazı yapan canlıların (köstebek, armadillo, köstebek faresi, pasifik köstebek yengici vb.) karşılaştırılması
Soyutlama	Kazıcı hayvanların kazmayı kolaylaştırdığı kol, kafa, pençe formları, davranışların incelenmesi
Taklit etme	Karşılaştırılan canlılar arasından armadillo canlısının ön kol, güçlü pençelerin yapısı, kazma davranışı taklit edilmiştir
Değerlendirme	Son olarak yuva yaptığı toprak yapısı, kazma davranışı değerlendirilerek tasarım nihai sonuca ulaşmıştır.

3.3. Kazma mekanizması (Digging mechanism)



Şekil 10. (a) Tipik bir hidrolik kazı makinesinin temel unsurlarını gösteren şema (b) Bir kazma döngüsündeki tipik aşamalar. Bunlar: (1) delme, (2) sürüklenme ve (3) kepeçleme. ((a) Diagram showing the basic elements of a typical hydraulic excavator (b) Typical stages in a digging cycle. These are: (1) drilling, (2) dragging and (3) scooping.)

Kazma işlemi, ekskavatörün belirli parçalarının iş birliği ile gerçekleştirilen önemli bir süreçtir. Bu sürecin aşamalarına bakıldığında, ekskavatörün farklı bağlantılarının nasıl birlikte çalıştığı ve toprakla etkileşimde nasıl bulunduğu daha net bir şekilde görülebilir.

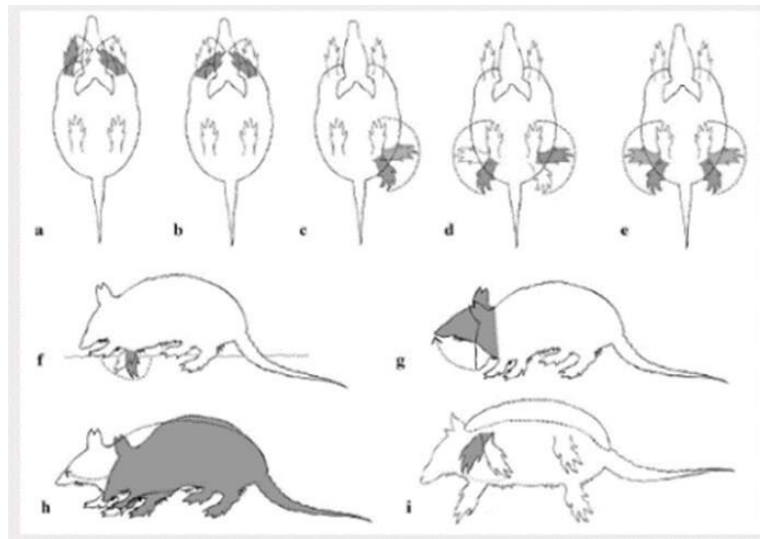
- Delme aşamasında kol aşağı inerek toprağı itmeyi sağlar ve bom gerektiğinde hareket ederek kepçenin toprağına yerleşmesini sağlar. Kova hareketi gerekli değildir.
- Sürüklenme aşamasında, kol kabine doğru hareket eder. Bom, kepçenin yörüngesini ve kesme derinliğini ayarlar. Bomun hareketi kepçedeki direnci etkiler. Kova bağlantısı sabit kalır ve küçük ayarlamalar yapılır. Kol, ileri doğru hareket ederek işin büyük kısmını yapar.
- Son kepçeleme aşaması ise farklıdır. Bu aşamada, kova yukarı doğru kıvrılarak toplanan toprağı taşımak için kullanılır. Bom ve kol, toprağın dökülmesini önlemek için çalışır [21].

Ekskavatörün kazma işlemindeki her aşamada nasıl rol aldığını ve etkin bir şekilde toprakla etkileşimini göstermektedir. Dolayısıyla, ekskavatör, kazma robot tasarımında ve operasyonlarında önemlidir. Kazma işleminde ki bu süreç robot tasarımına uygulanması sağlanmıştır.

3.4. Biyomimetik toprak altı kazma robot tasarımı (Biomimetic underground digging robot design)

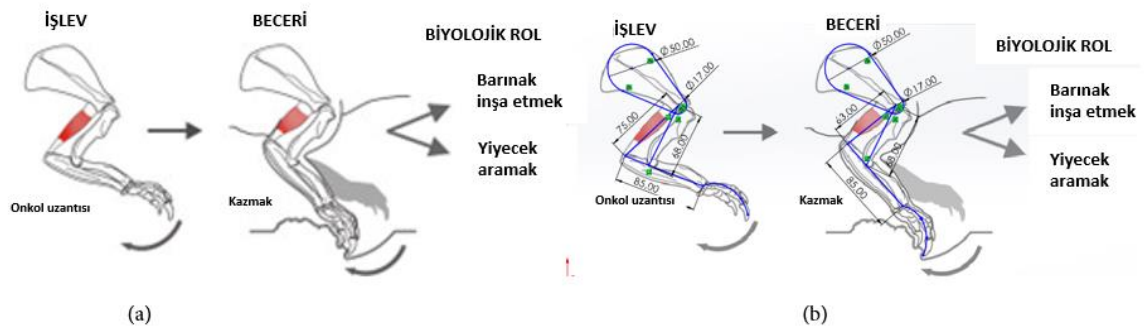
Yapılan araştırmalar ve gözlemler sonucunda armadillo canlısı bu kazıyıcı robot tasarımı için uygun görülmüştür. Armadillolar, toprakta kazma ve tünel açma konusunda uzmanlaşmış memelilerdir. Bunun yanı sıra, memeli grubunun tünel boyutları son derece değişkenlik göstermesine rağmen en büyük bildirilen tüneller arasında armadilloların açtığı tünellere ait olduğu da tespit edilmiştir, bu tünel uzunlukları ise 4 metreye ve tünel çapları 30 cm'ye kadar ulaşır [22].

Genellikle ön ayaklarını kullanarak kazma işlemini gerçekleştiren armadillolar, burunları ve ön ayaklarıyla da toprağı gevşetir. Ardından güçlü kasları ve kol kemiklerini (humerus) kullanarak toprağı kazarak geri itmeleriyle kazı işlemi tamamlanır. Armadilloların kol kemiği yapısı, bu kazma stratejisine uygun şekilde evrimleşmiştir. Kol kemiğın şekli ve yapısal özellikleri, toprağı kazma ve kazılan toprakta ilerleme sağlamak için optimize edilmiştir. Bu adaptasyonlar, armadilloların toprakta etkili bir şekilde kazma yapmasını ve yiyeceklerini, barınaklarını ve yuvalarını oluşturmasını sağlar [23].

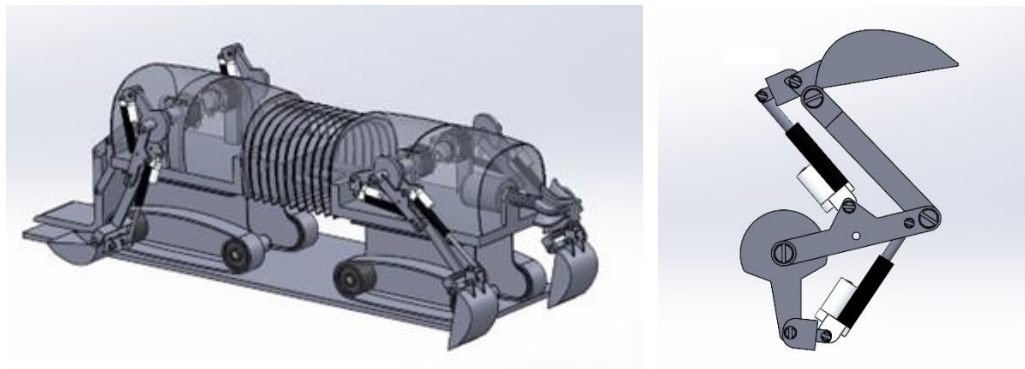


Şekil 11. Kazma ile ilgili davranışların çizimleri. (a) İki kolla dönüşümlü olarak kazma. (b) İki kolla aynı anda kazma. (c) Toprağı tek kolla itmek. (d) Yeri değişen iki kolla itmek. (e) Aynı anda iki kolla toprağı itmek. (f) Tek kolla kazma. (g) Toprağı kafayla itmek. (h) Gövdeyi gererek toprağı itmek. (i) Gövde yanlamasına yere dayayarak kazma [24]. (Illustrations of digging-related behaviors. (a) Digging alternately with both arms. (b) Digging with both arms simultaneously. (c) Pushing the soil with one arm. (d) Pushing with two arms that alternate in position. (e) Pushing the soil with both arms at the same time. (f) One-arm digging. (g) Pushing the soil with the head. (h) Pushing the soil by stretching the trunk. (i) Digging by resting the body sideways on the ground.)

Kol hareketleri, armadillonun Şekil 11' de gösterildiği gibi kazma davranışları; iki kolla aynı anda kazma, tek kolla kazma, tek kolla toprağı itme, değişimli iki kolla toprağı itme, iki kolla aynı anda itme şeklindedir. Robotun kolları da bu dönüşümleri taklit ederek kazma işlemi ve itme işlemi gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır.

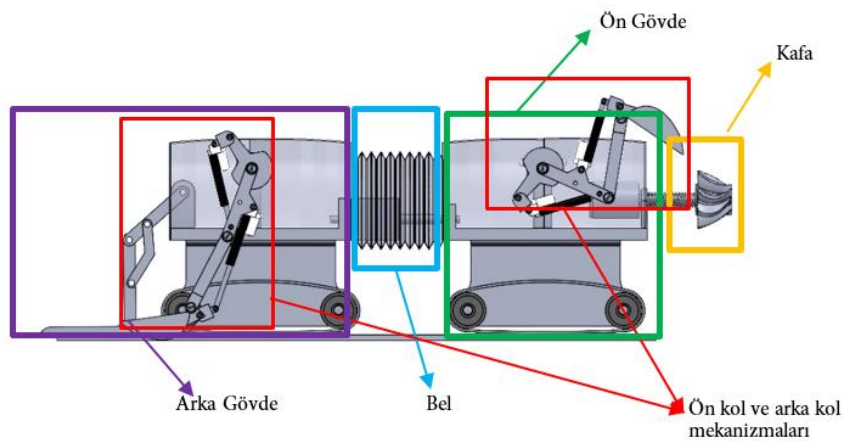


Şekil 12. (a) Armadillo ön kol kazma işlemi (b) Kol mekanizma eskizi ((a) Armadillo forearm digging process (b) Arm mechanism sketch)

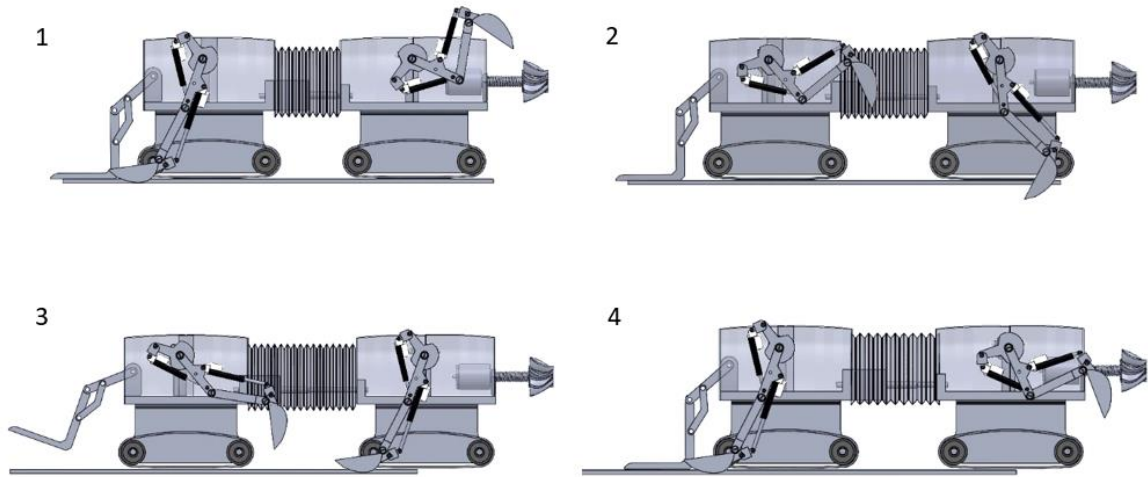


Şekil 13. Robot ve Kol mekanizmasının CAD Modeli (CAD Model of Robot and Arm mechanism)

Yapılan çalışmada, biyomimetik tasarım ilkeleriyle geliştirilen bir robotun yapısını ve işlevselliğini detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Robot; kafa, ön gövde, bel ve arka gövde olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Kafa kısmı, geleneksel delme yöntemleriyle benzer şekilde matkap ucu kullanarak kazma işlemini gerçekleştirirken, ön ve arka gövdeye entegre edilen kol mekanizmaları, armadillonun ön ayakları kazma işlemini ve arka ayakları ise biriken toprağı geriye atma işlemini taklit eder. Bu kollar, step motorlarla hareket ettirilir. Bel kısmında, pnömatik pistonların kullanılması ve esnek bir malzeme ile çevrenmesi robotun ileri-geri hareketini sağlamıştır. Armadillonun kuyruğundan aldığı destek, robotun arka kısmına eklenen bir kuyruk mekanizmasıyla modellenmiştir; bu kuyruk, robotun kazma sırasında zeminde denge sağlaması amaçlanmıştır. Son olarak, robotun hareketini sağlayan paletler, her türlü engelle karşı daha esnek bir hareket kabiliyeti sağlamak için tercih edilmiştir.

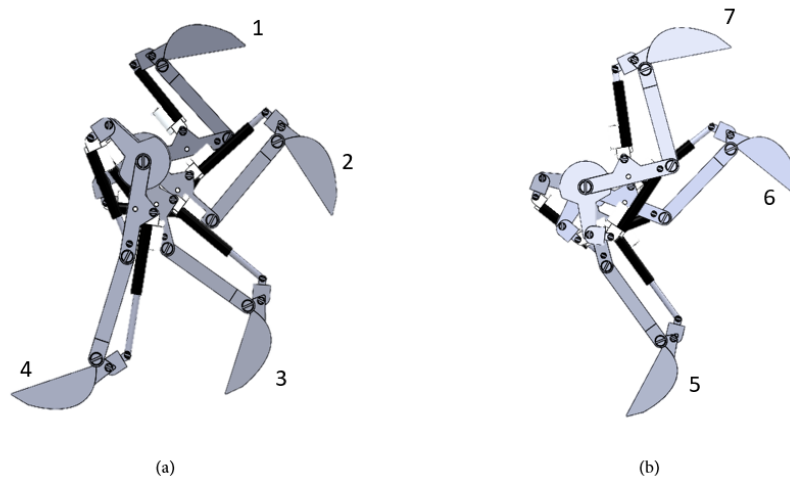


Şekil 14. Yeraltı kazma robot tasarımının cad modeli (CAD model of underground digging robot design)



Şekil 15. Kazma robotun kazma süreci; (1) toprağı ilk kazma, arka gövde sabit, matkap ile delme ve kollar ile kazma; (2) ön kollar kazdığı toprağı geriye atma işlemi; (3) kuyruk desteğı kaldırır ve ilerlerken arka kollar biriken toprağı geriye atar; (4) robot ilerler ve kazma işlemi tekrar eder. (The digging process of the digging robot; (1) initial digging the soil, rear body fixed, drilling with drill and digging with arms; (2) the process of throwing back the soil dug by the forearms; (3) the tail lifts the support and, as it advances, the hind arms throw back the accumulated soil; (4) the robot advances and the digging process repeats.)

Bir armadillonun biyolojik yapısı taklit edilerek bir kazma robotunun ön kollar ile kazma, toprağı geriye atma yöntemi ve gövde yapısı tasarlanmıştır. İlk olarak robotun kafa kısmında bulunan toprak matkap, toprağı ilk delme işlemine uygun ve mevcut olan tünel delme matkap uçlarına benzer olarak tasarlanmıştır. İkinci olarak, ön ayakta bulunan humerus kemiğın işlevselliğı, ön kolların tasarımına işlenmiştir (Şekil 12). Burada gücü step motordan alan ve gücü iletmek için doğrusal bir aktüatör kullanılmıştır. Ayrıca armadillonun büyük pençeleri için kolun ucuna ekskavator benzeri bir kepçe tasarlanmıştır. Kepçe toprağı almak için öne doğru doğrusal aktüatör sayesinde uzanır ve kepçe toprağı nüfuz ederek ilk kazma işlemi gerçekleştirir (Şekil 15 (1)). Sonrasında alınan toprağı geriye atmak için motorun kısmi dönüşü ile kepçe arkaya doğru hareket eder. Daha sonra toprağı robotun bel kısmına bırakır ve toprak bir müddet burada birikir (Şekil 15 (2)). Bu sırada, ön gövde kollar sayesinde kazarken arka gövdenin en arkasında bulunan kuyruk, toprak zeminine sabitlenmiş konumdadır. İki gövde arasında bulunan pistonun maksimum uzunluğuna kadar ön gövde ilerler (Şekil 15 (3)). En son konuma geldiğinde, ön gövde kazma işlemine ara verir ve kuyruk kalkar ardından arka kollar ön kollardaki aynı şekilde biriken toprağı alır ve arkaya atar. Böylece arka gövde de yavaş yavaş ilerler. Yine piston son noktaya geldiğinde, ön gövde tekrar kazmaya başlar (Şekil 15 (4)). Kazma işlemi bu şekilde ilerler. Robotun kol mekanizmasında kolun hareketlerini şekil 16'da gösterilmiştir. Toprağı kazma aşamasında 1 numaralı hareket ile başlayıp 4 numaralı konumdan 5'e geçerken toprağı bırakır ve kol ilk konumuna geri döner.



Şekil 16. Kol hareket adımları: (a) Toprak kazma adımları, (b) Kazdıktan sonra geri dönüş (Arm movement steps: (a) Steps of digging soil, (b) Return after digging)

Yapılan tasarım çalışmasında, her kol için bir step motoru kullanılmıştır. Step motor sayesinde hassas pozisyon ve hız kontrolü sağlayarak kolun verimli çalışması sağlanmıştır. Motorun uygulama şekli 140 derece açıda ileri ve geri hareket etmektedir. Kolun iki uzuvlarında birer tane lineer aktüatörler kullanılmıştır. Toprağın verimli bir şekilde kazılması amacıyla kolun hareketi bir ekskavatör gibi pozisyonlanmıştır.

Tasarlanan robot, diğer yeraltı yaşayan hayvanların toprağı kazmak ve taşımak için dişlerini ve ön ayaklarını kullanma yöntemlerinden esinlenmiştir. Dişlerin yerine getirdiğı rolü taklit ederek toprağı kırmak ve taşımak için döner matkap ucu kullanılmaktadır ve toprağın kırılma kapasitesini artırmayı am Tasarlanan matkap ucunun gövdeye bağlandığı yerde yay kullanılmıştır. Bu sayede matkap ucu karşılaştığı engellerin darbelerini sönmlemesini sağlamıştır.

Armadillonun kazı sırasında kendisini toprağı desteklemek ve dengede tutmak amacıyla kuyruğunu kullandığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda canlının kuyruğunu taklit ederek toprağı desteklemek için bir kuyruk tasarımı yapılmıştır ve bu kuyruğun hareketini step motor ile sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

4. Tartışma (Discussion)

Yapılan çalışma, biyomimetik prensipleri temel alarak geliştirilen bir yeraltı kazma robotunun tasarımını ve işlevselliğini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Literatür kapsamında bazı kazıyıcı canlılar incelenmiş ve bu kazıyıcı canlılar biyolojik form, sistem ve davranışsal olarak detaylandırılmıştır. Araştırılan bu canlıların kazma davranışları, çalışmanın hedefi doğrultusunda bir karşılaştırma yapılmıştır ve sonucunda yeraltı kazma işlevi için verimli, güçlü ve mühendislik uygulamalarına en uygun biyolojik sistem seçimi yapılmıştır.

Kazıcı biyolojik sistemlerin incelenmesi yanı sıra kazıma işlevini yapan tipik bir ekskavatörün çalışma mantığından bahsedilmiştir. Biyolojik sistemler ve ekskavatörün çalışma prensibi karşılaştırıldığında, armadillonun kazma davranışının daha uygulanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, armadillonun kazma stratejisinin diğer canlılara kıyasla daha uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Ekskavatör ve armadillonun kazma işlevi benzerliklerine bakıldığında, ekskavatörün kepçesi ve armadillo'nun pençeleri arasında paralellikler bulunmaktadır. Ayrıca ekskavatör kazma, hidrolik sistemler tarafından kontrol edilen eklemlere sahipken, armadillo ise pençelerini kaslar tarafından kontrol etmektedir.

Biyo-ilham prensibi göz önüne alındığında, robot kazıcılar, armadillo pençelerindeki eklemlere benzer yapılarla donatılması önerilmektedir. Bu şekilde daha fazla hareket kabiliyeti ve dar alanlarda kazma yeteneğı sağlayabilir. Ayrıca, robot kazıcıların hidrolik sistemleri, armadillo'nun kas sisteminin hassasiyetini ve kontrolünü taklit edecek şekilde tasarlanabileceğı ön görülmüştür. Böylelikle, armadillonun kasları, lineer aktüatör kullanarak mühendisliğe dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde, armadillonun pençeleri ve ekskavatörün kepçeleri benzerliklerinden yararlanılarak bir biyoilhamlı bir kepçe tasarımı yapılmıştır.

Armodillonun en büyük savunma mekanizması olan sağlam zırlı gövdesinden esinlenerek, robotun gövdesinin ön, bel ve arka bölümlerden oluştuğı belirtilmiş ve bu yapılanmanın robotun hareket kabiliyetini artırırken, dayanıklılığını artırdığı ifade edilmiştir.

Biyoilhamlı robotların birçok avantajı olabileceğı gibi bazı dezavantajları da olabilmektedir. Biyolojik sistemlerin mühendislik uygulamalarına dönüşümünde karşılaşılan zorluklar, biyomimetik robotların dezavantajları arasında en belirgin sebebi olarak öne çıkmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise önerilen tasarım; mevcut robotlara göre, daha az esnekliğe sahip olması ile manevra kabiliyetini düşürmektedir. Bir başka faktör olarak, mevcut tasarımlara göre daha az otonomdur yani robot, kazma işlemini gerçekleştirmek için insan operatör tarafından kontrol edilmesi gerekebilir.

