



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

ISSN: 2149-0910
VOLUME: 11 ISSUE: 1
YEAR:2025

INTERNATIONAL JOURNAL OF PURE AND APPLIED SCIENCES



0428 213 17 94

ijpas@munzur.edu.tr

www.munzur.edu.tr

MUNZUR UNIVERSITY

INTERNATIONAL JOURNAL OF PURE AND APPLIED SCIENCES

ISSN: 2149-0910

IJPAS is a peer reviewed journal.

Published biannually.

<http://dergipark.gov.tr/ijpas>

Owner

Prof. Dr. Kenan PEKER

Rector

Editor

Asst. Prof. Dr. Feride TUĞRUL, Munzur University, Tunceli, Türkiye

feridetugrul@munzur.edu.tr

Associate Editor

Res. Asst. Dr. Gürkan DOĞAN, Munzur University, Tunceli, Türkiye

gurkandogan@munzur.edu.tr



This journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

This journal is covered by **TR Index, Eurasian Scientific Journal Index, COSMOS IF, Index Copernicus, Sparc Indexing, Scientific Indexing Services, DOAJ** database systems.

Editorial Board

Prof. Dr. Kenan PEKER
Prof. Dr. Ali Fuat GUNERI

Prof. Dr. Hasan AKGÜL
Prof. Dr. Mustafa DÖRÜCÜ
Prof. Dr. Seyit Ahmet OYMAK
Prof. Dr. Numan YILDIRIM
Prof. Dr. Nuran CIKCIKOGLU YILDIRIM
Prof. Dr. Valentim NUNES

Prof. Dr. Eren ÖZCEYLAN
Prof. Dr. Muharrem İNCE
Prof. Dr. Nevin TURAN ÖZEK
Prof. Dr. Mustafa SALTI
Assoc. Prof. Dr. Ebru KUYUMCU SAVAN
Assoc. Prof. Dr. Erkan ÇELİK
Assoc. Prof. Dr. Erdem IŞIK
Assoc. Prof. Dr. Zeki OMAÇ

Munzur University, Tunceli, Türkiye
Yıldız Technical University, İstanbul,
Türkiye
Akdeniz University, Antalya, Türkiye
Fırat University, Elazığ, Türkiye
Marmara University, İstanbul, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Polytechnic University of Tomar, Tomar,
Portuguese
Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Mus Alparslan University, Mus, Türkiye
Mersin University, Mersin, Türkiye
Inonu University, Malatya, Türkiye
İstanbul University, İstanbul, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye

Advisory Board

Prof. Dr. Alev TASKIN
Prof. Dr. Hikmet GEÇKİL
Prof. Dr. Valentim NUNES
Prof. Dr. Mehmet Zafer KÖYLÜ
Prof. Dr. Zakia HAMMOUCH
Prof. Dr. Sevcan KÜRÜM

Yıldız Technical University, İstanbul,
Türkiye
İnönü University, Malatya, Türkiye
Polytechnic University of Tomar, Tomar,
Portuguese
Dicle University, Diyarbakir, Türkiye
University of Moulay Ismail Errachidia,
Morocco
Fırat University, Elazığ, Türkiye

Field Editors

Prof. Dr. Burak YÖN
Prof. Muhammet GÜL
Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Assoc. Prof. Dr. Osman SERDAR
Assoc. Prof. Dr. Nagihan KARAASLAN
AYHAN
Assoc. Prof. Dr. İnan ÜNAL
Assoc. Prof. Dr. Akar DOĞAN
Assoc. Prof. Dr. Sibel ASLAN
Assoc. Prof. Dr. Gülben TORĞUT
Assoc. Prof. Dr. Fırat Artuğer
Assoc. Prof. Dr. Mutlu ÇEVİK

Munzur University, Tunceli, Türkiye
İstanbul University, İstanbul, Türkiye
Fırat University, Elazığ, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Fırat University, Elazığ, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye

Assoc. Prof. Dr. Özge AKÇAY
Assoc. Prof. Dr. Ekrem AKBULUT

Munzur University, Tunceli, Türkiye
Malatya Turgut Özal University, Malatya,
Türkiye

Asst. Prof. Dr. Aygöl KILIÇ KARABULUT
Asst. Prof. Dr. Bilgin ZENGİN
Asst. Prof. Dr. Ümit CAN
Asst. Prof. Dr. Harun GÜLAN
Asst. Prof. Dr. Özlem ERDEM
Asst. Prof. Dr. Hilal Arslanoğlu IŞIK

Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye

Writing and Language Editors

Asst. Prof. Dr. Sibel KORUNUR
Res. Asst. Dr. Nida DEMİRTAŞ EROL
Res. Asst. Merve YILMAZER

Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye

Layout Editors

Asst. Prof. Dr. Sibel KORUNUR
Res. Asst. Mahir ÖNER
Res. Asst. Emre ÖĞÜTVEREN

Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye
Munzur University, Tunceli, Türkiye

Publication Editor

Asst. Prof. Dr. Emrah KARAKAVUK

Munzur University, Tunceli, Türkiye

CONTENTS

Research Articles

Investigation of Thermomechanical Buckling Characteristics of Auxetic Core Layered Smart Sandwich Plates

Auxetic Çekirdek Katmanlı Akıllı Sandviç Plakaların Termomekanik Burkulma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Mustafa Buğday

1-16

Detection of Mental Well-Being Status Through Data-Driven Approaches

Veri Odaklı Yaklaşımlar ile Zihinsel İyi Oluş Durumunun Tespiti

Aysun Kazak Saltı, Evrim Ersin Kangal

17-29

Analysis of Total Umbilical Fibers in Riemannian Submersions with Quarter Symmetric Non-Metric Connections

Quarter Simetrik Non-Metrik Konneksiyonlu Riemann Submersiyonlarda Total Umbilik Liflerin Analizi

Esra Karataş, Semra Zeren, Mustafa Altın

30-55

Investigation Basic Properties of Custom Designed Controlled Porous Implants Produced by P/M Method for Biomedical Applications

Biyomedikal Uygulamalar için T/M Yöntemiyle Üretilen Özel Tasarım Kontrollü Gözenekli İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması

M. Selçuk Keskin, Haluk Kejanlı, Şükrü Çetinkaya, Kadir Turan

56-70

Effects of Molar Ratio, Temperature and Water Content on Acidity and Viscosity of Deep Eutectic Solvent Formed from Choline Chloride-Ethylene Glycerol

Mol Oranı, Sıcaklık ve Su İçeriğinin Kolin Klorür-Etilen Gliserolden Üretilen Derin Ötektik Çözücülerin Asitliğine ve Viskozitesine Etkileri

Çağlar Mert Aydın

71-82

Evaluation of Physicochemical and Microbiological Properties of a Traditional Local Cheese: Tire Camur Cheese

Geleneksel Bir Yerel Peynirin Fizikokimyasal ve Mikrobiyolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi: Tire Çamur Peyniri

Derya Saygılı

83-91

Fish Species Classification with Deep Learning and Bayesian Optimization: Effectiveness and Comparative Results

Balık Türü Sınıflandırmasında Derin Öğrenme ve Bayes Optimizasyonu: Model Etkinlik ve Karşılaştırmalı Sonuçlar

Hüseyin Aydılek, Mustafa Yasin Erten

92-107

Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik-Çevresel Sonuçlarının İncelenmesi ve Tepki Yüzeyi Metodu Tabanlı Modellenmesi

Investigation of Mechanical-Environmental Outcomes of Self-Compacting Mortars and