Bu çalışma, armadillonun kazma davranışının biyomimetik yeraltı kazma robotu tasarımı için ilham kaynağı olabileceğini göstermektedir. Armadillonun pençelerindeki eklemler ve kas sistemi, robot kazıcılara daha fazla hareket kabiliyeti, dar alanlarda kazma yeteneğı ve hassas kontrol sağlayabilir olduğu görülmüştür. Bu bulguların, yeraltı kazma robotlarının geliştirilmesine katkıda bulunmasını öngörmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler (Conclusion and Recommendations)

Yapılan çalışma sonucunda, biyomimetik yaklaşımın yeraltı kazma robotu tasarımı üzerindeki etkinliği araştırmayı amaçlamıştır. Biyomimetik, doğadaki çözümlerden ilham alarak yenilikçi ürünler ve sistemler geliştirmeyi hedefleyen bir disiplindir. Bahsi geçen bu çalışmada, biyolojiye sorma yöntemi kullanılarak çözüm odaklı bir bakış açısı benimsenmiş ve belirlenen probleme karşı etkili bir şekilde çözüm yolları araştırılmıştır. Böylece biyomimetikğin oluşturduğu yöntemlerle doğaya sorulmuştur; doğada canlılar yeraltında nasıl yuva yapar, toprağı nasıl deler, oyuk açar veya kazar gibi sorular yönelterek bu amaca uygun canlılar listelenmiştir. Araştırılan canlılar morfolojik, davranışsal olarak incelenmiş ve kazma stratejileri bakımından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak da tasarım isteklerine göre bir canlı seçilmiştir.

Araştırmalar sonucunda, doğadaki en verimli kazıcılardan biri olan armadillo uygun görülmüş ve detaylı olarak incelenmiştir. Armadilloların güçlü pençeleri, sağlam zırhları ve kazmaya uygun kas yapıları, onları yeraltında kazı ve tünel açma konusunda oldukça başarılı bir kazıyıcı canlı yapmıştır. Bu canlıların kazma stratejileri incelenerek, mühendislik prensiplerine uygun bir robot tasarımı geliştirilmiştir.

Biyo-esinli bu robot, yeraltı ortamında çeşitli görevleri yerine getirmek için ideal bir çözüm sunmaktadır. Armadilloların kazma becerilerinden ilham alarak, sunulan tasarım, armadillonun biyolojisini taklit eden ilk yeraltı kazma robotu tasarım olma özelliğini taşımaktadır. Önerilen tasarımın basitliği, dayanıklılığı, verimliliği ile robotun toprakta etkin bir şekilde hareket etmesini ve kazmasını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede, robotun kazma sırasında daha az enerji harcaması ve daha yüksek bir kazma verimliliği elde etmesi mümkün hale gelmiştir.

Bu çalışmada ki biyomimetik robot, toprak altında hareketi, çeşitli görevleri yerine getirilmesinde büyük fayda sağlayabilir aynı zamanda yeraltı kazma robotlarının geliştirilmesi için yeni bir yol açabilir ve gelecekteki robot tasarımlarına ilham kaynağı olabilmesi çalışmanın önemini vurgulamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] J. Aguilar, T. Zhang, F. Qian, M. Kingsbury, B. McInroe, N. Mazouchova, et al. "A review on locomotion robophysics: The study of movement at the intersection of robotics, soft matter and dynamical systems," *Reports on Progress in Physics*, vol.79, 2016. doi:10.1088/0034-4885/79/11/110001
- [2] Vincent, F. V. Julian "Biomimetics: its practice and theory," *Journal of the Royal Society Interface*, vol.3, no.9, pp. 471-482, April 2006. doi:10.1098/rsif.2006.0127
- [3] E. A. Favret and N. O. Fuentes, Functional Properties of Biological Surfaces, Argentina December 2009. doi.org/10.1142/9789812837028_others01
- [4] Y. F. Lin, A. Chappuis, S. Rice, and E. R. Dumont, "The Effects Of Soil Compactness On The Burrowing Performance Of Sympatric Eastern And Hairy Tailed Moles," *Journal of Zoology*, 1-10. 2016. doi:10.1111/jzo.12418
- [5] M. Hildebrand, D. Bramble, K. Liem and D. Wake (Ed.), *Functional Vertebrate Morphology, Chapter 6. Digging of Quadrupeds*. Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, 1985, pp. 89-109. doi:10.4159/harvard.9780674184404.c6
- [6] S. Ganguly, "Pangolin- Zoological Characteristics and Its Uniqueness In Mammalian Group," *Journal of Entomology and Zoology Studies*, vol.1, no.1, pp.1-2, 2013.
- [7] C. Xangxu, X. Ning, W. Yuming, R. Luquan, X. Xiaobo, C. Bingcong and L. Angi, "Constitution Of Pangolin Scales And Mechanism Of Reducing Adhesion Of Soil to Their Cuticle," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 6, no.3, pp.15-22, 1990.
- [8] B. Wang, W. Yang, V. R. Sherman and M. A. Meyers, "Pangolin Armor: Overlapping, Structure and Mechanical Properties of The Keratinous Scales," *Acta Biomaterialia*, vol.41, pp.60-74. 2016. doi:10.1016/j.actbio.2016.05.028
- [9] W. F. Taber, "Contribution of the life history and ecology of the nine-banded armadillo," *Journal of Mammalogy*, vol.26, no.3, pp.211-226, 1945.
- [10] C. Medina, J. H. Camacho-Tamayo, and C. A. Cortés, "Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods," *Engenharia Agrícola*, vol.32, no.1, pp.91-101, 2012. doi:10.1590/S0100-69162012000100010

- [11] E. R. Trueman, "The Mechanism of Burrowing of the Mole Crab, *Emerita*," *Journal of Experimental Biology*, vol.53, no.3, pp. 701-710, December 1970. doi:10.1242/jeb.53.3.701
- [12] P. Vartholomeos et al., "Modeling, Gait Sequence Design, and Control Architecture of BADGER Underground Robot," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 1160-1167, April 2021. doi:10.1109/LRA.2021.3056068
- [13] T. Nakatake, M. Konno, A. Mizushina, Y. Yamada, T. Nakamura and T. Kubota, "Soil circulating system for a lunar subsurface explorer robot using a peristaltic crawling mechanism," *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Banff, AB, Canada, 2016, pp. 407-412. doi:10.1109/AIM.2016.7576801
- [14] J. Lee, C. Tirtawardhana, H. W. Jang, J.-W. Hong and H. Myung, "Concept Design of a Novel Bio-Inspired Drilling System for Shallow Drilling," *2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Jeju, Korea (South), pp. 1276-1280, 2019. doi:10.23919/ICCAS47443.2019.8971518
- [15] L. K. Treers, B. McInroe, R. J. Full and H. S. Stuart, "Mole crab-inspired vertical self-burrowing," *Front. Robot. AI. Sec. Bio-Inspired Robotics*, vol.9, October 2022. doi:10.3389/frobt.2022.999392
- [16] F. V. Vincent Julian, A. Bogatyreva Olga, R. Bogatyrev Nikolaj, Bowyer Adrian and Pahl Anja-Karina, "Biomimetics: its practice and theory," *J. R. Soc. Interface*, vol.3 pp.471-482. doi:10.1098/rsif.2006.0127
- [17] [Online]. Available: <https://markut.net/savi-2/biyomimikri-nedir-tasarimda-dogadan-vararlanmak/> [Erişim: 19 Ekim 2023]
- [18] H. Yıldız, "Endüstri Ürünleri Tasarımı Kapsamında Biyomimetik Tasarımın Yeri ve Metodolojisi," Yüksek lisans tezi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Programı, İTÜ, İstanbul, Türkiye, Ocak 2012.
- [19] M. Helms, S. S. Vattam, and Ak. K. Goel, "Biologically inspired design: process and products," *Design Studies*, vol.30 no.5, pp. 606-622, September 2009. doi:10.1016/j.destud.2009.04.003
- [20] [Online]. Available: <https://toolbox.biomimicry.org/> [Erişim 25 Eylül 2023]
- [21] F. E. Sotiropoulos, "Methods for Control in Robotic Excavation," Doctoral thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, May 2021.
- [22] Kirstin Übernickel, Jaime Pizarro-Araya, Susila Bhagavathula, Leandro Paulino and Todd A. Ehlers, "Reviews and syntheses: Composition and characteristics of burrowing animals along a climate and ecological gradient, Chile," *Biogeosciences*, vol.18, 2021. doi:10.5194/bg-18-5573-2021
- [23] S. F. Vizcaíno and N. Milne, "Armadillos: Xenarthrans showing an alternative pattern of locomotion," *Armadillos: The World's Most Specialized Land Mammals*, pp.71-88, 2002.
- [24] G. P. Clerici, P. S. Rosa, F. R. Costa, "Description of digging behavior in armadillos *dasyptus novemcinctus* (xenarthra: dasyptidae)," *Mastozoología Neotropical*, vol.25, no.2, pp.283-291, 2018. doi:10.31687/saremMN.18.25.2.0.04

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

A New Artificial Intelligence Supported Approach to Diagnosis and Prediction of Psoriasis

Mehmet Akif Bülbül^{a*}

Submitted: 23.03.2024 Revised: 06.04.2024 Accepted: 26.04.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A15

ABSTRACT

Keywords: Firefly optimization algorithm, stacked auto-encoder, softmax classifier, decision support system

^{a,*} Kayseri University,
Faculty of Engineering, Architecture
and Design,
Dept. of Software Engineering
38280 - Kayseri, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4165-0512
e mail: makifbulbul@kayseri.edu.tr

*Corresponding author:
makifbulbul@kayseri.edu.tr

Early diagnosis and prediction of psoriasis is crucial to control disease progression, alleviate symptoms and reduce the risk of complications. Diagnosis in the early stages helps to determine the appropriate treatment plan and improve the patient's quality of life. The aim of this study is to enable early diagnosis of psoriasis. For this purpose, a hybrid architecture was created using a stacked auto-encoder, softmax classifier and Firefly Optimization Algorithm. With the created architecture, the architectural parameters of the stacked autocoder and softmax classifier hybrid structure aimed to be created for psoriasis diagnosis and all hyperparameters within the architecture were optimized. The model was implemented on the "Dermatology" dataset in the UCI data warehouse. In addition, machine learning methods such as K-Nearest Neighbor algorithm, Support Vector Machine and Decision Trees, which are frequently used in the literature, were also applied on the same dataset. The findings obtained from the experimental studies are presented in a controversial manner. The findings show that the proposed hybrid architecture achieves better results than other machine learning methods. At the same time, the model optimized and presented with the hybrid architecture can be used as an alternative method in patient decision support systems.

Sedef Hastalığının Tanı ve Tahmininde Yapay Zekâ Destekli Yeni Bir Yaklaşım

ÖZ

Sedef hastalığının erken tanı ve tahmini, hastalığın ilerlemesini kontrol altına almak, semptomları hafifletmek ve komplikasyon riskini azaltmak açısından son derece önemlidir. Erken aşamalarda tanı konulması, uygun tedavi planının belirlenmesine ve hastanın yaşam kalitesini artırmaya yardımcı olur. Bu çalışmanın amacı, sedef hastalığının erkenden teşhis edilebilmesini sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda yığılmış oto-kodlayıcı, softmax sınıflandırıcı ve Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması kullanılarak hibrit bir mimari oluşturulmuştur. Oluşturulan mimari ile sedef hastalığı teşhisi için oluşturulması hedeflenen yığılmış oto-kodlayıcı ve softmax sınıflandırıcı hibrit yapısının mimari parametreleri ile mimari içerisinde bulunan bütün hiperparametreler optimize edilmiştir. Model UCI veri deposunda bulunan "Dermatoloji" veri seti üzerinde uygulanmıştır. Bunun yanında aynı veri seti üzerinde literatürde sıkça kullanılan makine öğrenme yöntemleri olan K-En yakın komşu algoritması, Destek Vektör Makinası ve Karar Ağaçları metotları da uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular tartışmalı bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen bulgular önerilen hibrit mimarinin diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermiştir. Aynı zamanda hibrit mimari ile optimize edilen ve sunulan model hasta karar destek sistemlerinde alternatif bir yöntem olarak da kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Ateş böceği optimizasyon algoritması, yığılmış oto-kodlayıcı, softmax sınıflandırıcı, karar destek sistemi

1. Giriş (Introduction)

Sedef hastalığı, kronik inflamatuvar bir deri hastalığı olup milyonlarca kişiyi etkilemektedir [1]. Sedef hastalığı kardiyometabolik hastalıklar ve depresyon gibi bir dizi eşlik eden hastalıklarla da ilişkilidir [2]. Sedef hastalığının çeşitli komplikasyonları yüksektir. Aynı zamanda ölüm için bağımsız bir risk faktörünü temsil ettiği ve patolojisini karmaşıkleştirdiği ortaya konulmuştur [3]. Bu sebeple hastalığın erken tanı ve teşhisi büyük önem arz etmektedir.

Gelişen yeni nesil teknolojiler ile birlikte gün geçtikçe yaygınlaşan yapay zekâ yöntemlerinin kullanımı tıp alanında da artmaktadır [4,5]. Literatürde deri hastalıklarıyla ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında Raj ve arkadaşları [6], 2D RGB görüntülerden sedef hastalığı alanının ve şiddetinin objektif tahmini için birçok geleneksel ve makine öğrenimi tabanlı çalışma önermişlerdir. Yapılan çalışmada yerel özellik ayıklama için hafif bir ağ benimsenmiş ve bu ağı genel özellikleri öğrenmek için bir vizyon transformatörü ile entegre ederek hibrit bir model oluşturulmuştur. 212 sedef hastasının farklı vücut bölgelerinden 1018 fotoğraf görüntüsü üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Rashid ve arkadaşları [7], sedef hastalığının tiplerinin otomatik tespiti ve sınıflandırılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada derin sinir ağları kullanılmıştır. GoogLeNet, InceptionV3 ve VGG-19 gibi önceden eğitilmiş makine öğrenme modellerinin de kullanıldığı çalışmada elde edilen bulgular önerilen yöntem ile elde edilen bulgularla karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Önerilen derin sinir ağı ile elde edilen sonuçlar çalışmada kullanılan diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar ortaya koymuştur.

Shrivastava ve arkadaşları [8], yapmış oldukları bir çalışmada sedef hastalığının sınıflandırılmasında makine öğrenimi yöntemleri kullanmışlardır. Çalışmada 848 adet görüntüden oluşan veri seti üzerinde sağlıklı, hafif, orta, şiddetli ve çok şiddetli olmak üzere beş şiddet derecesine sahip çok sınıflı bir sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Destek Vektör Makineleri (DVM), Karar Ağacı (KA), Temel Bileşen Analizi ve Fisher Diskriminant Oranı kullanılan çalışmada Fisher Diskriminant Oranı ve DVM ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Vishwakarma ve arkadaşları [9], yapmış oldukları bir çalışmada sedef hastalığının tespiti için evrişimli sinir ağı ile görüntü transformatörü kodlayıcıyı birleştirmişlerdir. Çalışmada sunulan model içerisinde bulunan hiperparametreler Tavşan Optimizasyon Algoritması ile optimize edilmiştir. Önerilen model ile sedef hastalığının tespitinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Dash ve arkadaşları [10], otomatik sedef hastalığı cilt lezyonu segmentasyonu gerçekleştirmek için modifiye edilmiş U-Net tabanlı tam evrişimli ağ kullanmışlardır. 29 katmanlı derin tamamen evrişimli bir ağdan oluşan model 1026 sedef hastasından toplanan 5241 sedef lezyonu görüntüsü üzerinde test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yüksek başarı metrikleri elde edilmiştir.

Juang ve Wu [11], yapmış oldukları çalışmada sedef hastalığını tanımlamak için k-ortalama kümeleme yöntemi kullanmışlardır. Çalışmada görüntüler üzerine sırasıyla k-ortalama kümeleme, gri seviye, medyan filtreleme, ikili görüntüleme, sobel kenar süreci ve morfolojik rekonstrüksiyon uygulanmıştır. Elde edilen bulgular sedef hastalığının boyutunu ve bölgesini tam olarak ayırt etmek için sunulan yöntemin başarılı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Yapay zekâ yöntemlerinin yüksek başarı oranları elde etmesi, erken tanı ve teşhis ile hastaların tedavi süreçlerini hızlandırması bu alandaki trendi oldukça artırmaktadır. Erken tanı ve tedavi hastalıkların yol açmış olduğu olumsuz etkileri azaltmada oldukça önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı makine öğrenimi yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerde sunulan modeller içerisinde birçok hiperparametre bulunmaktadır. Modeller içerisindeki bu hiperparametrelerdeki değişiklik modelin performansını doğrudan etkilemektedir [12,13]. Probleme özgü hiperparametre belirlemek modelin performans açısından büyük önem arz etmektedir [14].

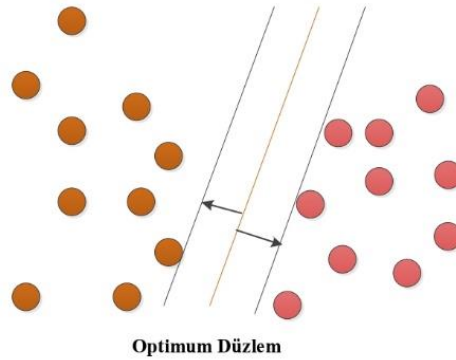
Bu çalışmada, sedef hastalığının tanı ve teşhisi için hibrit bir mimari önerilmektedir. Mimari içerisinde yığılmış oto-kodlayıcı, softmax sınıflandırıcı ve Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması kullanılmıştır. Oluşturulan hibrit mimari UCI veri deposunda halka açık bulunan "Dermatoloji" veri seti üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada aynı zamanda literatürde sıkça kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinden

DVM, KA ve K-en Yakın Komşu metotları da aynı veri seti üzerinde çalıştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular tartışmalı bir şekilde sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines)

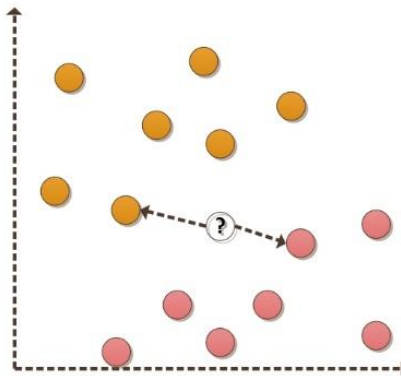
DVM, özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan güçlü bir makine öğrenimi algoritmasıdır [15]. Temel amacı, veri noktalarını sınıflar arasında bir karar sınırıyla ayırmaktır. DVM, veri noktalarını çok boyutlu uzayda temsil eder ve bu uzayda en uygun ayrımı yapacak hiper düzlemleri bulur. Bu hiper düzlem, sınıflar arasındaki marjinal boşluğu maksimize eder, yani her iki sınıfa ait veri noktalarını en iyi şekilde ayırmaya çalışır [16]. Örnek bir SVM yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. DVM yapısı (SVM structure)

2.2. K-En yakın Komşu Algoritması (K-Nearest Neighbor Algorithm)

K-En Yakın Komşu (K Nearest Neighbour, KNN), basit ancak güçlü bir makine öğrenimi algoritmasıdır [17]. Temel prensibi, bir veri noktasını sınıflandırmak veya tahmin etmek için en yakın komşularının etiketlerini kullanmaktır. KNN, belirli bir veri noktasının etiketini belirlemek için, o noktaya en yakın olan k komşusunun etiketlerini dikkate alır ve bu komşuların çoğunluğuna göre karar verir [18]. Algoritma, veri noktalarının uzaklık ölçüsüne dayanır ve genellikle Öklid mesafesi kullanılır, ancak farklı uzaklık ölçüleri de tercih edilebilir. Örnek bir KNN yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.

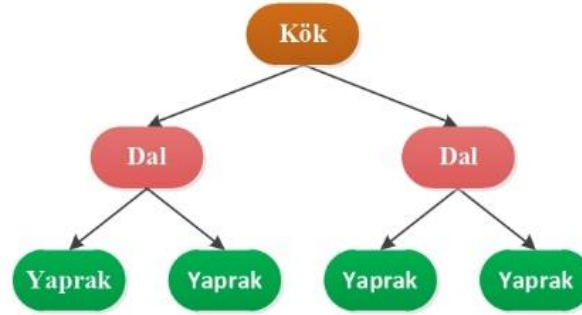


Şekil 2. KNN yapısı (KNN structure)

2.3. Karar Ağaçları (Decision trees)

KA, karmaşık veri kümelerini basit karar yapısıyla temsil eden etkili bir makine öğrenimi yöntemidir [19]. Bu yöntem, veri özelliklerini dikkate alarak sıralı kararlarla sınıflandırma veya tahmin işlemi

gerçekleştirir. Her bir düğüm, veri özelliklerine göre bölünmüş veri kümesini temsil eder. Ağaç yapısı, veri kümesini en iyi şekilde bölerek homojen alt gruplar oluşturmayı amaçlar [20]. Karar ağaçları, kolay anlaşılabilir bir yapıya sahiptir ve genellikle diğer makine öğrenimi yöntemleriyle birleştirilerek daha karmaşık modeller oluşturmak için de kullanılır. Örnek bir KA yapısı Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. KA yapısı (KA structure)

2.4. Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması (Firefly Optimization Algorithm)

Ateş Böceği Algoritması (ABA), ateş böceklerinin iletişim ve çiftleşme davranışlarından esinlenerek tasarlanmıştır [21]. Temel prensibi, daha parlak olan böceklerin diğerlerini çekme eğilimi göstermesine dayanır. Algoritma, bir optimizasyon problemi için çözümleri ateş böcekleri olarak kabul eder ve bu çözümlerin parlaklık derecelerine göre hareket etmelerini sağlar. Daha parlak çözümler, daha iyi çözümler olduğu kabul edilir ve bu nedenle diğer çözümleri kendine doğru çekerler [22]. Ateş böceği algoritması, doğal paralelizm ve hızlı yakınsama özellikleri sayesinde birçok optimizasyon problemi için etkili bir çözüm sunar. ABA adımları şu şekildedir:

1. **Başlangıç Popülasyonu Oluşturma:** Başlangıçta rastgele bir ateş böceği popülasyonu oluşturulur. Her bir ateş böceği, problemin boyutuna uygun rastgele bir konumda yer alır.
2. **Aydınlatma Değerlerinin Hesaplanması:** Her bir ateş böceğinin parlaklık değeri, uygunluk fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Bu, problem bağlamına ve çözümün kalitesine bağlıdır. Daha parlak ateş böcekleri, daha iyi çözümlere işaret eder.
3. **Yenileme ve Hareket Etme:** Her bir ateş böceği, çevresindeki diğer ateş böceklerini çekecek şekilde hareket eder. Bu hareket, iki faktör arasındaki çekim kuvveti ve rastgele bir yön belirlenmesiyle gerçekleşir. Daha parlak olan ateş böcekleri, daha az parlak olanları kendilerine doğru çeker.
4. **Ateş Böceği Popülasyonunun Güncellenmesi:** Her bir ateş böceği, yeni pozisyonuna göre güncellenir. Eğer yeni konum, önceki konumdan daha iyi bir çözüm sunuyorsa, ateş böceği bu yeni konumu kabul eder.
5. **Sonlandırma Koşulunun Kontrol Edilmesi:** Belirlenen sonlandırma koşullarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Eğer koşullar sağlanırsa, algoritma sonlanır; aksi halde 2. Adıma dönlür.
6. **En İyi Çözümün Bulunması:** Algoritma sonlandığında, en iyi çözüm bulunur ve geri döndürülür.

ABA çözüm uzayı içerisinde oluşturulan rastgele ateş böcekleri en parlak ateş böceğine yönelim halindedirler. Bu parlaklık ateşböceklerinin arasındaki mesafeye göre değişmektedir. Ters kare yasasına göre hesaplanan ışık şiddeti Eşitlik 1’ e göre belirlenir [23].

$$l(r) = l_s / r^2 \quad (1)$$

Eşitlikte $l(r)$ ışık şiddetini, l_s ışık kaynak şiddetini ve r ise uzaklığı temsil etmektedir. Bir ortamda ışık yayılırken emilime uğrar. Emilim katsayısı (γ) hesaba katıldığında Eşitlik 2 elde edilir.

$$l(r) = l_0 / e^{-\gamma r^2} \quad (2)$$

Burada l_0 değeri başlangıç ışık şiddetini temsil etmektedir. Bir ateş böceğinin çekiciliği diğer ateşböceklerinin gördüğü ışık yoğunluğuyla orantılıdır. Bir ateş böceğinin çekiciliği Eşitlik 3' de sunulduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$B(r) = B_0/e^{-\gamma r^2} \quad (3)$$

Burada $B(r)$ ateş böceğinin çekiciliğini temsil etmektedir. B_0 , $r = 0$ değerindeki çekicilik değerini temsil etmektedir.

Ateş böceklerinin arasındaki mesafe ise Eşitlik 4' de sunulduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$r_{ij} = \left\| |X_i - X_j| \right\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

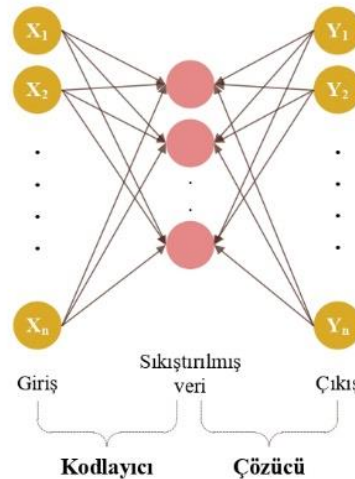
Burada i ve j farklı ateş böceklerini X_i ve X_j ateş böceklerinin konumlarını r_{ij} ise bu konumdaki ateş böceklerinin arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Burada j . ateş böceğinin diğer ateş böceğine göre daha parlak olduğunu varsayılırsa i ateş böceğinin konumu Eşitlik 5'de sunulduğu gibi güncellenmektedir.

$$X_i = X_i + B_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (X_j - X_i) + \alpha (rand - \frac{1}{2}) \quad (5)$$

Buarada α [0 1] arasında bir katsayıyı, $rand$ [0 1] arasında rastgele bir değeri temsil etmektedir.

2.5. Yığılmış Oto-Kodlayıcı (Stacked Auto-Encoder)

Yığılmış oto-kodlayıcılar (YOK), derin öğrenme literatüründe önemli bir yer tutan yapay sinir ağı modellerinden biridir [24]. Bu model, genellikle girdi verisinin temsili için hiyerarşik bir özellik çıkarımı sağlamak amacıyla kullanılır. Her biri ayrı ayrı eğitilen ve ardından birleştirilen bir dizi oto-kodlayıcıdan oluşur. Oto-kodlayıcılar, veriyi daha düşük boyutlu bir uzayda temsil etmek için öğrenilen bir kodlama işlemi gerçekleştirir ve ardından bu temsilin orijinal veriyi yeniden oluşturmasını hedefler [25]. Basit bir oto-kodlayıcı mimarisi Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Oto-kodlayıcı yapısı (Auto-Encoder structure)

Oto-kodlayıcı sinir ağı, temelde iki bölümden oluşur: Bir kodlayıcı ve bir kod çözücü. Giriş verilerini kodlayıcı kullanarak özelliklere dönüştürür, ardından bu özellikleri kod çözücü aracılığıyla başlangıç verilerine geri dönüştürerek giriş verilerini yeniden oluşturur [26].

Birden fazla oto-kodlayıcısının birbirlerine bağlanması ile yığılmış oto-kodlayıcı mimarisi oluşmaktadır. Basit bir yığılmış oto kodlayıcı mimarisi Şekil 5’de gösterilmektedir.



Şekil 5. Yığılmış oto-kodlayıcı yapısı (Stacked auto-encoder structure)

YOK, her biri bir öncekinden türetilmiş daha yüksek seviye özelliklerin öğrenilmesini sağlar. Bu model, genellikle büyük boyutlu ve karmaşık veri kümeleri üzerinde etkili sonuçlar verirken, özellik çıkarımı, boyut azaltma ve sınıflandırma işlemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [27,28].

Bir yığılmış oto-kodlayıcı yapısında birçok hiperparametre barındırmaktadır. Bu hiperparametreler kurulan ağı performansı doğrudan etkilemektedir. Oluşturulan bir mimaride yüksek başarı bu parametrelerin probleme özgü optimize edilmesi ile elde edilebilir.

2.6. Veri seti (Dataset)

Sedef hastalığının tanı ve teşhisi için ilk olarak Übeyli ve Güler tarafından kullanılan ve UCI’ de halka açık bir şekilde bulunan “Dermatoloji” veri seti kullanılmıştır [29]. Kullanılan bu veri seti içerisinde 33 adet öznitelik bulunmaktadır. Bu özniteliklerden 12 tanesi klinik öznitelik içerirken 21 adet öznitelik ise histopatolojik özelliklerdir. Veri setinde bulunan öznitelikler Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Dermatoloji veri setinde bulunan öznitelikler (Attributes found in the dermatology dataset)

Öznitelik Türü	Öznitelik	Öznitelik Türü	Öznitelik
Klinik	Eritem	Histopatolojik	Akantoz
Klinik	Pullanma	Histopatolojik	Hiperkeratoz
Klinik	Kesin Sınırlar	Histopatolojik	Parakeratoz
Klinik	Kaşıntı	Histopatolojik	Rete Sırtlarının Çomaklaşması
Klinik	Koebner Fenomeni	Histopatolojik	Rete Sırtlarının Uzaması
Klinik	Poligonal Papüller	Histopatolojik	Suprapapiller Epidermisin İncelmesi
Klinik	Foliküler Papüller	Histopatolojik	Spongiform Püstül
Klinik	Oral Mukozal Tutulum	Histopatolojik	Munro Mikroabse
Klinik	Diz Ve Dirsek Tutulumu	Histopatolojik	Fokal Hipergranüloz
Klinik	Kafa Derisi Tutulumu	Histopatolojik	Granüler Tabakanın Kaybolması
Klinik	Aile Öyküsü	Histopatolojik	Vakuolizasyon Ve Bazal Tabakanın Hasarı
Klinik	Yaş	Histopatolojik	Spongioz, Retelerin Testere Dişi Görünümü
Histopatolojik	Melanin İnkontinansı	Histopatolojik	Foliküler Boynuz Tıkacı
Histopatolojik	İnfiltratta Eozinofiller	Histopatolojik	Perifoliküler Parakeratoz
Histopatolojik	Pnl İnfiltratı	Histopatolojik	İnflamatuar Monolitik İnfiltrat
Histopatolojik	Papiller Dermiste Fibrozis	Histopatolojik	Bant Benzeri İnfiltrat
Histopatolojik	Ekzozitoz		

Veri seti içerisinde Tablo 1’ de sunulan özniteliklere sahip 366 adet veri bulunmaktadır. Veri seti içerisinde farklı dermatolojik hastalıklara ait sınıflandırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada sadece sedef hastalığına sahip olan kişi sayısı 111’dir. Veri seti %70 eğitim ve %30 test olmak üzere 2 bölüme ayrılmıştır. Çalışmada kullanılan farklı makine öğrenme yöntemleri eğitim veri seti ile eğitilecek sonrasında başarıları test veri seti ile değerlendirilecektir.

2.7. Değerlendirme kriterleri (Evaluation criteria)

Sedef hastalığı tanı ve teşhisinde kullanılan makine öğrenme yöntemlerinin başarılarını ölçmek için literatürde sıkça kullanılan doğruluk, duyarlılık ve kesinlik ölçütleri kullanılacaktır [30, 31]. Bu

değerlendirme ölçütlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle tahmin modelinin karışıklık matrisi oluşturulmalıdır. İki sınıfa ait bir karışıklık matrisi Şekil 6'de gösterilmektedir.

		Tahmin	
		DN	YN
Gerçek	DN	DN	YN
	YP	YP	DP

Şekil 6. Karışıklık matrisi (Confusion matrix)

Şekil 6' de DN gerçek negatifi, YN yanlış negatifi, YP yanlış pozitif ve DP doğru pozitif temsil etmektedir. Şekil 6' de sunulan karışıklık matrisi ile doğruluk, duyarlılık ve kesinlik ölçütleri Eşitlik 6-8' de sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [32].

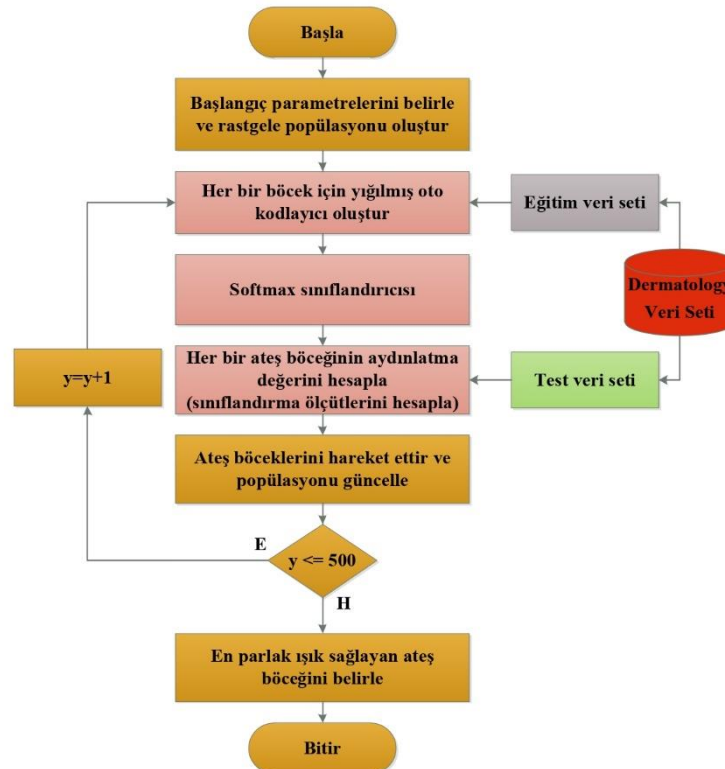
$$\text{Doğruluk} = \frac{DN+DP}{DN+DP+YN+YP} \quad (6)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (7)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (8)$$

3. Önerilen Yöntem (Proposed Model)

Çalışmanın bu bölümünde, sedef hastalığının doğru bir şekilde tanı ve teşhisinin belirlenebilmesi için yığılmış oto-kodlayıcı, softmax sınıflandırıcı ve Ateş Böceği Algoritması ile optimizasyon temelli bir derin öğrenme ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan yapının akış diyagramı Şekil 7' de gösterilmektedir.



Şekil 7. Önerilen model diyagramı (Proposed model diagram)

Şekil 7’de sunulan mimari kodlama kolaylığı ve çok boyutlu problemlerin çözümünde sunmuş olduğu avantajlardan dolayı MATLAB platformunda gerçekleştirilmiştir [12]. Mimaride öncelikle bütün hiperparametreleri optimize edecek olan Ateş Böceği Algoritması’ nın başlangıç parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş olup Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. ABA parametreleri ve değerleri (ABA parameters and values)

Parametreler	Değerleri
Popülasyon sayısı	40
B_0	1
γ	1
α	0,2
Yineleme sayısı	500

Şekil 7’de sunulduğu üzere ilk adım olarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulacaktır. Popülasyondaki her bir ateşböceği kendi içerisinde birbirlerinde farklı oto-kodlayıcı+softmax ya da yığılmış oto-kodlayıcı+softmax yapısı oluşturmaktadır. Her bir ateşböceği konumu oluşturulan yapılarıdaki hiperparametreleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu hiperparametreler Tablo 3’de gösterilmektedir.

Tablo 3. Hibrit mimaride bulunan hiperparametreler (Hyperparameters in hybrid architecture)

Hiperparametreler	Temsili
Kodlayıcı ve çözücü sayısı	AEnDeSa
Kodlayıcı ve çözücü bölümlerinde bulunan katman sayıları	AGKS
Kodlayıcı katmanlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonu	EAF
Çözücü katmanlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonu	DAF
Aşırı sığmayı önlemek ve modellerin genelleme yeteneğini geliştirmek için kullanılan Ağırlık Düzenleme Katsayısı	WRK
Geri yayılıma yardımcı olan ve seyrelmede kullanılan seyreklik oranı katsayısı	SRK
Geri yayılıma yardımcı olan ve seyrelmede kullanılan Seyreklik Düzenleme Katsayısı	SPK
Oto-kodlayıcı veya yığılmış oto-kodlayıcıda bulunan Lscaledata değerleri	LD

Şekil 7’de sunulduğu gibi oluşturulan ateş böcekleri çözüm uzayı içerisine rastgele dağıtılmaktadır. Her bir ateş böceği oluşturulurken Tablo 3’de verilen AEnDeSa değeri Eşitlik 9’de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i \text{EnDeSa}_j(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ x, & 1 \leq x \leq 4 \\ 4, & x > 4 \end{cases} \quad (9)$$

Burada $A_i \text{EnDeSa}_j(x)$, i. ateş böceğinin j. yinelemedeki AEnDeSa değerini temsil etmektedir.

Her bir ateş böceği için AGKS değeri Eşitlik 10’ de sunulan sınırlama fonksiyonun göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i \text{GKS}_j(x) = \begin{cases} 10, & x < 10 \\ x, & 10 \leq x \leq 100 \\ 100, & x > 100 \end{cases} \quad (10)$$

Burada $A_i \text{GKS}_j(x)$, i. ateş böceğinin j. yinelemedeki AGKS değerini temsil etmektedir.

Her bir ateş böceği için EAF değeri Eşitlik 11’ de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i \text{EAF}_j(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ x, & 1 \leq x \leq 2 \\ 2, & x > 2 \end{cases} \quad (11)$$

Burada $A_i \text{EAF}_j(x)$, i. ateşböceğinin j. yinelemedeki EAF değerini temsil etmektedir. Rastgele olarak belirlenen $A_i \text{EAF}_j(x)$ değerine karşılık gelen aktivasyon fonksiyonları Tablo 4’ de gösterilmektedir.

Tablo 4. EAF değerlerine karşılık gelen aktivasyon fonksiyonları (Activation functions corresponding to EAF values)

EAF Değerleri	Aktivasyon Fonksiyonu
1	logsig
2	satlin

Her bir ateş böceği için DAF değeri Eşitlik 12’de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i DAF_j(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ x, & 1 \leq x \leq 3 \\ 3, & x > 3 \end{cases} \quad (12)$$

Burada $A_i DAF_j(x)$, i. ateşböceğinin j. yinelemedeki ADAF değerini temsil etmektedir. Rastgele olarak belirlenen $A_i DAF_j(x)$ değerine karşılık gelen aktivasyon fonksiyonları Tablo 5’ de gösterilmektedir.

Tablo 5: ADAF değerlerine karşılık gelen aktivasyon fonksiyonları (Activation functions corresponding to ADAF values)

DeAf Değerleri	Aktivasyon Fonksiyonu
1	logsig
2	satlin
3	purelin

Her bir ateşböceği için WRK değeri Eşitlik 13’ de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i WRK_j(x) = \begin{cases} 0,001, & x < 0,001 \\ x, & 0,001 \leq x \leq 0,01 \\ 0,01, & x > 0,01 \end{cases} \quad (13)$$

Burada $A_i WRK_j(x)$, i. ateşböceğinin j. yinelemedeki WRK değerini temsil etmektedir.

Her bir ateşböceği için SRK değeri Eşitlik 14’ de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i SRK_j(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ x, & 1 \leq x \leq 5 \\ 5, & x > 5 \end{cases} \quad (14)$$

Burada $A_i SRK_j(x)$, i. ateşböceğinin j. yinelemedeki SRK değerini temsil etmektedir.

Her bir ateşböceği için SPK değeri Eşitlik 15’ de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i SPK_j(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases} \quad (15)$$

Burada $A_i SPK_j(x)$, i. ateşböceğinin j. yinelemedeki SPK değerini temsil etmektedir.

Her bir ateşböceği için LD değeri Eşitlik 16’ de sunulan sınırlama fonksiyonuna göre rastgele belirlenmektedir.

$$A_i LD_j(x) = \begin{cases} 1, & x < 1 \\ x, & 1 \leq x \leq 2 \\ 2, & x > 2 \end{cases} \quad (16)$$

Burada $A_i LD_j(x)$, i. ateşböceğinin j. yinelemedeki LD değerini temsil etmektedir. Belirlenen LD değerine karşılık gelen değer Tablo 6’ de gösterilmektedir.

Tablo 6. LD değerinin mimarideki karşılığı (The equivalent of LD value in architecture)

LD Değerleri	Değeri
1	True
2	False

Rastgele oluşturulan popülasyonun ardından bir sonraki adımda her bir ateş böceğinin yaymış olduğu ışığın parlaklığı hesaplanmaktadır. Her bir ateş böceğinin yaymış olduğu ışığın parlaklığı Eşitlik 17' de sunulan formül ile belirlenmektedir.

$$f(A_{ij})=A(\text{Doğruluk}, \text{Kesinlik}, \text{Duyarlılık}) \quad (17)$$

Formülde $f(A_{ij})$, i. ateş böceğinin j. yinelemedeki parlaklık miktarını temsil etmektedir.

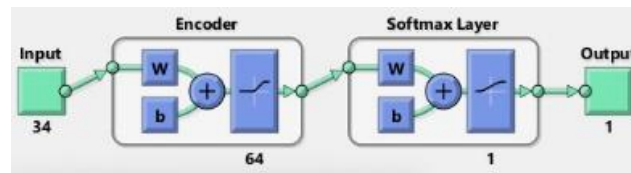
Bir sonraki adımda Eşitlik 17 ile belirlenen en parlak ışığa sahip ateş böceğine yönelim Eşitlik 5' de sunulduğu gibi belirlenerek ateş böceklerinin konumları güncellenmektedir.

Tablo 2'de sunulan yineleme sayısı kadar tekrarlanan hibrit mimaride en parlak ışığa sahip ateşböceği Eşitlik 17'de sunulan formül ile belirlenmiş ve bünyesinde bulunan parametreler Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7: En parlak ışık yayan ateşböceği parametreleri (arameters of the brightest light-emitting firefly)

Parametreler	Değerleri
AEnDeSa	1
AGKS	64
EAF	2 (satlin)
DAF	2 (satlin)
WRK	0,006
SRK	4,2770
SPK	0.03
LD	1 (true)

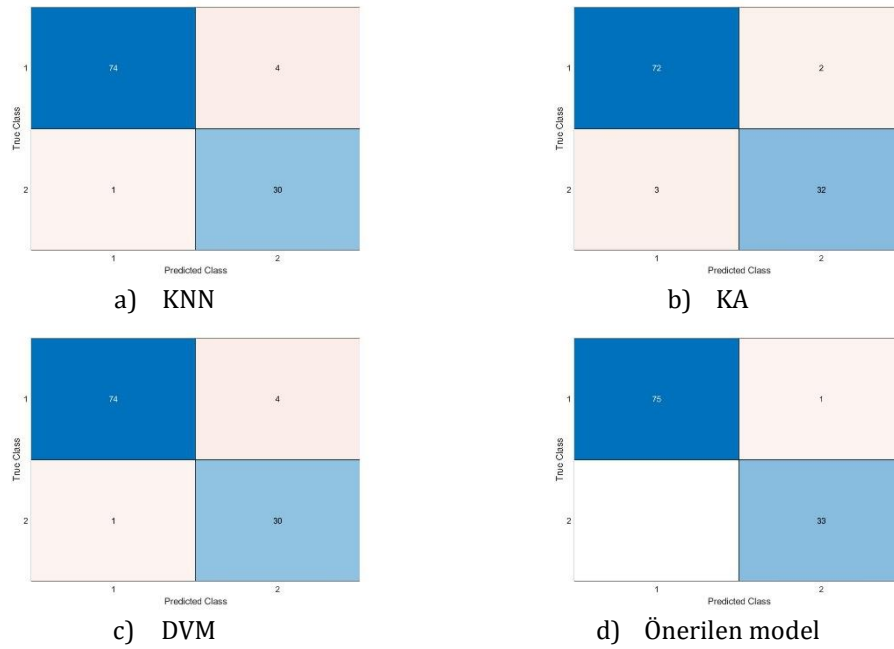
Tablo 7'de sunulan hiperparametrelere sahip en parlak ışık yayan ateş böceği parametreleri ile kurulan oto-kodlayıcı ve softmax sınıflandırıcı ile elde edilen hibrit mimari Şekil 8'de gösterilmektedir.



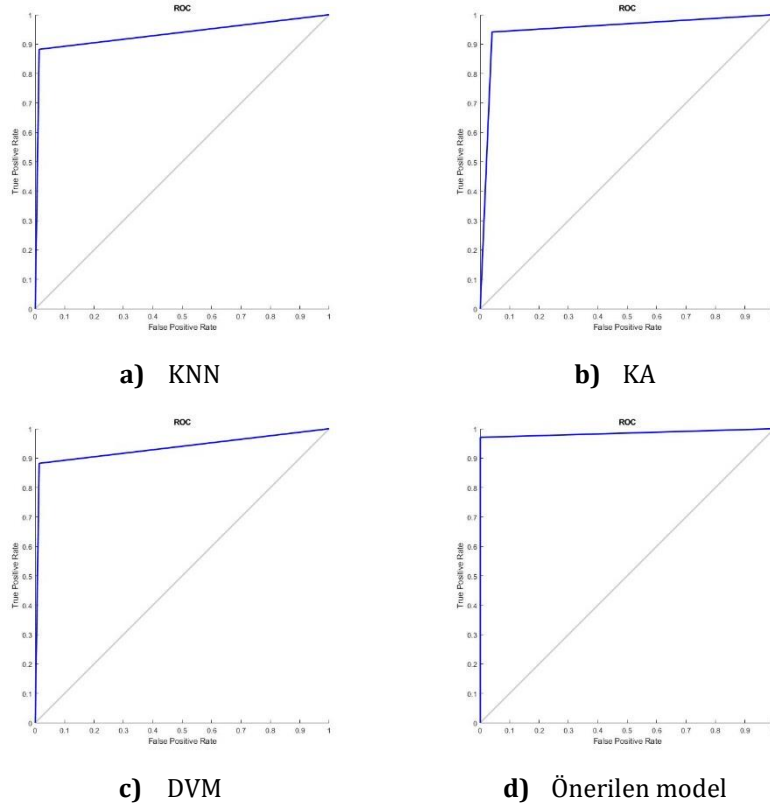
Şekil 8. Elde edilen mimari yapısı (The resulting architectural structure)

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma (Experimental Results and Discussion)

Sedef hastalığının tanı ve teşhisinde kullanılan hibrit mimari ile birlikte literatürde sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan KA, KNN ve DVM yöntemleri de çalışmada kullanılmıştır. Öğrenme veri seti üzerinde çalıştırılan modellerin test veri seti üzerindeki tahminleri ile oluşturulan karışıklık matrisleri Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Çalışmada kullanılan modellerin karışıklık matrisleri (Confusion matrices of the models used in the study)
 Şekil 9'da sunulan karışıklık matrislerine göre sunulan hibrit mimari ile elde edilen modelin tahmin doğruluğu diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha yüksektir. Çalışmada kullanılan makine öğrenimi yöntemlerinin ROC eğrileri Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Makine öğrenme yöntemleri ROC eğrileri (Machine learning methods ROC curves)

ROC eğrisi makine öğrenme yöntemlerinin başarılarının ölçümünde sıklıkla kullanılmaktadır [33]. ROC eğrisi altında kalan alana AUC denilmektedir. Bir ROC eğrisinde AUC alanı ne kadar büyükse modelin performansı da o kadar yüksektir [4]. Şekil 10'da verilen ROC eğrilerine bakıldığında önerilen modelin performansı diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha başarılıdır.

Çalışmada sedef hastalığının tanı ve teşhisinde kullanılan makine öğrenme yöntemlerinin Eşitlik 6-8'de verilen değerlendirme ölçütlerine göre başarıları hesaplanmış ve bu sonuçlar Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Çalışmada kullanılan makine öğrenme yöntemlerinin performansları (The performance of the machine learning methods used in the study)

Modeller	Kesinlik	Duyarlılık	Doğruluk(%)
KNN	0,96	0,88	0,95
KA	0,91	0,94	0,95
DVM	0,96	0,88	0,95
Önerilen Model	1	0,97	0,99

Tablo 8'de sunulan değerlendirme ölçütlerine göre sunulan hibrit modelin diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

3. Sonuç (Conclusion)

Sedef hastalığının erken tanı ve teşhisi, hastalığın etkilerini hafifletmek ve yaşam kalitesini artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Sedef, kronik bir inflamatuvar cilt hastalığıdır ve erken teşhis edilmediğinde, semptomlar zamanla kötüleşebilir ve ciddi komplikasyonlara yol açabilir. Erken tanı, uygun tedaviye başlama ve hastalığın ilerlemesini kontrol altına alma şansını artırır. Ayrıca, sedef hastalığının erken tanınması, hastalığın diğer sistemik sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilen risklerini azaltabilir. Bu çalışmada sedef hastalığının tanı ve teşhisi için hibrit bir mimari ile elde edilen bir model önerilmiştir. Oluşturulan mimaride yığılmış oto-kodlayıcı, softmax sınıflandırıcı ve Ateş Böceği Algoritması kullanılmıştır. Yığılmış oto-kodlayıcı ve softmax sınıflandırıcı ile hibritleştirilmiş mimarinin model ve hiperparametre optimizasyonu Ateş Böceği Algoritması ile sağlanmıştır. Model UCI veri deposunda bulunan "Dermatoloji" veri seti üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada aynı veri seti üzerinde farklı makine öğrenme yöntemleri de çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular önerilen yöntemin diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermiştir.

Sunulan model mimari yapıda kullanılan ve mimari içerisindeki hiperparametreleri optimize ederken aynı zamanda bunlara ulaşım imkânı da sağlamaktadır. Sunulan yöntem hasta karar destek sistemlerinde alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir.

İleriki çalışmalarda sunulan mimari ve bu mimariye ait parametreler ile mobil uygulamalar geliştirilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] A. Günaydin, "Kurkumin Etken Maddesinin Etkileri ve Kalite Kontrol Çalışmaları Effects and Quality Control Studies of Curcumin," *Dünya Sağlık ve Tabiat Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no.1, pp. 14-21, 2023.
- [2] A. W. Armstrong and C. Read, "Pathophysiology, Clinical Presentation, and Treatment of Psoriasis: A Review," *JAMA - Journal of the American Medical Association*, vol. 323, no. 19, pp. 1945-1960, 2020. doi:10.1001/jama.2020.4006
- [3] F. Yamazaki, "Psoriasis: Comorbidities," *Journal of Dermatology*, vol. 48, no. 6, pp. 732-740, 2021. doi:10.1111/13468138.15840
- [4] M. A. Bülbül, "Optimization of artificial neural network structure and hyperparameters in hybrid model by genetic algorithm: iOS-android application for breast cancer diagnosis/prediction", *Journal of Supercomputing*, vol. 80, no. 4, pp. 4533-4553, 2024. doi:10.1007/s11227-023-05635-z
- [5] I. Pacal and S. Kılıcarslan, "Deep learning-based approaches for robust classification of cervical cancer," *Neural Comput. Appl.*, vol. 35, no. 25, pp. 18813-18828, 2023. doi:10.1007/s00521-023-08757-w
- [6] R. Raj, N. D. Londhe, and R. S. Sonawane, "Objective scoring of psoriasis area and severity index in 2D RGB images using deep learning," *Multimed. Tools Appl.*, pp. 1-27, 2024. doi:10.1007/s11042-024-18138-7

- [7] M. S. Rashid, G. Gilanie, S. Naveed, S. Cheema, and M. Sajid, "Automated detection and classification of psoriasis types using deep neural networks from dermatology images," *Signal, Image Video Process.*, vol. 18, no. 1, pp. 163-172, 2024. doi:10.1007/s11760-023-02722-9
- [8] V. K. Shrivastava, N. D. Londhe, R. S. Sonawane, and J. S. Suri, "A novel approach to multiclass psoriasis disease risk stratification: Machine learning paradigm," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 28, pp. 27-40, 2016. doi:10.1016/j.bspc.2016.04.001
- [9] G. Vishwakarma, A. K. Nandanwar, and G. S. Thakur, "Optimized vision transformer encoder with cnn for automatic psoriasis disease detection," *Multimed. Tools Appl.*, pp. 1-20, 2023. doi:10.1007/s11042-023-16871-z
- [10] M. Dash, N. D. Londhe, S. Ghosh, A. Semwal, and R. S. Sonawane, "PsLSNet: Automated psoriasis skin lesion segmentation using modified U-Net-based fully convolutional network," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 52, pp. 226-237, 2019. doi:10.1016/j.bspc.2019.04.002
- [11] L. H. Juang and M. N. Wu, "Psoriasis image identification using k-means clustering with morphological processing," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44, no. 5, pp. 895-905, 2011. doi:10.1016/j.measurement.2011.02.006
- [12] M. A. Bülbül and C. Öztürk, "Optimization, Modeling and Implementation of Plant Water Consumption Control Using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network in a Hybrid Structure," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 47, no. 2, pp. 2329-2343, 2022. doi:10.1007/s13369-021-06168-4
- [13] M. A. Bülbül, E. Harirchian, M. F. Işık, S. E. Aghakouchaki Hosseini, and E. Işık, "A Hybrid ANN-GA Model for an Automated Rapid Vulnerability Assessment of Existing RC Buildings," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 10, 2022. doi:10.3390/app12105138
- [14] F. Konak, M. A. Bülbül, and D. Türkoğlu, "Feature Selection and Hyperparameters Optimization Employing a Hybrid Model Based on Genetic Algorithm and Artificial Neural Network: Forecasting Dividend Payout Ratio," *Comput. Econ.*, vol. 63, pp. 1673-1693, 2024. doi:10.1007/s10614-023-10530-z
- [15] I. Nurhidayat, B. Pimpunchat, and W. Klomsungcharoen, "More accurate simulation for insurance data based on a modified SVM polynomial method," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 44, no. 6, pp. 9129-9141, 2023. doi: 10.3233/JIFS-222879
- [16] J. Li, J. Shi, Z. Liu, and C. Feng, "A parallel and balanced SVM algorithm on spark for data-intensive computing," *Intell. Data Anal.*, vol. 27, no. 4, pp. 1065-1086, 2023. doi:10.3233/IDA-226774
- [17] G. Sandhu, A. Singh, P. S. Lamba, D. Virmani, and G. Chaudhary, "Modified Euclidean-Canberra blend distance metric for kNN classifier," *Intell. Decis. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 527-541, 2023. doi:10.3233/idt-220223
- [18] M. A. Bülbül, "Kuru Fasulye Tohumlarının Çok Sınıflı Sınıflandırılması İçin Hibrit Bir Yaklaşım," *Iğdır Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 13, no. 1, pp. 33-43, 2023. doi:10.21597/jist.1185949
- [19] I. Roshanski, M. Kalech, and L. Rokach, "Automatic Feature Engineering for Learning Compact Decision Trees," *Expert Syst. Appl.*, vol. 229, pp. 120470, 2023. doi:10.1016/j.eswa.2023.120470
- [20] G. Nanfack, P. Temple, and B. Frénay, "Learning Customised Decision Trees for Domain-knowledge Constraints," *Pattern Recognit.*, vol. 142, pp. 109610, 2023. doi:10.1016/j.patcog.2023.109610
- [21] Z. Cheng, H. Song, D. Zheng, M. Zhou, and K. Sun, "Hybrid firefly algorithm with a new mechanism of gender distinguishing for global optimization," *Expert Syst. Appl.*, vol. 224, pp. 120027, 2023. doi:10.1016/j.eswa.2023.120027
- [22] T. Thepphakorn and P. Pongcharoen, "Modified and hybridised bi-objective firefly algorithms for university course scheduling," *Soft Comput.*, vol. 27, no. 14, pp. 9735-9772, 2023. doi:10.1007/s00500-022-07810-5
- [23] M. Akdağ and M. Çelebi, "Ateş Böceği Algoritması ile Yağlı Tip Transformatörün Ağırlık Optimizasyonu," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 2, pp. 169-180, 2022. doi:10.24012/dumf.1075008
- [24] J. Yang and L. Wang, "Nonlocal, local and global preserving stacked autoencoder based fault detection method for nonlinear process monitoring," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 235, pp. 104758, 2023. doi:10.1016/j.chemolab.2023.104758
- [25] R. R. Jagat, D. S. Sisodia, and P. Singh, "Web-S4AE: a semi-supervised stacked sparse autoencoder model for web robot detection," *Neural Comput. Appl.*, vol. 35, no. 24, pp. 17883-17898, 2023. doi:10.1007/s00521-023-08668-w
- [26] K. Adem, S. Kiliçarslan, and O. Cömert, "Classification and diagnosis of cervical cancer with stacked autoencoder and softmax classification," *Expert Syst. Appl.*, vol. 115, pp. 557-564, 2019. doi:10.1016/j.eswa.2018.08.050
- [27] M. E. Kaviya and D. Dharma, "Stacked autoencoder with novel integrated activation functions for the diagnosis of autism spectrum disorder," *Neural Comput. and Appl.*, Vol. 35, pp. 17043-17075, 2023. doi:10.1007/s00521-023-08565-2
- [28] W. Zeng, L. Yu, F. Xu, Z. Huang, S. Zhou, S. Guo & B. Du, "Wear indicator construction for rolling bearings based on an enhanced and unsupervised stacked auto-encoder," *Soft Comput.*, vol. 28, pp. 8835-8848, 2024. doi:10.1007/s00500-023-09068-x
- [29] E. D. Übeyli and I. Güler, "Automatic detection of erythemato-squamous diseases using adaptive neuro-fuzzy inference systems," *Comput. Biol. Med.*, vol. 35, no. 5, pp. 421-433, 2005. doi:10.1016/j.compbiomed.2004.03.003

- [30] M. Jiang, R. Rosio, S. Salanterä, A. M. Rahmani, P. Liljeberg, D. S. da Silva, V. H. C. de Albuquerque and W. Wu, "Personalized and adaptive neural networks for pain detection from multi-modal physiological features," *Expert Syst. Appl.*, vol. 235, pp. 121082, 2024. doi:10.1016/j.eswa.2023.121082
- [31] U. Prasad, S. Chakravarty, and G. Mahto, "Lung cancer detection and classification using deep neural network based on hybrid metaheuristic algorithm," *Soft Comput.*, vol. 28, pp.8579-8602, 2024. doi:10.1007/s00500-023-08845-y
- [32] P. Sengodan, K. Srinivasan, R. Pichamuthu, and S. Matheswaran, "Early detection and classification of malignant lung nodules from CT images: An optimal ensemble learning," *Expert Syst. Appl.*, vol. 229, pp. 120361, 2023. doi:10.1016/j.eswa.2023.120361
- [33] A. M. Carrington *et al.*, "Deep ROC Analysis and AUC as Balanced Average Accuracy, for Improved Classifier Selection, Audit and Explanation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 1, pp. 329-341 2023. doi:10.1109/TPAMI.2022.3145392

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Bidirectional DC-DC Converter and Single-Phase Grid-Connected Inverter Design for Energy Management in V2G Topology

Sadık Yıldız^a, Hasan Hüseyin Sayan^b

Submitted: 06.05.2024 Revised: 04.06.2024 Accepted: 27.06.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A16

ABSTRACT

As renewable energy resources dwindle and the world's population grows, the balance between energy supply and demand is being adversely affected. The rapid increase in the number of EVs causes power quality problems in existing conventional grids. Topologies such as V2G, G2V, and V2H are being studied in order to overcome these problems. In this study, a microgrid is designed for power flow in single-phase V2G topology. In this microgrid, there is one EV, one home, and one PV panel. The EV is charged by the PV panel during the daytime when it is in the parking lot. When there is a power quality problem in the microgrid, the V2G topology is activated and power flows from the EV battery to the grid. A single-phase grid-connected inverter and a bidirectional DC-DC converter were designed to operate this system. The simulations of the designed microgrid were performed in the MATLAB/Simulink program. According to the simulation results, installing this system in homes or workplaces with EVs, charging the EV battery with PV panel, and using the EV battery to eliminate power quality problems that may occur in the existing microgrid provides a solution for single-phase V2G topology.

Keywords: V2G, Grid-Connected Inverter, Bidirectional DC-DC Converter, Micro Grid, EV

^a Gazi University,
Institute of Natural and Applied
Sciences 06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4733-4684
e mail: sadikyildiz06@gmail.com

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Electrical and Electronics
Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 000-0002-0692-172X

*Corresponding author:
sadikyildiz06@gmail.com

V2G Topolojisinde Enerji Yönetimi için Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü ve Tek Fazlı Şebeke Bağlantılı Evirici Tasarımı

ÖZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının azalması ve dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji arz talep dengesi olumsuz etkilenmekte. EV sayısının hızla artması mevcut konvansiyonel şebekelerde güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için V2G, G2V ve V2H gibi topolojilerde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada tek fazlı V2G topolojisinde güç akışı için bir mikro şebeke tasarlandı. Bu mikro şebeke içerisinde bir adet EV, bir adet ev ve bir adet PV panel bulunmaktadır. EV gündüzleri otoparkta iken PV panel ile şarj olmaktadır. Mikro şebekede güç kalitesinde bir problem olduğunda ise V2G topolojisi işletilerek EV bataryasından şebekeye güç akışı gerçekleştirilmektedir. Bu sistemin işletilebilmesi için bir adet tek faz şebeke bağlantılı evirici ve bir adet çift yönlü DC-DC dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan mikro şebekenin simülasyonları MATLAB/Simulink programında yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre EV bulunan evlerde ya da iş yerlerinde bu sistem kurularak PV panel ile EV bataryasının şarj edilmesi ve EV bataryasının mevcut mikro şebekede oluşabilecek güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde kullanılması tek fazlı V2G topolojisi için bir çözüm önerisi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: V2G, Şebeke Bağlantılı Evirici, Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü, Mikro Şebeke, EV

1. Introduction

There has been a remarkably rapid increase in the use of electric vehicles (EVs) in parallel with the growth in demand for energy resources worldwide. This rapid increase is disrupting the supply-demand balance and makes grid integration of EVs an important issue. This rapid increase in the number of EVs adds unpredictable large loads to the grid during grid integration. These unpredictable loads cause power quality issues such as frequency instability, voltage fluctuations, charging harmonics, and unbalanced loads on the grid. Energy flow topologies such as Vehicle-to-Grid (V2G), Grid-to-Vehicle (G2V), Vehicle-to-Vehicle (V2V), and Vehicle-to-Home (V2H) have been developed in recent studies to overcome this grid capacity problem [1,2]. The main elements in these topologies are the existing conventional grid, the microgrid within the vehicle batteries, and renewable energy sources such as photovoltaic (PV) panels, battery energy storage systems (BESS), wind turbines, etc. (Figure 1). The goal is to maintain power quality by maintaining the supply-demand balance in the existing conventional grid with energy flow topologies that control the existing energy flow using these three basic structures. In the future, as electric vehicles replace today's fossil fuel vehicles, the use of these power flow topologies will become a necessity. In this study, a single-phase V2G topology is realized where energy flows between a conventional grid and a microgrid consisting of a home, an EV, and a PV panel connected to this grid. In the designed system, a single-phase grid-connected inverter is designed for the EV battery to transfer energy to the grid in V2G topology. A bidirectional DC-DC converter (BDC) is designed to charge the EV battery in the microgrid (MG) with the PV panel and provide DC voltage to the grid-connected inverter. The designed topology is simulated and its applicability is demonstrated.

In reviewing the literature, many studies have been conducted on this topic. A study presents the architecture for implementing the V2G-G2V system in a MG using EV level 3 fast charging [3]. In another study, a brief discussion of the evolution of bidirectional conversion in V2G and G2V topology is presented [4]. Another article provides a comprehensive review of bidirectional power factor correction and DC-DC converter topologies for V2G and G2V topologies [5]. The paper in [6] proposes a cascaded interleaved configuration that integrates the PV and utility sources for EV battery charging using inductive power transfer technology in both G2V and V2G topologies. In another paper, the designed MG integrates EV for V2G and G2V operation using solar PV, wind, batteries and grid. The electricity from the DC microgrid with grid, PV, wind and BESS technologies is used to charge EV batteries in G2V topology [7]. In [8], the performance analysis of a grid-connected PV/EV/grid system was performed and the operation was simulated. Another article discusses various BDC topologies used in the V2G system, which can also reduce the cost of charging for electric utilities, thus increasing the profits for EV owners [9]. The paper develops an electric vehicle switched reluctance motor drive powered by a battery/supercapacitor with G2V and V2H/V2G functions [10]. The article [11] investigated the financial benefits of using EVs as temporary energy storage in MG integrated with a PV plant. Another paper proposes an integrated converter with drive, G2V, V2G, and DC/V2V charging capabilities for an EV drive-train using a switched reluctance motor [12]. The paper [13] presents an electric scooter with G2V/V2H/V2G and energy harvesting functions. The paper discusses the design and control of a bidirectional battery charger for EVs, and its operation as an active power filter when connected to the local home electrical grid, and the charger is also designed and controlled in order to operate while charging of the battery from the grid and the injecting the power back to the grid when needed [14]. In study [15] presented the architecture of bidirectional Battery Charger for EVs applications. Another study presents the main operation modes for an EV battery charger in the context of in smart grids and smart homes, i.e., present-day and new modes of operation that can be an asset for EV adoption are discussed and proposed [16]. Another study proposes an on-board bidirectional battery charger prototype to allow the G2V, V2G and V2H operation modes for on-board (EV) battery charger with enhanced V2H operation mode [17]. The article presents an off-board bidirectional battery charger for EVs that is designed to perform various tasks beyond simply charging EVs, such as G2V, V2G, and V2H technologies, and also improving the grid power quality [18]. Another paper reviews various operational modes such as V2G, G2V and V2H, issues, and challenges related to integrating the vehicle with the grid [19]. The paper examines the effects of grid disturbances on EV batteries in G2V/V2G and V2H modes [20].

Valuable studies in the literature are cited above. In this study, an MG was designed for energy management. In this MG, there is a home, an EV and a PV panel. A V2G topology is operated in the MG. Energy flow management between the conventional grid and the designed MG was implemented and a

single-phase V2G topology was operated. A single-phase grid-connected inverter is designed for the EV battery to transfer energy to the grid in V2G topology in the designed MG. The BDC design was realized to control the DC energy flow between the EV battery and the PV panel, and the DC energy flow between the EV battery and the grid-connected inverter. The applicability of the designed system is demonstrated by simulation in the MATLAB Simulink program. Our paper consists of four sections. In the first section, the designed system is explained and the literature review is made. In the second section, the units of the designed system are explained and the working steps are given. The third section describes the simulation and results of the designed system. In the fourth section, the conclusion is given.

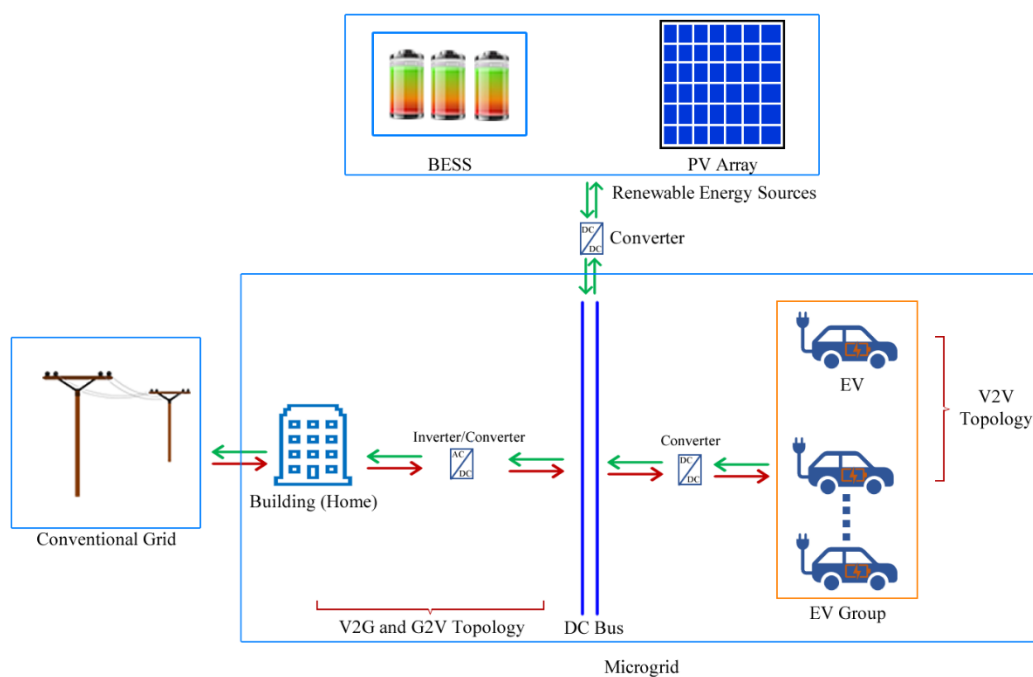


Figure 1. Energy flow topologies between EV and conventional grid

2. Designed V2G Topology

The designed system has four main components: conventional grid, home, EV, and PV panel (Figure 2). Conventional grid is the main energy source. Home, EV and PV panel make up the MG. In the designed MG, the EV battery is charged by the PV panel and the EV battery supplies DC voltage to the grid-connected inverter when the V2G topology is operated. The BDC design is realized to control the energy flow of the EV battery. When the V2G topology is operated, the DC voltage provided by the EV battery is transferred to the grid by the designed single-phase grid-connected inverter.

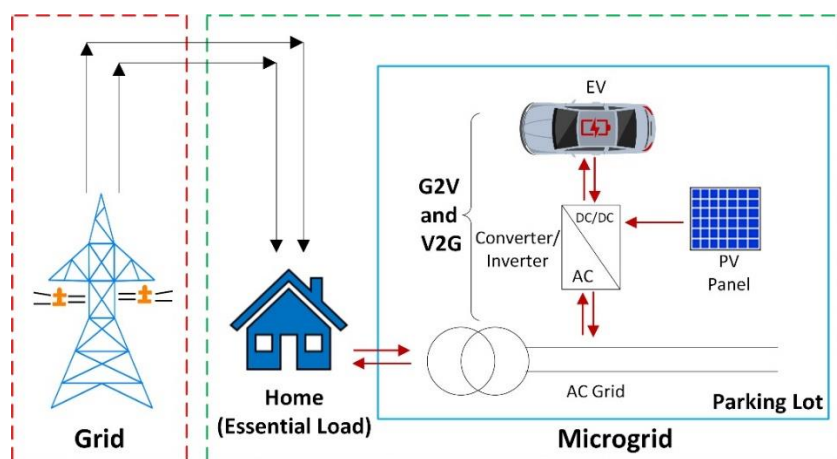


Figure 2. The designed system and components

2.1. Bidirectional DC-DC converter

The main purpose of the BDC (Figure 3) is to enable energy flow between two different DC voltage levels. It has 2 modes, the boost mode and the buck mode. In boost mode, energy flows from the low voltage level to the high voltage level of the boost mode. In buck mode, energy flows from the high voltage level to the low voltage level.

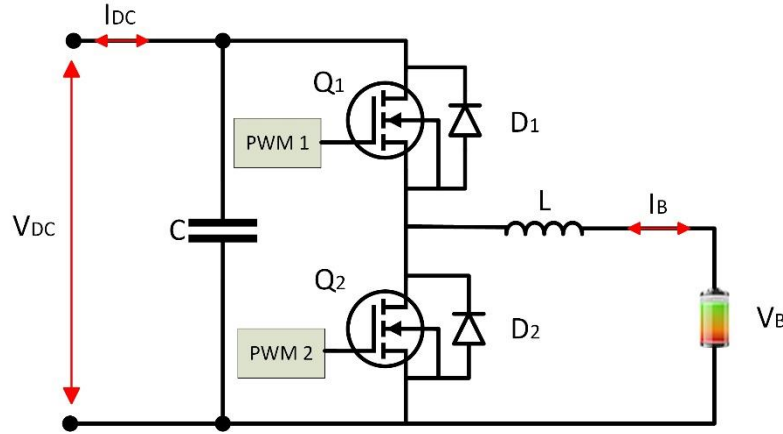


Figure 3. The bidirectional DC-DC converter

In buck mode, energy flows from the high voltage level (V_{DC}) to the low voltage level (V_B) to charge the EV battery with PV. In buck mode, MOSFET Q1 and diode D2 are conducting. The PV is connected to the circuit as the DC power supply, and the EV battery is connected to the circuit as the load and it is charging. EV battery voltage V_B , capacitor (C) and inductor (L) values are calculated as follows [21-23];

$$V_B = V_{DC} \times D_{Buck} \quad (1)$$

$$C_{Buck} = \frac{(1-D_{Buck})V_B}{8L_{Buck}\Delta V_B f_{sw}} \quad (2)$$

$$L_{Buck} = \frac{(V_{DC}-V_B)D_{Buck}}{\Delta I_L f_{sw}} \quad (3)$$

Here;

- V_B : Battery voltage
- V_{DC} : PV voltage in buck mode
- D_{Buck} : Transmission rate in buck mode
- L_{Buck} : Inductor value in buck mode
- C_{Buck} : Capacitor value in buck mode
- ΔV_B : Battery voltage ripple.
- ΔI_L : Inductor current ripple
- f_{sw} : Switching frequency

In boost mode, the grid-connected inverter is supplied with energy from the low voltage level (V_B) to the high voltage level (V_{DC}). In boost mode, Q2 MOSFET and D1 diode are conducting. The EV battery is connected to the circuit as the DC power supply, and the inverter is connected to the circuit as the load. The EV battery feeds the inverter as a discharge. In boost mode, the inverter input voltage (V_{DC}), capacitor (C) and inductor (L) values are calculated as follows [21-23];

$$V_{DC} = \frac{V_B}{(1-D_{Boost})} \quad (4)$$

$$C_{Boost} = \frac{D_{Boost}V_{DC}}{R_{out}\Delta V_{DC}f_{sw}} \quad (5)$$

$$L_{Boost} = \frac{V_B D_{Boost}}{\Delta I_L f_{sw}} \quad (6)$$

Here;

- V_B : Battery Voltage
- V_{DC} : Inverter input voltage in boost mode
- D_{Boost} : Transmission rate in boost mode
- L_{Boost} : Inductor value in boost mode
- C_{Boost} : Capacitor value in boost mode
- R_{out} : Output impedance in boost mode
- ΔV_{DC} : Inverter input voltage ripple.
- ΔI_L : Inductor current ripple
- f_{sw} : switching frequency

The BDC operates in two modes, Buck and Boost. L and C values are calculated separately for these two modes. L and C values for BDC are determined as follows [22,23];

$$L = \max(L_{Buck}, L_{Boost}) \quad (7)$$

$$C = \max(C_{Buck}, C_{Boost}) \quad (8)$$

The pulse width modulation (PWM) signals generated for BDC control are determined according to the reference current (I_{ref}) generated for charging and discharging the EV battery. When the EV battery is charging, I_{ref} is generated by performing PID control with the given reference voltage (V_{ref}) and the instantaneous operating voltage (V_{op}) of the battery (Figure 4-a). When the EV battery is discharging, I_{ref} is generated by performing PID control with the reference voltage (V_{ref}) and the load voltage (V_{Load}) at the inverter (Figure 4-b). The PWM 1 and PWM 2 control signals for the BDC are generated by PID control with the value of I_{ref} and the instantaneous operating current of the battery (I_{op}) (Figure 4-c).

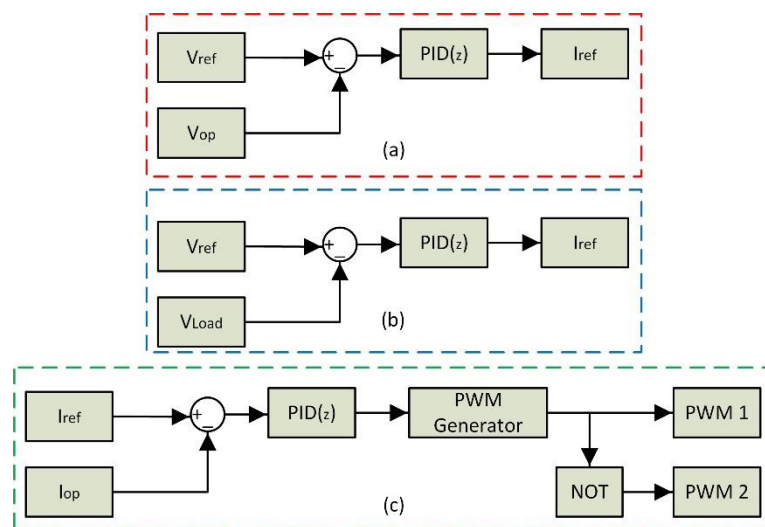


Figure 4. (a) Generation of reference current (I_{ref}) for battery charging (b) Generation of reference current (I_{ref}) for battery discharging (c) Generation of control signal for BDC

2.2. Single-Phase Grid-Connected inverter

When the V2G topology is operated in the designed system, energy is transferred from the EV battery to the grid via a single-phase grid-connected inverter (Figure 5). In the V2G topology, when there is a power demand that exceeds the available power capacity in the MG to which the EV is connected, the EV battery is connected to the grid with a single-phase grid-connected inverter to help meet the power demand.

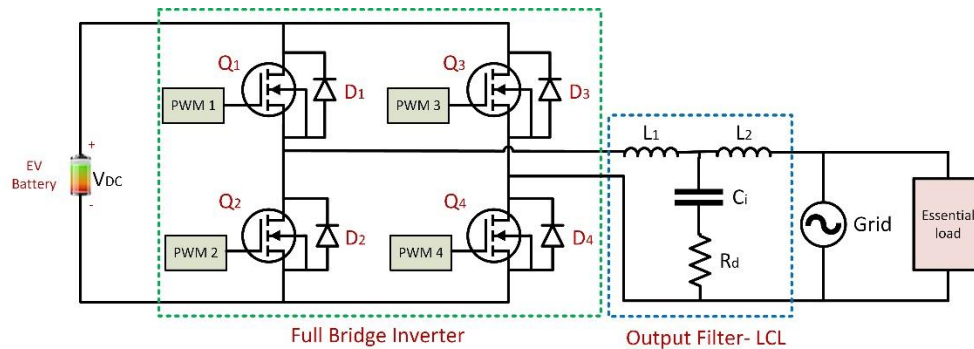


Figure 5. Single-phase grid-connected inverter

The full-bridge inverter is designed for single-phase grid-connected inverters. PWM signals were used for grid connection of the EV battery and energy flow control. The block diagram of the single-phase grid-connected inverter design is shown in Figure 6. In this block diagram, PWM control signals are obtained in 5 steps.

- Step 1: Connecting power circuit
- Step 2: Generating α - β voltages and currents
- Step 3: Generating PLL and DQ transformation
- Step 4: Executing current control with PI
- Step 5: Generating PWM signals for power circuit

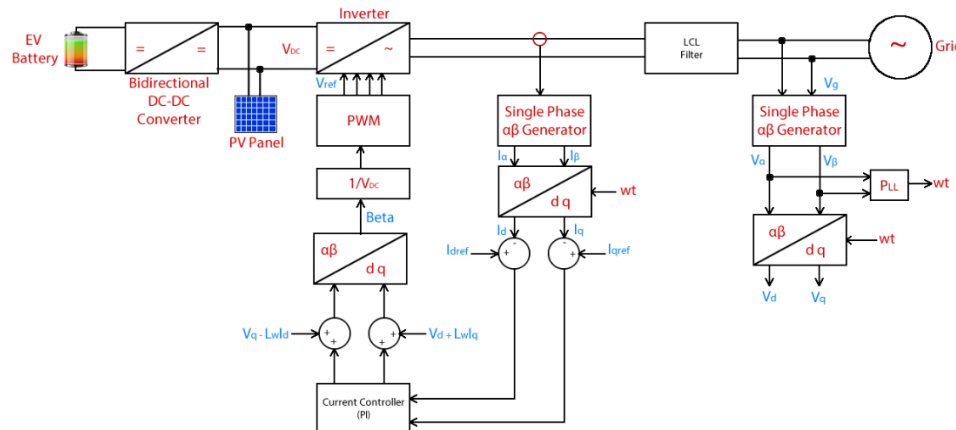


Figure 6. Single-phase grid-connected inverter block diagram

During the transfer of energy from the EV battery to the grid, harmonics are generated due to the switching elements used in the inverter [24]. The total harmonic distortion (THD) of the fundamental frequency current transferred to the grid must comply with international standards for grid-connected inverters [2]. In order to transfer the current from the EV battery to the grid in accordance with the standards, a filter must be used at the inverter output. The most widely used filter type is the LCL filter, because it is smaller in size and more cost-effective than other filters. However, determining the parameters of the LCL filter is more complex. Therefore, the parameters must be accurately calculated and determined in order to maintain the steady-state state of the system [2].

After determining the values of the variables of the single-phase grid-connected inverter circuit, the values of the LCL filter variables must be calculated. The variables that need to be known in a single-phase grid-connected inverter are as follows:

- V_g : Grid voltage
- P_n : Inverter output power
- V_{DC} : DC input voltage (EV battery voltage)
- f_g : Grid frequency
- f_{sw} : Switching frequency
- T_{sw} : Inverter switching time
- m : Inverter modulation factor

The first step in LCL filter design is to select the resonant frequency (f_r) away from the grid frequency (Equation 9).

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C_i}} \quad (9)$$

The performance of the LCL filter is affected by the selected f_r , the value of the capacitor C_i , and the inductance values of the coils L_1 and L_2 . Therefore, equation 10 should be used to determine f_r .

$$10f_g \leq f_r \leq (f_{sw}/2) \quad (10)$$

Reactive power in the grid can cause the capacitor (C_i) to resonate. Therefore, passive or active damping should be added to the capacitor. In this study, passive damping is performed by connecting a damping resistor R_d in series with the capacitor. The value of R_d connected in series with the filter capacitor is calculated as follows.

$$R_d = \frac{1}{3\omega_r C_i} \quad (11)$$

Filter values are calculated using Base Impedance (Z_b) and Base Capacitance (C_b) values [2,25].

$$Z_b = \frac{V_g^2}{P_n} \quad (12)$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi f_g Z_b} \quad (13)$$

In the calculation of the filter capacitance C_i , the power correction factor is chosen as maximum of 5%. Therefore, the calculated C_i value is equal to 5% of the C_b value.

$$C_i = 0.05C_b \quad (14)$$

The maximum amount of ripple in the current at the inverter output ΔI_{Lmax} is calculated as follows:

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{2V_{DC}}{3L_1} (1 - m)mT_{sw} \quad (15)$$

The highest peak-to-peak current harmonic occurs at $m = 0.5$. Therefore, ΔI_{Lmax} can also be expressed as follows.

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_{DC}}{6f_{sw}L_1} \quad (16)$$

For the maximum rated current of the inductor L_1 , ΔI_{Lmax} is also expressed as:

$$\Delta I_{Lmax} = 0.1I_{max} \quad (17)$$

$$I_{max} = \frac{P_n\sqrt{2}}{V_p} \quad (18)$$

With these equations, the L_1 value is calculated as shown in equation 19.

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{6f_{sw}\Delta I_{Lmax}} \quad (19)$$

The LCL filter equivalent circuit is analyzed as a current source to calculate the ripple reduction for harmonic frequencies. The LCL filter limits 20% of its own value to reduce the expected 10% current ripple, resulting in a 2% ripple in the output current [26,27]. The relation between the harmonic current of the inverter and the grid and its simplified form is given in Equation 20.

$$\frac{i_g}{i_i} = \frac{1}{|1+r|1-L_1C_b\omega_{sw}^2x|} = k_a \quad (20)$$

The L_2 value is calculated using the constant value of the reduction ratio k_a obtained from equation 20 as follows.

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_a^2}+1}}{C_i f_{sw}^2} \quad (21)$$

The ratio of the inductances L_1 and L_2 is defined as the constant r . The equation in this case is given in equation 22.

$$L_2 = rL_1 \quad (22)$$

3. Simulation and Results of The Designed System

The energy flow management designed for the V2G topology consists of four main components: conventional grid, home, EV and PV. The BDC is designed to control the energy flow between PV and EV battery and between EV battery and single-phase grid-connected inverter. In addition, the single-phase grid-connected inverter is designed to transfer energy from the EV battery to the grid. The designed energy flow model was created in MATLAB 2020b/Simulink program. The grid values for the simulation of the model and the component values of the designed system are given in Table 1. The simulations of the designed energy flow model were performed by using these values.

Table 1. The designed system parameters

Symbol	The designed system parameters	Values
V_g	Grid voltage	230 V
V_{Bch}	EV battery charge voltage	330 V
V_{Bdch}	EV battery discharge voltage	322 V
V_{pv}	PV output voltage	530 V
f_g	Grid frequency	50 Hz
f_{sw}	Switching frequency	10 kHz
L	BDC inductor	4 mH
C_i	BDC capacitor	1000 μ f
L_1	Inverter side inductor of LCL filter	4.06 mH
L_2	Grid side inductor of LCL filter	4.35 mH
C_i	Capacitor of LCL filter	6.01 μ f
R_d	Damping resistor	1 Ω

The simulation of the designed system is performed between time $t=0$ and $t=0.5$. The grid feeds a 1kW load from $t=0$ to $t=0.1$. Another 2kW load is connected to the grid at $t=0.15$ and the grid feeds a total of 3kW load. The EV battery is connected to the grid at $t=0.2$, and 1,8 kW of the 3 kW load is supplied by the grid and 1,2 kW by the EV battery (Figure 7).

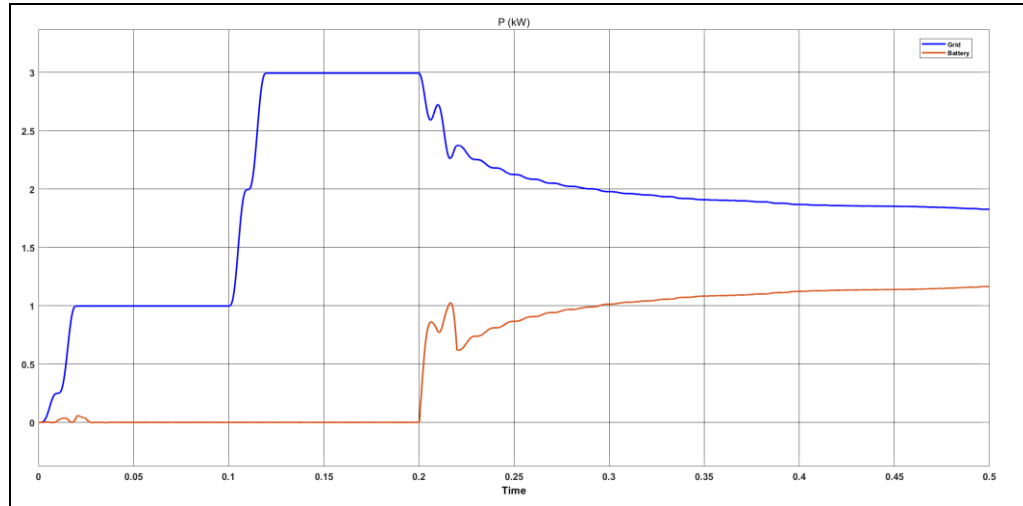


Figure 7. Grid and EV battery power flow chart

Figure 8 shows the current and voltage graphs of the grid. The grid voltage remains constant throughout the simulation. Until $t=0.1$, the grid current for a 1 kW load is measured as $I_{RMS}=4,3$ A. Since the total load is 3kW, the current drawn begins to be measured as $I_{RMS}=12,7$ A at $t=0.1$. When the EV battery is connected to the grid at time $t=0.2$, the grid current decreases to $I_{RMS} = 10,6$ A as the grid starts to consume 1,8 kW of the 3 kW load.

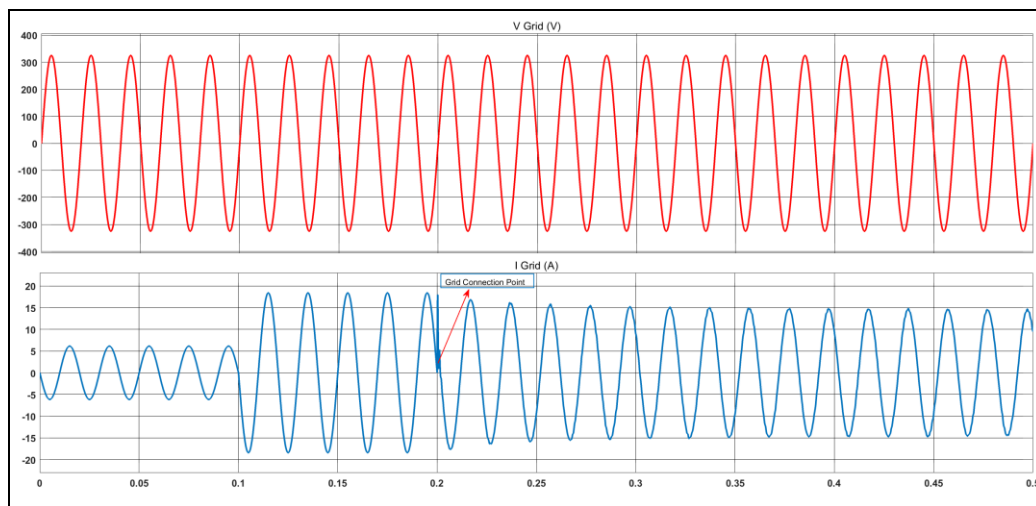


Figure 8. V-I graph of the grid

The graph of the EV battery's current, voltage, state of charge (SOC) and power values is shown in Figure 9. Until the moment $t=0.2$, the PV panel charges the EV battery in the buck mode of the BDC. The EV battery feeds the grid with a single-phase grid-connected inverter from the moment $t=0.2$ to $t=0.5$ in the boost mode of the BDC. Until $t=0.2$ the SOC of the EV battery increases, after $t=0.2$ the SOC starts to decrease. The EV battery charges at 330V 40A and discharges at 322V 32A. The current graph shows that the current changes direction between charge and discharge.

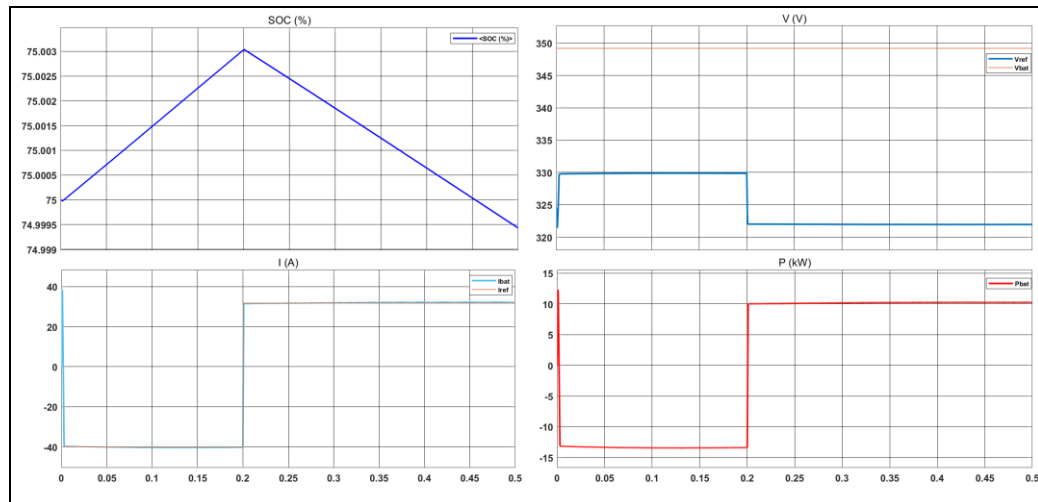


Figure 9. SOC, current, voltage and power graph of EV battery

In order for the PV panel to charge the EV battery from $t=0$ to $t=0.2$, I_r was set to 1000A and $T=25$ °C. While the EV battery is charging, the PV panel provides a voltage of 510 V and a current of 25 A. At $t=0.2$, the current drawn is 0. Figure 10 shows the current, voltage, power, and I_{diode} graphs of the PV panel.

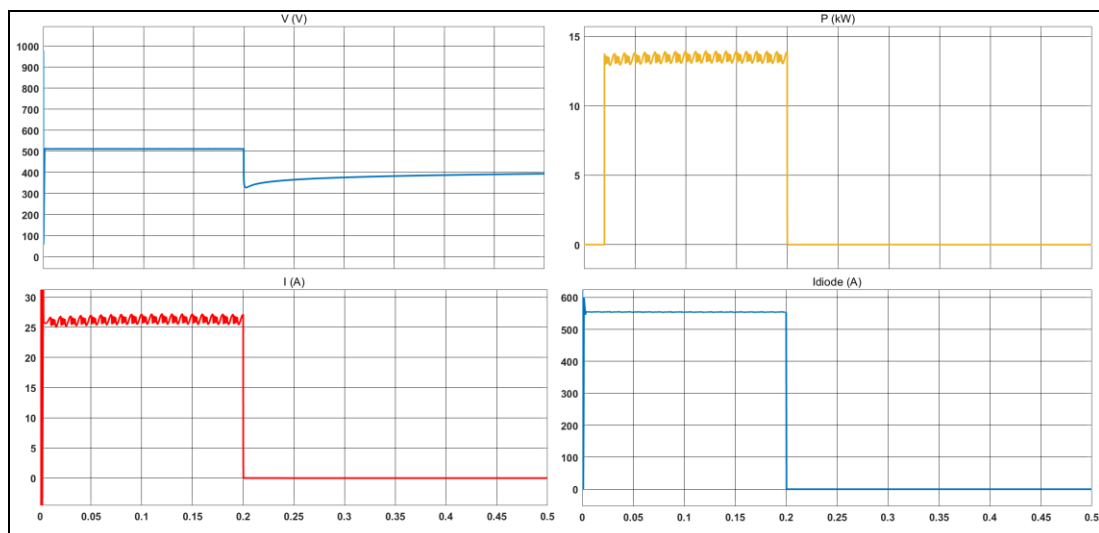


Figure 10. SOC, current, voltage and power graph of EV battery

According to the IEEE-519 harmonic standards, the THD value of the current drawn from the grid should be less than 5%. The THD value of the network was determined to be 1.28% using the FFT analysis (Figure 11).

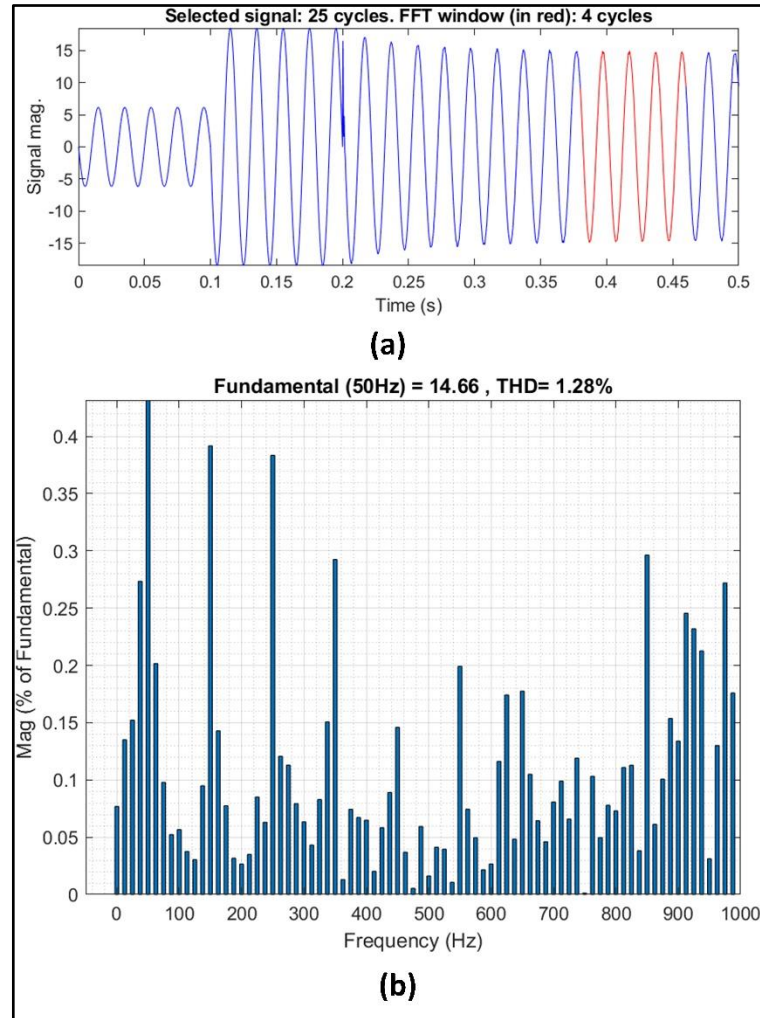


Figure 11. (a) FTT analyze of grid signal (b) THD value of grid

4. Conclusion

The number of EVs is increasing day by day. This increase disrupts the supply and demand balance in existing electricity grids. Therefore, the demand for renewable energy sources is also increasing. The increasing number of EVs is expected to have a negative impact on the power quality of existing conventional grids in the near future. With this rapid increase in EVs, grid integration adds unpredictable large loads to the grid, causing power quality issues such as frequency instability, voltage fluctuations, charging harmonics, and unbalanced loads on the grid. Topologies such as G2V, V2G, V2V, and V2H are being studied to address these negative impacts. As EVs become more widespread, some revisions or changes will be necessary, even if the infrastructure of the countries is sufficient. At this point, minimizing these infrastructure changes, which require very high costs, depends on such management algorithms and the integration of renewable energy sources into charging stations. Therefore, in this study, a feasible model for single-phase energy management in V2G topology is designed. In the designed system, an MG was created for single-phase power flow in V2G topology. This MG includes an EV, a house, and a PV panel. The PV panel charges the EV battery and the EV battery supports the conventional grid. BDC and single-phase grid-connected inverter were designed for this energy flow management. This designed system was simulated and tested for applicability. In the first stage, the EV battery was charged by the PV panel. The buck mode of the BDC was used in this charging process. The EV battery was charged by drawing 13kW of power from the PV panel. The EV battery discharged in the boost mode of the BDC and transferred 10 kW of power to the conventional grid. The EV battery transferred the required power to the conventional grid with a single-phase grid-connected inverter. The filter at the output of the inverter, which is used for harmonics caused by switching elements in the inverters used to connect EVs to the grid, is becoming increasingly important. The LCL filter design was implemented to prevent inverter harmonics from affecting the grid. The THD of the

grid was determined to be 1.28% by FFT analysis. The proposed model is found to be efficient with simulation results. In the designed system, the EV battery is charged by the PV panel and the conventional grid is supported by the EV battery. This system proposes a solution to the power quality problems that may arise in the grid as the number of EVs increases in the future.

Acknowledgment

This study (BAP Project Number: FDK-2023-8335) has been supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit. We would like to thank Gazi University Scientific Research Projects Unit for their support.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] F. Üstünsoy and H.H. Sayan, "Real-time realization of network integration of electric vehicles with a unique balancing strategy," *Electr Eng*, vol 103, 2021, pp. 2647–2660. doi:10.1007/s00202-021-01259-9
- [2] S. Yildiz and H.H. Sayan, "LCL Filter Design and Simulation for Vehicle-To-Grid (V2G) Applications," in *Advances in Intelligent Manufacturing and Service System Informatics, IMSS 2023: Z. Sen et al. (Eds.): LNME*, pp. 347–358, 2024. doi:10.1007/978-981-99-6062-0_32
- [3] F. M. Shakeel and O. P. Malik, "Vehicle-To-Grid Technology in a Micro-grid Using DC Fast Charging Architecture," in *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Edmonton, AB, Canada, 2019, pp. 1-4. doi:10.1109/CCECE.2019.8861592
- [4] S. Adhikary, P. K. Biswas, C. Sain, S. B. Thanikanti and N. I. Nwulu, "Bidirectional converter based on G2V and V2G operation with time of usage-based tariff analysis and monitoring of charging parameters using IoT," in *Energy Reports*, Vol 9, 2023, pp 5404-5419, doi:10.1016/j.egy.2023.04.358
- [5] R. P. Upputuri and B. Subudhi, "A Comprehensive Review and Performance Evaluation of Bidirectional Charger Topologies for V2G/G2V Operations in EV Applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 1, pp. 583-595, March 2024. doi:10.1109/TTE.2023.3289965
- [6] A. B. N. Lingaiah and N. R. Tummuru, "A PV-Utility Integrated Cascaded Interleaved Configuration-Based IPT Charging System for Residential V2G and G2V Applications of EV," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, doi:10.1109/TTE.2023.3338290
- [7] S. Kumar, K. R. Khan, V. L. Srinivas, G. Shankar, R. K. Saket and K. C. Jana, "Electric Vehicle Fast Charging Integrated with Hybrid Renewable Sources for V2G and G2V Operation," in *2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, London, United Kingdom, 2023, pp. 1-6. doi:10.1109/GlobConET56651.2023.10149902
- [8] N. Narasimhulu, M. Awasthy, R. Pérez de Prado, P. B. Divakarachari and N. Himabindu, "Analysis and Impacts of Grid Integrated Photo-Voltaic and Electric Vehicle on Power Quality Issues," *Energies*, 16(2):714, 2023. doi:10.3390/en16020714
- [9] S. Panchanathan, P. Vishnuram, N. Rajamanickam, M. Bajaj, V. Blazek, L. Prokop, S. Misak, "A Comprehensive Review of the Bidirectional Converter Topologies for the Vehicle-to-Grid System," *Energies* 2023; 16(5):2503. doi:10.3390/en16052503
- [10] K. -W. Hu, P. -H. Yi and C. -M. Liaw, "An EV SRM Drive Powered by Battery/Supercapacitor With G2V and V2H/V2G Capabilities," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 4714-4727, Aug. 2015. doi:10.1109/TIE.2015.2396873
- [11] A. Abuelrub, F. Hamed, J. Hedel and H. M. K. Al-Masri, "Feasibility Study for Electric Vehicle Usage in a Microgrid Integrated With Renewable Energy," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 3, pp. 4306-4315, Sept. 2023. doi:10.1109/TTE.2023.3243237
- [12] V. Shah and S. Payami, "Integrated Converter With G2V, V2G, and DC/V2V Charging Capabilities for Switched Reluctance Motor Drive-Train Based EV Application," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 3, pp. 3837-3850, May-June 2023. doi:10.1109/TIA.2023.3242636
- [13] Y. C. Hsu, S. C. Kao, C. Y. Ho, P. H. Jhou, M. Z. Lu and C. M. Liaw, "On an Electric Scooter With G2V/V2H/V2G and Energy Harvesting Functions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 8, pp. 6910-6925, Aug. 2018. doi:10.1109/TPEL.2017.2758642
- [14] R. Zgheib, K. Al-Haddad and I. Kamwa, "V2G, G2V and active filter operation of a bidirectional battery charger for electric vehicles," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Taipei, Taiwan, 2016, pp. 1260-1265. doi:10.1109/ICIT.2016.7474935

- [15] V. Rishishwar and A. Ojha, "Review Analysis of Electric Grid Behaviors having Electric Vehicle charging stations with G2V and V2G Possibilities," in *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-4. doi:10.1109/RESEM57584.2023.10236016
- [16] V. Monteiro, J. G. Pinto and J. L. Afonso, "Operation Modes for the Electric Vehicle in Smart Grids and Smart Homes: Present and Proposed Modes," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 1007-1020, March 2016. doi:10.1109/TVT.2015.2481005
- [17] V. Monteiro et al., "On-board electric vehicle battery charger with enhanced V2H operation mode," in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, USA, 2014, pp. 1636-1642. doi:10.1109/IECON.2014.7048722
- [18] S. Behera, V. R. N. N, A. K. Panda, S. K. Behera, L. Senapati and M. Karthik, "Design and Implementation of a Domestic Off-Board Multifunctional Bidirectional Electric Vehicle Charger," in *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore, 2023, pp. 1-6. doi:10.1109/IECON51785.2023.10311840
- [19] B. Sharma and J. K. Maherchandani, "A Review on Integration of Electric Vehicle in Smart Grid: Operational modes, Issues and Challenges," in *2022 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, 2022, pp. 1-5. doi:10.1109/ICCCI54379.2022.9740940
- [20] X. Guo, J. Li and X. Wang, "Impact of grid and load disturbances on electric vehicle battery in G2V/V2G and V2H mode," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 5406-5410. doi:10.1109/ECCE.2015.7310420
- [21] J. S. Artal-Sevil, V. Ballestín-Bernad, J. Anzola and J. A. Domínguez-Navarro, "High-Gain Non-isolated DC-DC Partial-Power Converter for Automotive Applications," in *2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Gijón, Spain, 2021. pp. 1-6. doi:10.1109/VPPC53923.2021.9699209
- [22] V. Kumar, V. R. Teja, M. Singh, S. Mishra, "PV Based Off-Grid Charging Station for Electric Vehicle," *IFAC-PapersOnLine*, 52(4), pp. 276-281, 2019. doi:10.1016/j.ifacol.2019.08.211
- [23] M. A. Imran Fahim and M. S. Uddin Yusuf, "Energy Management System of a PV-Based Grid-Connected Electric Vehicle in Bangladesh," in *2023 10th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS)*, Cox's Bazar, Bangladesh, 2023, pp. 1-6. doi:10.1109/ICPS60393.2023.10429012
- [24] F. Üstünsoy, S. Yıldız, E. N. Yılmaz, H. H. Sayan, M. Burunkaya, C. Yılmaz, M. Bulut. "Autonomous Operation of Microgrid and Minimization of Fault in Case of Failure in High-Voltage Lines," *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 1371-1377, 2020. doi:10.2339/politeknik.681807
- [25] A. Karanfil, "Pasif seri sönmüleme direncinin LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici üzerine etkisi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 26, sy. 5, ss. 927-934, 2020. doi:10.5505/pajes.2020.99896
- [26] S. L. Rani and V. V. R. Raju, "V2G and G2V Technology in Micro-Grid Using Bidirectional Charger: A Review," in *2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, Raipur, India, 2022, pp. 1-5. doi:10.1109/ICPC2T53885.2022.9777085
- [27] S. Mittal, A. Singh and P. Chittora, "EV Control in G2V and V2G modes using SOGI Controller," in *2022 IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, Bangalore, India, 2022, pp. 1-6. doi:10.1109/GCAT55367.2022.9972182

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

GPU Performance of Alignment Step in Next Generation Sequencing Analysis

Hilal Akarkamçı^a, Gülistan Özdemir Özdoğan^b

Submitted: 05.07.2024 Revised: 20.08.2024 Accepted: 22.08.2024 doi:10.30855/gmbd.0705A17

ABSTRACT

Keywords: CUDA, GPU, Alignment, Next generation sequencing, BarraCUDA

^{a,*} Ankara Yıldırım Beyazıt University, Computer Engineering, 06010 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4787-105X
e mail: kaya.hilal79@gmail.com

^b Ankara Yıldırım Beyazıt University, Computer Engineering, 06010 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8221-8473

*Corresponding author:
kaya.hilal79@gmail.com

As the amount of biological data has increased, it has become difficult to process it effectively. This has brought the discipline of bioinformatics to the forefront and increased the need for the development of relevant tools. A sensitive data analysis process is required to make sense of this large amount of data produced by next generation sequencing technique. The most costly step in this process is the alignment step. One of the most effective techniques to reduce this cost is the use of a graphics processing unit. In this study, the performances of the CPU-based Burrows-Wheeler aligner and the GPU programming version BarraCUDA tools in the alignment step were compared in terms of alignment rates and computation times for different datasets. In the study, total runtime of these tools was also examined, as well as the runtime of the alignment sub-steps when using one or more GPUs. While there is a similarity in the alignment rates of the tools used in each data set, it has been observed that there is a significant time benefit in data of different sizes through GPU supported BarraCUDA. As a result, with the use of GPU in the alignment step, approximately 5 times acceleration was achieved in single-end data and approximately 9 times in paired-end data.

Yeni Nesil Dizileme Analizinde Hizalama Adımının GPU Başarımı

ÖZ

Biyolojik verilerin miktarının artmasıyla birlikte, bu verilerin etkin bir biçimde işlenebilmesi güçleşmiştir. Bu durum, biyoinformatik disiplini ön plana çıkarmış ve ilgili araçların geliştirilmesine olan ihtiyacı artırmıştır. Yeni nesil dizileme tekniği ile üretilen büyük miktardaki verinin anlamlandırılabilmesi için hassas bir veri analizi süreci yürütülmelidir. Bu süreç içerisinde en yüksek maliyetli adım, hizalama adımıdır. Bu maliyeti azaltan en etkili tekniklerden birisi de, grafik işlem biriminin kullanılmasıdır. Bu çalışmada; hizalama adımında CPU ile çalışan Burrows-Wheeler hizalayıcı ve GPU programlama versiyonu olan BarraCUDA araçlarının performansları, farklı veri setleri için hizalama oranları ve hesaplama zamanları açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, bu araçların toplam çalışma zamanlarının yanı sıra, hizalama alt adımlarının bir veya birden fazla GPU kullanıldığında çalışma zamanları da incelenmiştir. Her bir veri setinde kullanılan araçların hizalama oranlarında benzerlik görülmeyle birlikte, GPU destekli BarraCUDA aracılığıyla farklı büyüklükteki verilerde zaman açısından önemli bir yarar sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak, hizalama adımında GPU kullanımı ile tek uçlu verilerde yaklaşık 5 kat, çift uçlu verilerde ise yaklaşık 9 kat hızlanma elde edilmiştir.

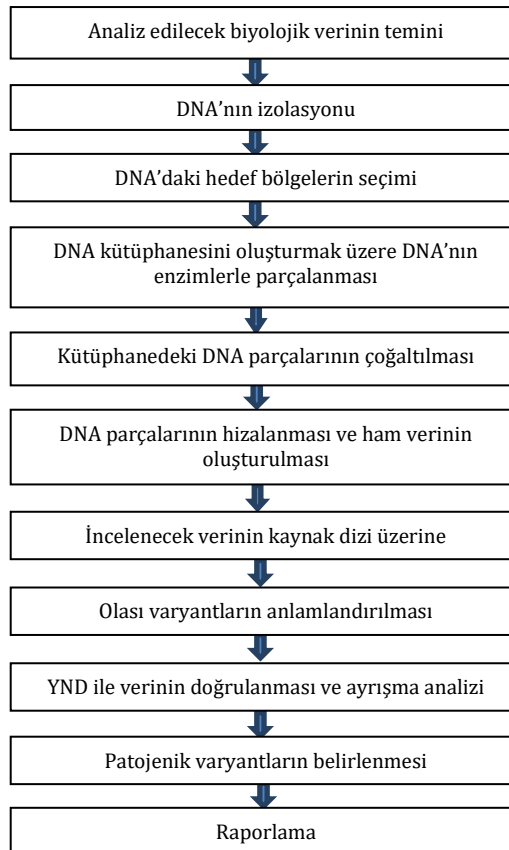
Anahtar Kelimeler: CUDA, GPU, Hizalama, Yeni nesil dizileme, BarraCUDA

1. Giriş (Introduction)

Genom çalışmalarında, insanda bulunan genlerin tümünün haritalandırılmasını ve anlaşılmasını amaçlayan İnsan Genom Projesi (İGP) önemli bir yere sahiptir. Bu projeye insan genomu üzerindeki baz çiftlerinin diziliminin anlaşılması ve genlerin tanımlanması hedeflenmiştir. İGP Projesinin tamamlanması; kanserin sebepleri, genetik rahatsızlıkların tanı ve tedavisi, yeni ilaçların üretilmesi, genlerin fonksiyonelliğinin araştırılması ve biyoinformatik disiplininin gelişmesi gibi konularda büyük gelişmelere yol açmıştır [1]. Diğer taraftan, 1990 yılında başlayıp 2003 yılında tamamlanan İGP, hem zaman hem de bütçesi itibarıyla tarihin en yüksek maliyetli projelerinden birisi olmuştur. Bu projedekine benzer ancak daha düşük maliyetli yeni bir yaklaşımın geliştirilmesi amacıyla, 2004 yılında Ulusal İnsan Genomu Araştırma Enstitüsü tarafından yeni bir proje başlatılmıştır. Bu yeni proje ile geliştirilen teknoloji, DNA/RNA'nın paralel olarak dizilenmesi esasına dayandığından, Yeni Nesil Dizileme (YND), Masif Paralel Dizileme (MPD) ya da İkinci Nesil Dizileme (İND) olarak isimlendirilmiştir.

YND teknolojisine göre okumalar, DNA'nın birden fazla parçaya ayrılması ile üretilen verinin üzerinde çeşitli analizler yapılarak anlamlandırılır [2]. YND veri analizi olarak bilinen bu süreç, Şekil 1'de detaylıca gösterilmekte olup temel olarak kalite değerlendirmesi, hizalama, varyant çağırma, varyantı anlamlandırma ve görselleştirme adımlarından oluşur.

Bu adımların arasında en yüksek maliyetli olan, üst üste gelen çok sayıda küçük dizi parçacığının birleştirilerek orijinal dizinin elde edildiği hizalama adımıdır. Bu adımın maliyetini azaltabilmek için farklı teknolojileri kullanan araçlar geliştirilmiştir. Bu araçlara verilecek örneklerin başında, Grafik İşlem Birimi (GPU) gelir. GPU, aynı anda çok sayıda iş parçacığını çalıştırabilmesi sayesinde hizalama adımı tercih edilen bir araç olmuştur [3,-5]. OpenCL [6], UPC++ [7], MIC [8] hizalamada kullanılan diğer araçlara verilebilecek örneklerdendir.



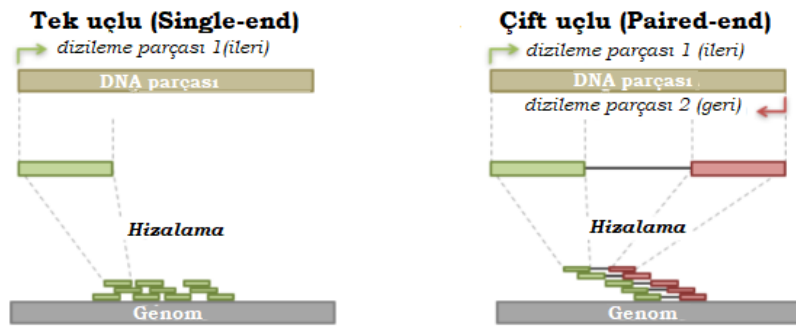
Şekil 1. YND (Yeni Nesil Dizileme)'nin iş akışı şeması
(Workflow diagram of NGS (Next Generation Sequencing))

Önceki yıllarda GPU kartlarına kolayca ulaşılamadığından dolayı bu yönde geliştirilen araç ve metotların biyoinformatik alanında çalışanlar tarafından pek kullanılmadığı belirtilse de [9], GPU'nun

daha kolay ulaşılabilir hale gelmesi, GPU ile geliştirilen hizalama araçlarının daha fazla araştırmacı tarafından kullanılmasını sağlamıştır. GPU için geliştirilen hizalama araçlarından bazıları; BarraCUDA [10], SOAP3-dp [11], CUSHAW2-GPU [12] ve nvBowtie [13] 'dir. Çeşitli araştırmalarda [14,15,4], GPU destekli hizalama araçlarının performansları incelenerek araştırmacılara farklı bir bakış açısı sunmaya çalışılırken, YND veri analizinde hangi aracın en etkili olduğunu belirtmek mümkün olmamaktadır.

Birçok yüksek verimli dizileme çalışmasında, çift uçlu (ÇU) DNA verisi üretilir. Çift uçlu okumalar, tek uçlu (TU) verilere göre çeşitli avantajlar sağlamakla birlikte, tek uçlu DNA okuma işlem akışında küçük değişikliklerle elde edilebilirler. Çift uçlu DNA okuma işlemi, kısa okumaların referans genomuna güvenilir şekilde eşlenmesinde ve yapısal varyasyonların aşağı akış (downstream) analizlerinde kolaylık sağlayan ekstra konumsal bilgiyi içermeye avantajına sahiptir [16,17].

Sunulan bu çalışma kapsamında, hizalama araçlarından birisi olan BWA [18,19] ve GPU versiyonu olan BarraCUDA[10] üzerinde durulacaktır. BarraCUDA'da, GPU'nun sağladığı süre avantajı, CPU versiyonuna benzer hizalama oranı ve birden fazla GPU ile çalışabilme özelliği bulunmaktadır. Buna göre; çalışma kapsamında, BWA ve BarraCUDA, Şekil 2'de analizi görülen tek uçlu ve çift uçlu farklı okuma uzunluklarına sahip gerçek veriler üzerinde çalıştırılmıştır. Ayrıca, bu araçların hizalama oranlarının ve çalışma zamanlarının karşılaştırılmasıyla birlikte GPU'nun sağladığı avantajlar incelenmiştir.



Şekil 2. Tek uçlu ve çift uçlu verilerin analizi
(Analysis of single-end and paired-end data)

Bu çalışmanın amacı, GPU aracının performansının farklı özelliklere sahip veriler üzerinde izlenmesi ve toplam çalışma zamanına ek olarak, hizalama alt adımlarının çalışma zamanlarının da ayrı ayrı incelenerek performanslarının karşılaştırılmasıdır. BarraCUDA üzerine yayınlanan temel makalede [10], hizalama alt araçları tek bir GPU üzerinde incelenirken, bu çalışmada hizalama araçlarının birden fazla GPU üzerindeki başarımları da incelenerek sonuçları paylaşılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Materials and Methods)

YND'de, çalışılan genomun çok sayıda küçük parçaya ayrılarak bir sıralayıcı cihazı ile çeşitli adımlardan geçirilmesiyle bu parçalara ait nükleotid (Adenin-A, Sitozin-C, Guanin-G, Timin-T) dizileri belirlenir. Her bir parçaya ait A, C, G, T bazlarından oluşan nükleotid dizisine okuma denir. Her bir okuma, baz çifti anlamına gelen bp ile ifade edilir. Okuma uzunluğu, kullanılan dizileme platformuna bağlıdır. Sıklıkla kullanılan YND platformları Illumina ve IonTorrent'tir.

Hizalama, çalışılan genoma ait YND ile üretilmiş çok sayıda okumanın birleştirilerek bu genomun DNA diziliminin belirlenmesi sürecidir. İnsanda olduğu gibi karmaşık genomların hizalanmasında, çalışılan genom için kabul görmüş bir referans genoma ihtiyaç duyulur. Hizalama işlemi, YND veri analizi içinde en temel adımdır ve bu sürecin doğru, verimli ve aynı zamanda hızlı olabilmesi, veri analizinin diğer adımları için son derece önemlidir. Ancak, YND ile üretilen çok sayıda okumanın referans genoma eşleştirilmesi zor bir süreçtir. Bunda, okumaların uzunluğunun kısa olması bir etmenddir. Diğer bir etmen ise, çalışılan genom üzerinde varyant denilen farklılıkların bulunmasıdır [20]. Ayrıca, okumaların olası başlangıç konumlarının belirlenmesi yoğun hesaplama gerektiren bir süreçtir [6].

Kısa okumaların dizilenmesi için kullanılan hizalama algoritmaları, kullandıkları indeksin oluşturulma şekline göre hash tablosu ve sonek ağacı kullananlar olmak üzere ikiye ayrılır [1,2]. Bunların ilki, daha yavaş ve hassas çalışırken, ikincisi hafızayı daha etkin kullanarak daha hızlı çalışır. Hizalama algoritmaları içinde en bilinen ve sıklıkla kullanılan BWA algoritması, sonek dizisini Burrows-Wheeler

Transform (BWT) ile birleştiren bir indeks yapısı olan FM-index kullanır. BWA'nın hizalama süreci, okuma uzunluğuna göre üç farklı algoritmadan oluşur. Bunlar, 100 bp uzunluğuna kadar olan okumalar için 'backtrack', daha uzun okumalar için geliştirilen 'SW' ve 'mem' algoritmalarıdır. 'backtrack' algoritması, 'aln' ve 'samse/sampe' olmak üzere iki alt adımdan oluşur. 'aln' ile okumaların sonek dizisindeki koordinatları belirlenirken, 'samse/sampe' ile de bu koordinatların referans genom üzerinde dönüşümleri yapılarak standartlaşmış bir metin dosyası olan SAM formatında yazdırılır. Burada, çalışılan genoma ait dizinin tek uçtan ya da her iki uçtan okunmasına bağlı olarak kullanılan algoritma 'samse' ya da 'sampe' olarak değişir.

GPU, sahip olduğu çok sayıda çekirdek ile aynı anda birçok işi bir arada yürütebilen ve bu yönüyle paralel işlemler için uygun olan bir işlemci birimidir. CPU ile karşılaştırıldığında, daha yüksek bir verimlilik, yüksek hızlanma oranları ve düşük bellek gecikmesi gibi avantajlar sağlamaktadır [20]. GPU'nun sağladığı yüksek hızlanma oranının temel sebebi, tekli işlem çoklu veri hesaplama modeli ile aynı komutun işlemci üzerinde bulunan çok sayıda iş parçacığı ile paralel olarak çalıştırılmasıdır. CUDA ise, NVIDIA tarafından sunulan GPU programlamada kullanılan bir hesaplama platformudur. GPU öncelikle grafik işleme için kullanılsa da, zamanla yoğun hesaplama içeren diğer problemlerde de kullanılmaya başlanmıştır. Genel amaçlı GPU (GPGPU) programlama olarak bilinen bu yaklaşımın yaygınlaşmasında, GPU maliyetlerinin düşmesi ve NVIDIA'nın CUDA platformu gibi çeşitli paralel hesaplama platformlarının geliştirilmesi etkili olmuştur. Bir CUDA programı iki bileşenden oluşur [21]. Sunucu adı verilen kısım, CPU üzerinde çalışan kısımdır. Diğerisi ise, kernel denilen daha küçük, ama hesaplama işini üstlenen ve GPU üzerinde çalışan kısımdır. 'kernel' çalıştırılırken ihtiyaç duyulan veri, önce GPU'nun belleğine kopyalanmalıdır. Çıktı verileri de, GPU'nun belleğinden CPU'ya yüklenir.

BarraCUDA, BWA algoritmasına dayalı bir GPGPU dizi hizalama aracıdır. Her bir okumanın referans genoma hizalanması diğer okumalardan bağımsız bir süreç olduğundan [6], BarraCUDA burada verinin paralelleştirilmesi yaklaşımını kullanır. Temelde şu şekilde çalışır: İlk olarak, hizalama adımının girdi verileri olan indekslenen referans genom ve okumalar, diskten GPU'nun belleğine yüklenir. Daha sonra, bir GPU kerneli oluşturularak, okumaların GPU üzerindeki işlemcilerle dağıtılmasıyla hizalama sürecinin paralel olarak gerçekleştirilmesi sağlanır. 'kernel' tamamlandığında ise, hizalama sonuçları GPU'dan diske aktarılır [10].

BarraCUDA aracının doğruluk ve hız açısından performansı, CPU üzerinde iş parçacığı ile çalışan BWA versiyonu ile karşılaştırılmıştır [10]. İlgili çalışmada, BWA ile benzer bir hizalama oranına sahip olduğu belirtilmiş ve hız açısından da incelendiğinde, tek GPU ile elde edilen verimin 6 iş parçacığı kullanılarak 'aln' adımıyla elde edilen verime eşdeğer olduğu paylaşılmıştır. Birden fazla GPU kullanımının da CPU'dan daha iyi ölçeklenebilirlik sağladığı belirtilmiştir.

2.1. Veri setleri (Datasets)

Tek uçlu dizileme, genellikle çift uçlu dizilemeye kıyasla daha kısa okuma uzunlukları üretir. Yapılacak analiz için uzun okumalara ihtiyaç olduğunda veya hedef bölgenin tekrarlayan diziler içermesi durumunda, belirsizlikleri çözme ve okumaları doğru şekilde hizalama yeteneği nedeniyle çift uçlu dizileme verisi, tek uçlu dizilemeye göre daha avantajlı olabilir [22].

Sunulan çalışmada, farklı özelliklerde 12 gerçek veri seti kullanılmıştır. Veriler ve verilere ait özellikler Tablo 1'de sunulmuştur. Veri setleri, 35, 36, 37, 51, 65, 76, 100 ve 101 olmak üzere farklı okuma uzunluklarına sahiptir. Bunun yanı sıra, Tablo 1'de görüldüğü gibi, her verinin okuma sayısı da farklıdır ve ÇU veriler için toplam okuma sayısı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler, NCBI'nin SRA veri deposundan veri indirmek için kullanılan "fastq-dump 2.9.0" aracı ile indirilmiştir.

Verilerin seçiminde, Illumina platformu tarafından dizilen DNA verisi olmaları, farklı okuma sayısı ve okuma uzunluklarına sahip olmaları dikkate alınmıştır. Bunlar dışında, BarraCUDA aracı geliştirilirken 1 GPU için kullanılan ERR003014 ve SRR032215 etiketli iki verinin 2 GPU'daki yaklaşımını inceleyebilmek adına bu iki veri de çalışmaya eklenmiştir. Ayrıca, CUDA tabanlı geliştirilen hizalama araçlarından olan Cushaw, CUSHAW2-GPU ve nvBowtie araçlarının test edildiği ERR000589, SRR211279 ve ERR161544 verileri de çalışmaya eklenerek BarraCUDA üzerindeki performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı sayıda GPU kullanımının performansını inceleyebilmek için, literatür araştırmasında ulaşılabilen tek uçlu veriler kullanılmıştır. SRR622457 gibi diğer verilere kıyasla daha büyük bir veri de çalışmaya eklenerek hesaplama ortamının disk alanı, hafıza, her bir yürütme için atanan süre gibi kaynaklarının imkân verdiği ölçüde bu verinin de performansı incelenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan veri setlerinin özellikleri (Properties of the used datasets)

Veri adı	Kısaltma	TU/ÇU	Okuma uzunluğu (bp)	Toplam okuma sayısı
<i>SRR070994</i>	VS1	TU	35	6810249
<i>SRR071052</i>	VS2	TU	36	7853651
<i>SRR10696340</i>	VS3	TU	51	8448534
<i>SRR5559128</i>	VS4	TU	65	16821658
<i>ERR003014</i>	VS5	ÇU	37	22673582
<i>ERR000589</i>	VS6	ÇU	51	4279572
<i>SRR032215</i>	VS7	ÇU	76	28291390
<i>SRR211279</i>	VS8	ÇU	100	50937050
<i>ERR251661</i>	VS9	ÇU	100	96723198
<i>ERR161544</i>	VS10	ÇU	100	148223280
<i>SRR622461</i>	VS11	ÇU	101	184918908
<i>SRR622457</i>	VS12	ÇU	101	2873647546

2.2. Analiz (Analysis)

Her bir veri seti, hem CPU hem GPU üzerinde test edilmiştir. CPU üzerindeki yürütmeler BWA 0.7.17 aracı ile 20 adet çift çekirdeğe sahip makineler üzerinde; GPU üzerindeki yürütmeler ise, BarraCUDA 0.7.0r107 aracı ile Nvidia P100 GPU kartları üzerinde gerçekleştirilmiştir. BWA, CPU üzerinde çalıştırılırken farklı sayıda iş parçacığı (1, 8, 16, 24, 32, 40), BarraCUDA'da ise farklı sayıda GPU (1, 2, 3, 4) kullanılmıştır.

Analizler sırasında kullanılan referans insan genomu hg38, diğer bir ifadeyle GRCh38 genomudur. Hizalama için öncelikle referans genomun indekslenmesi gerekir. İndeks oluşturma süreci, BWA ve BarraCUDA için ayrı olmak üzere, bir kez çalıştırılmış olup, bu süreç sonuçlara katılmamıştır. Hizalama sürecinin iki alt adımda gerçekleştiğinden ve verinin TU ya da ÇU olmasına bağlı olarak 'samse' ya da 'aln' adımları kullanıldığından Bölüm 2'de bahsedilmiştir. BWA aracının çalışma prensibine göre, 'aln' adımı farklı sayıda iş parçacıkları ile çalıştırılabilirken, 'samse/sampe' adımı, birden fazla iş parçacığı desteklenmemektedir. BarraCUDA aracında ise, 'aln' adımı GPU kullanılabilirken, sadece 'sampe' adımı, BWA aracından farklı olarak, birden fazla iş parçacığı kullanılabilir. BarraCUDA, TU verilerinde istenilen sayıda GPU'yu, ÇU verilerinde ise 1 GPU ya da her bir veri bir GPU üzerinde olmak üzere 2 GPU'yu desteklemektedir.

Analizler sırasında çalışma zamanı olarak 'aln' ve 'samse/sampe' adımlarının çalışma zamanlarının toplamı alınmıştır. Her yürütme üç kez tekrarlanarak sonuçların ortalaması alınmıştır. BWA aracında kullanılan iş parçacığı sayısı, BarraCUDA'da ise kullanılan GPU sayısı dışında diğer parametreler için varsayılan değerler kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Yapılan analizler sonrasında TU ve ÇU verilere dair elde edilen sonuçlar, Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur. Buna göre, hem TU hem de ÇU verilerde CPU ve GPU üzerinde beklenildiği gibi [10] birbirine çok yakın hizalama oranlarının elde edildiği görülmüştür. Çalışma zamanları incelendiğinde ise, TU verilerde BWA aracı ile farklı iş parçacıklarında çalışma zamanının azaldığı görülürken, BarraCUDA ile de farklı sayıda GPU kullanıldığında çalışma zamanının azaldığı görülmektedir.

Sistemdeki GPU sayısı arttıkça, çalışma zamanı da azalmaya devam etmektedir. Çalışma kapsamında ulaşılabilen TU veriler nispeten daha küçük veriler olup, ilerleyen çalışmamızda BarraCUDA'nın daha büyük TU verileri üzerindeki performansı da incelendiğinde, GPU sayısının artırılmasının benzer şekilde çalışma zamanında azalma sağlanması beklenmektedir.

Tablo 2. Tek uçlu verilerin analiz sonuçları (Analysis results of single-end data)

Veri Seti	BWA		BWA						BarraCUDA			
	Hizalama Oranı (%)	Hizalama Oranı (%)	1İP	8İP	16İP	24İP	32İP	40İP	1GPU	2GPU	3GPU	4GPU
	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)
<i>SRR070994</i>	97,68	97,46	26,24	3,96	2,61	2,37	2,31	2,28	1,88	1,00	0,71	0,58
<i>SRR071052</i>	93,62	93,38	16,71	4,12	2,84	2,85	2,70	2,65	2,19	1,14	0,81	0,63
<i>SRR10696340</i>	97,96	97,63	24,76	7,31	3,74	3,51	3,30	3,22	2,36	1,24	0,87	0,68
<i>SRR5559128</i>	98,13	97,71	69,44	11,91	8,97	7,72	7,26	6,93	5,45	2,63	1,81	1,41

Tablo 3'te görülen ÇU veriler incelendiğinde de benzer bir durum görülmekte olup, bu verilerin daha fazla okuma sayısına ve okuma uzunluğuna sahip olması nedeni ile burada çalışma zamanlarında ciddi bir azalış gözlemlenmektedir. CPU kullanımında maksimum İP sayısı ile elde edilen çalışma zamanı, SRR622457 etiketli büyük veride tek bir GPU kullanımında %54 oranında azalmaktadır. Bu oranın, verinin boyutu küçüldükçe arttığı görülmektedir. Dolayısıyla, veri büyüklüğü arttıkça azalmanın devam etmesi beklenir.

Tablo 3. Çift uçlu verilerin analiz sonuçları (Analysis results of paired-end data)

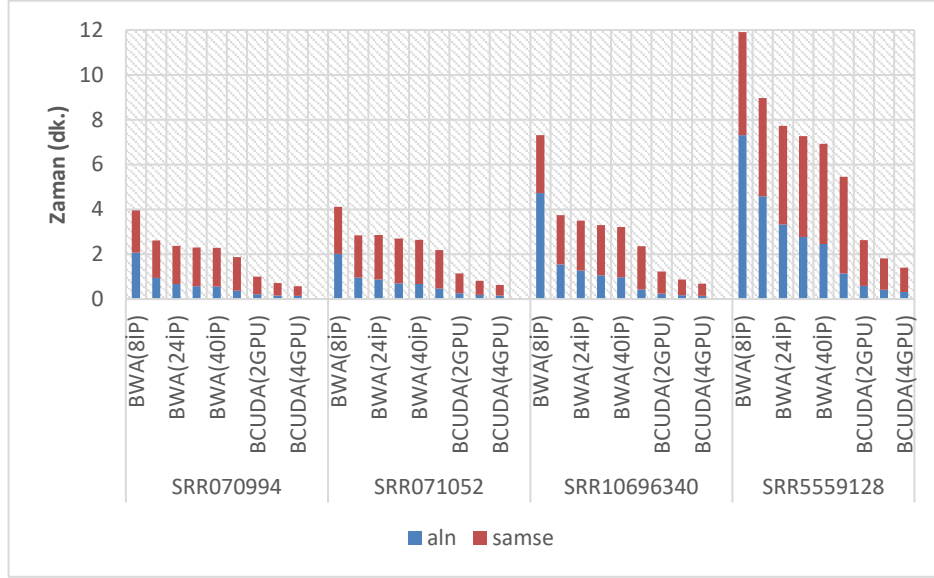
Veri Seti	BWA		BWA						BarraCUDA	
	Hizalama Oranı (%)	Hizalama Oranı (%)	1İP	8İP	16İP	24İP	32İP	40İP	1GPU	2GPU
	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)	Zaman (dk.)
<i>ERR003014</i>	94,93	96,17	82,21	51,11	45,38	44,70	44,57	44,12	6,86	4,77
<i>ERR000589</i>	97,83	97,94	116,25	50,81	43,12	41,80	40,93	40,56	5,92	5,08
<i>SRR032215</i>	88,94	89,05	146,99	40,32	29,53	26,86	25,22	24,57	6,64	6,16
<i>SRR211279</i>	97,67	97,61	301,66	87,45	53,47	46,87	43,58	41,45	14,03	12,50
<i>ERR251661</i>	96,01	96,04	820,89	206,71	118,63	101,73	93,39	88,65	34,46	27,72
<i>ERR161544</i>	98	97,89	829,59	206,78	151,77	133,54	124,52	120,08	49,48	40,53
<i>SRR622461</i>	89,66	89,7	1037,53	232,93	170,70	146,73	135,45	128,02	56,07	48,33
<i>SRR622457</i>	89,75	89,81	16600,01	4193,25	2535,65	2139,22	1951,12	1911,53	880,45	779,76

Çalışma kapsamında, hizalama alt araçları olan 'aln' ve 'samse/sampe' adınının detaylı zaman analizleri yapılmıştır. Buna göre, TU verilerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3'te sunulmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, BWA aracında 'aln' adımı birden fazla iş parçacığı ile çalıştırıldığından çalışma zamanlarının azaldığı Şekil 3'te mavi renkli olarak, 'samse' adınının ise birden fazla iş parçacığını desteklememesi sebebi ile çalışma zamanlarının sabit kaldığı Şekil 3'te kırmızı renkli olarak görülmektedir. BarraCUDA'nın sonuçları incelendiğinde, 'aln' adımında tek bir GPU'nun katkısının bile maksimum iş parçacığından elde edilen sonuçtan daha iyi olduğu görülmektedir. GPU sayısı arttığında ise, çalışma zamanındaki azalma devam etmektedir.

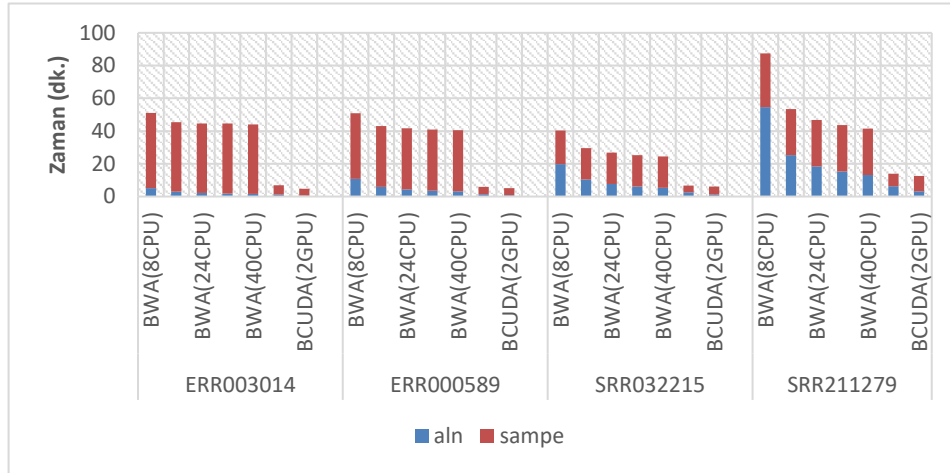
BarraCUDA'nın 'samse' adımında, GPU sayısı kadar bölümlenen verinin aynı sayıda CPU üzerinde çalışmasıyla, Şekil 3'te kırmızı renkli olarak gösterildiği gibi zamanda kısmi bir azalış olduğu anlaşılmaktadır.

Hizalama alt araçlarının ÇU verilerdeki sonuçları ise verilerin büyüklüğü ve ölçeklendirme göz önüne alınarak sırasıyla Şekil 4a, Şekil 4b ve Şekil 4c'de sunulmaktadır. Buna göre Şekil 4a, Şekil 4b ve Şekil 4c'de, BWA sonuçlarında yine 'aln' adımında farklı iş parçacıklarının çalışma zamanını azalttığı mavi renkli olarak, CPU üzerinde yürütülen 'sampe' adınının süresinin ise her iş parçacığı için aynı olduğu kırmızı renkli olarak görülmektedir. BarraCUDA'da 'aln' adımında maksimum iki GPU kullanılmıştır. 'aln' adımı incelendiğinde, her iki grafikte de GPU kullanımının maksimum iş parçacığı ile elde edilen çalışma zamanını azalttığı ve bu azalışın iki GPU kullanımında da devam ettiği gözlemlenmektedir.

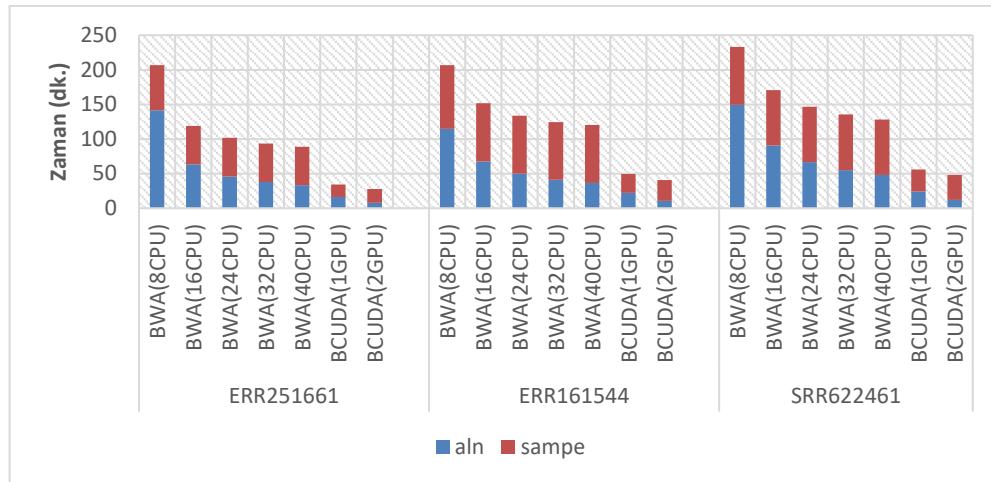
BarraCUDA'ya 'sampe' adımıyla BWA'dan farklı olarak iş parçacığı desteği eklendiğinden, Şekil 4a, Şekil 4b ve Şekil 4c'de kırmızı renkli olarak ifade edildiği haliyle, 'sampe' adımının süresinin CPU versiyonuna göre hayli azaldığı görülmektedir.



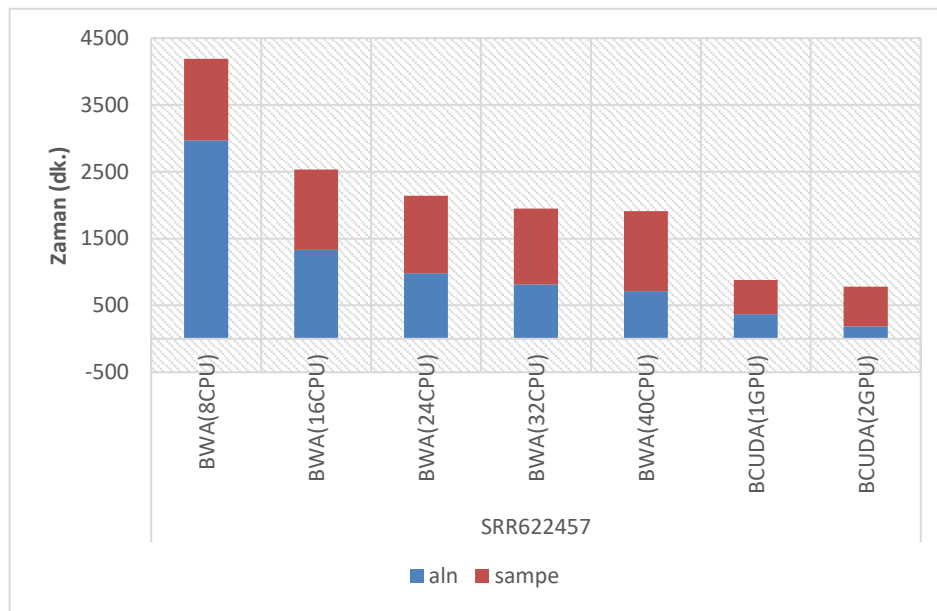
Şekil 3. Tek uçlu verilerin çalışma zamanı grafiği
(Runtime graph of single-end data)



Şekil 4 (a). Çift uçlu verilerin çalışma zamanı grafiği - 1 (ERR003014, ERR000589, SRR032215, SRR211279)
(Runtime graph of paired-end data- 1 (ERR003014, ERR000589, SRR032215, SRR211279))

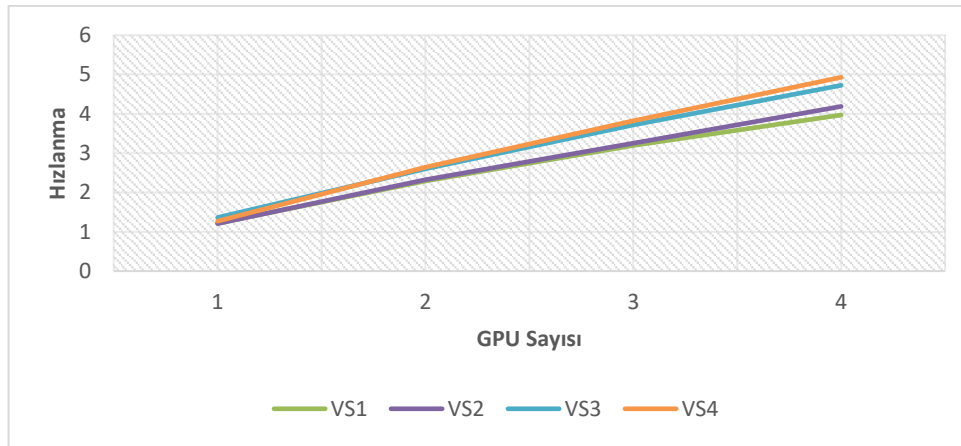


Şekil 4 (b). Çift uçlu verilerin çalışma zamanı grafiği - 2 (ERR251661, ERR161544, SRR622461)
(Runtime graph of paired-end data - 2 (ERR251661, ERR161544, SRR622461))

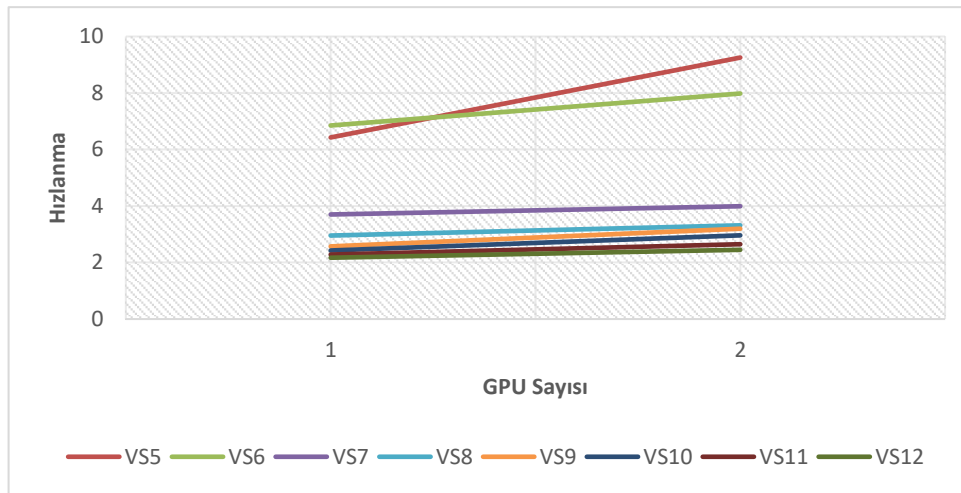


Şekil 4 (c). Çift uçlu verilerin çalışma zamanı grafiği - 3 (SRR622457)
(Runtime graph of paired-end data - 3 (SRR622457))

Hızalama sürecinin maliyetli ve verilerin büyük olmasından dolayı burada elde edilen sayıların nicel değerinin önemi olması ile birlikte, GPU kullanımının gerçekte ne kadar bir katkı sağladığını gösterebilmek adına Şekil 5(a) ve Şekil 5(b)'de hızlanma grafikleri de incelenmiştir. Bunun için, sistemdeki maksimum iş parçacığı sayısı olan 40 iş parçacığının çalışma zamanı referans alınmıştır. Buna göre, maksimum 4 GPU kullanılan TU verilere ilişkin hızlanma grafiği Şekil 5a'da sunulmaktadır. Beklenildiği gibi, GPU kullanımı ile hızlanmadaki artışın, doğrusal bir davranış gösterdiği görülmektedir. Tek GPU kullanımındaki veriler için 1,2-1,4 kat bir artış görülürken, sistemdeki maksimum 4 GPU kullanımında 4-5 kat civarında bir hızlanma olduğu belirlenmiştir. Maksimum 2 GPU kullanılan ÇU verilere ilişkin hızlanma grafiği ise Şekil 5b'de sunulmaktadır. Şekil 5b incelendiğinde, ÇU verilere ilişkin hızlanma grafiğindeki küçük veriler üzerinde 1 GPU kullanıldığında yaklaşık 6-7 kat oranında hızlanma görülürken, bu hızlanma 2 GPU'da 8-9 kat civarında olmaktadır. Sistemde çalışılan en büyük verinin hızlanması incelendiğinde, 1 GPU'da 2 kat olan hızlanmanın, 2 GPU ile 2,5 kata kadar çıktığı görülmektedir.



Şekil 5 (a). Tek uçlu verilerin hızlanma grafiği
(Speedup graph of single-end data)



Şekil 5 (b). Çift uçlu verilerin hızlanma grafiği
(Speedup graph of paired-end data)

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Yeni nesil dizileme ile elde edilen büyük miktarda verinin analizinde en maliyetli adım olan hizalama sürecindeki bu hesaplama maliyetini azaltabilmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada, literatürde kabul gören BWA ve onun CUDA ile geliştirilmiş versiyonu olan BarraCUDA araçlarına yönelik hizalama oranları ve hesaplama zamanları karşılaştırması sunulmaktadır. CPU üzerinde çalışan BWA aracı ile GPU üzerinde çalışan BarraCUDA aracının farklı özellikteki veri setleri üzerindeki çalışma performansları incelenerek GPU kullanımının hizalama sürecine maliyet açısından katkısı incelenmiştir. Literatürdeki diğer CUDA araçlarının test edildiği veri setleri de dâhil edilerek, farklı verilerde BarraCUDA aracının performansı incelenerek sonuçları analiz edilmiştir. Buna göre, BarraCUDA'nın BWA ile beklenildiği gibi benzer bir hizalama oranına sahip olması yanında, çalışma zamanında ciddi bir azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Literatürde GPU kullanan hizalama araçları incelendiğinde çoğu çalışmada, zaman analizinde sadece toplam çalışma zamanı ele alınmıştır. Bu çalışma ile toplam çalışma zamanına ek olarak, bir ve birden fazla GPU üzerinde hizalama alt adımlarının ayrı ayrı zaman analizleri de sunulmuştur.

Tek uçlu ve çift uçlu veriler üzerinde gerçekleştirilmiş çalışmada [23], gen düzeyinde okuma analizi için maliyet etkin bir yaklaşım arayan araştırmacılara, daha uzun tek uçlu bir okuma verisi yerine kısa çift uçlu verileri tercih etmeleri tavsiye edilmiştir.

Görüntü işleme benzeri veri işleme kapasitesi yüksek görevleri paralel hale getirmeye yardımcı olmak için genel amaçlı CPU'larla karşılaştırıldığında, GPU'lar uzmanlaşmış tekli işlem çoklu veri mimarisi yönünde gelişme sağlamış olup, CPU'lardan daha basit işlem çekirdekleri bulunmaktadır. Örneğin,

daha basit kontrol mantığına, genellikle dallanma tahmini veya ön getirme ve küçük çekirdekli belleğe sahiptirler. Daha basit bilgi işlem çekirdekleri, GPU'ların bir çipe genel amaçlı bir CPU'dan çok daha fazla çekirdek sığdırmasına olanak tanır. GPU mimarileri, dallanma koşulu az olan veya veri bağımlılığı olmayan iş yüklerinde son derece iyi performans gösterir. Ek olarak, GPU mimarilerinde, bellek yapıları yüksek hızlı veri akışını desteklemek üzere özelleştirilmiştir [24].

Gen dizilimi çalışmaları da uzun okumalar içeren, yüksek veri işleme kapasitesine sahip uygulamalardır. Geleneksel CPU tabanlı yöntemler, genom dizilerinin artan hacmi ve karmaşıklığıyla mücadele eder ve bu da veri işleme ve analizinde önemli gecikmelere yol açar [25]. COVID-19 pandemisinin yakın zamanda gösterdiği gibi, insanlar arasında bulaşıcı olan hastalıkların bulaşma modellerini anlamlandırmak için, büyük ölçekli patojen genomik verilerin analizi hayati öneme sahiptir. Ham dizi verilerini analize hazır varyantlara işlemek için kullanılan mevcut yöntemler ölçek açısından yeterince performanslı sonuçlar vermemektedir ve hastalık kontrolü için hızlı gözetim çabalarını ve epidemiyolojik araştırmaları yavaşlatmaktadır [26]. Gerçek hayatta hızlı çözümler üretilmesi gereken geniş pandemik süreçlerde, hızlı çözüm üretmek açısından GPU hızlandırılmalı genomik çalışmaların başarılı sonuçlar vermesi hayati önem arz etmektedir.

GPU katkısının daha açık anlaşılabilmesi için geliştirdiğimiz çalışmadaki hızlanma değerleri incelendiğinde, tek uçlu verilerde hızlanma değerlerinin 5 kata kadar, çift uçlu verilerde ise 9 kata kadar çıktığı görülmüştür. GPU sayısına göre doğrusal bir davranış gösteren hızlanma artışı görülmektedir. Çalışmanın genel olarak literatürle uyumlu sonuçlar vermesi, ayrıca önceki çalışmalardan farklı olarak birden fazla GPU üzerinde denenmesinin çalışma zamanında azalma sağlaması, farklı tür veriler üzerindeki dizi hizalamasında GPU kullanımını teşvik edici niteliktedir.

Elde edilen doğrusal hızlanma davranışı ile sonraki çalışmalarda, daha fazla okuma sayısına sahip tek uçlu ve çift uçlu veriler de GPU katkısı ile araştırılabilecektir. Çalışmada oluşturulan ardışık düzen, açık bir kütüphane olarak diğer araştırmacılarla paylaşılabilir. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen deneyimlerle ilerleyen çalışmalarda, bulaşıcı hastalıkların genetik nedenlerinin anlaşılmasına yardımcı olmak üzere farklı veri setleri ve vaka çalışmaları üzerinde genomik varyantların anlamlandırılması konusunda GPU hızlandırılmalı hesaplama çalışmaları gerçekleştirilebilecektir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu araştırmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] G. Özdemir Özdoğan, "Retinoblastom hastalığında yeni nesil dizileme veri analizi ile bir ardışık düzenin geliştirilmesi (Development of a pipeline with next-generation sequencing data analysis in retinoblastoma disease)," Ph.D. dissertation. Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Türkiye, 2020.
- [2] G. Özdemir Özdoğan and H. Kaya, "Next-generation sequencing data analysis on pool-seq and low-coverage retinoblastoma data," *Interdisciplinary Sciences, Computational Life Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 302–310, Sep. 2020. doi:10.1007/s12539-020-00374-8
- [3] M. Nobile, P. Cazzaniga, A. Tangherloni, and D. Besozzi, "Graphics processing units in bioinformatics, computational biology and systems biology," *Brief Bioinform.*, vol. 18, no. 5, pp. 870–885, Sep. 2017. doi:10.1093/bib/bbw058
- [4] S. Pawar, A. Stanam, and Y. Zhu, "Evaluating the computing efficiencies (specificity and sensitivity) of graphics processing unit (GPU)-accelerated DNA sequence alignment tools against central processing unit (CPU) alignment tool," *Journal of Bioinformatics and Sequence Analysis*, vol. 9, no. 2, pp. 10–14, July 2018. doi:10.5897/JBSA2018.0109
- [5] Y. Liu, J.-Y. Li, Y.-Q. Mao, X.-L. Wang and D.-S. Zhao, "A literature evaluation of CUDA compatible sequence aligners," in *Proceedings of the International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms (Bioinformatics-2013)*, P. Fernandes, J. Solé-Casals, A. L. N. Fred, and H. Gamboa, Eds. Spain: Scitepress, Feb. 2013, pp. 268–271. [Online]. Available: <https://dblp.org/db/conf/biostec/bioinformatics2013.html>. [Accessed: April 19, 2023].

- [6] X. Zhao, C. Liu, and G. Tan, "Implementation of short read alignment algorithm in OpenCL on Xeon Phi coprocessor," in *IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications*, HPCC 2015. New York, NY, USA, Aug. 24-26, 2015, IEEE, 2015, pp. 1633-1636. [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7336403>. [Accessed: May 20, 2023].
- [7] J. González-Domínguez, Y. Liu and B. Schmidt, "Parallel and scalable short-read alignment on multi-core clusters using UPC++," *PLoS One*, vol. 11, no. 1, Jan. 2016. doi:10.1371/journal.pone.0145490
- [8] R. Luo, J. Cheung, E. Wu, H. Wang, S.-H. Chan, W.-C. Law and G. He, "MICA: A fast short-read aligner that takes full advantage of Many Integrated Core Architecture (MIC)," *BMC Bioinformatics*, vol. 16, no. 7, p. S10, Apr. 2015. doi:10.1186/1471-2105-16-S7-S10
- [9] P. Liu, A. Hemani, K. Paul, C. Weis, M. Jung and N. Wehn, "3D-Stacked many-core architecture for biological sequence analysis problems," *Int J. Parallel Prog.*, vol. 45, pp. 1420-1460, Apr. 2017. doi:10.1007/s10766-017-0495-0
- [10] P. Klus, S. Lam, D. Lyberg, M. Cheung, G. Pullan and I. McFarlane, "BarraCUDA - a fast short read sequence aligner using graphics processing units," *BMC Research Notes*, vol. 5, no. 2, Jan. 2012. doi:10.1186/1756-0500-5-27
- [11] R. Luo, T. Wong, J. Zhu, C.-M. Liu, X. Zhu, E. Wu and L.-K. Lee, "SOAP3-dp: Fast, accurate and sensitive GPU-based short read aligner," *PLoS One*, vol. 8, no. 5, May 2013. doi:10.1371/journal.pone.0065632
- [12] Y. Liu and B. Schmidt, "CUSHAW2-GPU: empowering faster gapped short-read alignment using GPU computing," *IEEE Design and Test of Computers*, vol. 31, no. 1, pp. 31 - 39, Febr. 2014. doi:10.1109/MDAT.2013.2284198
- [13] "NVBIO: nvBowtie," [Online]. Available: https://nvlabs.github.io/nvbio/nvbowtie_page.html. [Accessed: April 19, 2023].
- [14] A. Manconi, A. Orro, E. Manca, G. Armano and L. Milanese, "A tool for mapping Single Nucleotide Polymorphisms using Graphics Processing Units," *BMC Bioinformatics*, vol. 15, no. 1, p. S10, Jan. 2014. doi:1471-2105/15/S1/S10
- [15] F. Buntara, B.-S. Lee, R. Purbojati and C. Zhou, "Is GPUs ready to boost genomic alignment computation," in *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering*, ITCE, 2019. Egypt, February 02-04, 2019, IEEE, 2019, pp. 130-135. [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8646637>. [Accessed: May 21, 2024].
- [16] A. Shrestha and M. Frith, "An approximate bayesian approach to mapping paired-end DNA reads to a reference genome," *Bioinformatics*, vol. 29, no. 8, pp. 965-972, April 2013. doi:10.1093/bioinformatics/btt073
- [17] "Advantages of paired-end and single-read sequencing - Illumina," [Online]. Available: <https://www.illumina.com/science/technology/next-generation-sequencing/plan-experiments/paired-end-vs-single-read.html>. [Accessed: August 7, 2024].
- [18] H. Li and R. Durbin, "Fast and accurate short-read alignment with burrows-wheeler transform," *Bioinformatics*, vol. 25, no. 14, pp. 1754-60, May 2009. doi:10.1093/bioinformatics/btp324
- [19] H. Li and R. Durbin, "Fast and accurate long-read alignment with burrows-wheeler transform," *Bioinformatics*, vol. 26, no. 5, pp. 589-95, March 2010. doi:10.1093/bioinformatics/btp698
- [20] A. Al Kawam, "Towards the next generation of clinical decision support: Overcoming the integration challenges of genomic data and electronic health records," Ph.D. dissertation. Graduate and Professional Studies of Texas A&M University, Texas, USA, 2018.
- [21] M. Schatz, C. Trapnell, A. Delcher and A. Varshney, "High-throughput sequence alignment using graphics processing units," *BMC Bioinformatics*, vol. 8, pp. 474, Dec. 2007. doi:10.1186/1471-2105-8-474
- [22] "Single-read vs. paired-end sequencing - CD Genomics," [Online]. Available: <https://www.cd-genomics.com/resource-single-read-vs-paired-end-sequencing.html>. [Accessed: July 22, 2024].
- [23] A. H. Freedman, J. M. Gaspar, and T. B. Sackton, "Short paired-end reads trump long single-end reads for expression analysis," *BMC Bioinformatics*, vol. 21, no. 149, Apr. 2020. doi:10.1186/s12859-020-3484-z
- [24] M. Qasaimeh, K. Denolf, J. Lo, K. Vissers, J. Zambreno, and Jones, Phillip, "Comparing energy efficiency of CPU, GPU and FPGA implementations for vision kernels," in *IEEE International Conference on Embedded Software and Systems*, ICES, 2019, June 02-03, 2019, Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 1-8. [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8782524>. [Accessed: Aug. 20, 2024].
- [25] K. R. Franke and E. L. Crowgey, "Accelerating next generation sequencing data analysis: an evaluation of optimized best practices for genome analysis toolkit algorithms," *Genomics Inform*, vol. 18, no. 1, Mar. 2020. doi:10.5808/GI.2020.18.1.e10
- [26] G. Carpi, L. Gorenstein, T.T. Harkins, M. Samadi, and P. Vats, "A GPU-accelerated compute framework for pathogen genomic variant identification to aid genomic epidemiology of infectious disease: a malaria case study." *Brief Bioinform.*, vol. 23, no. 5, Sep. 2020. doi:10.1093/bib/bbac314

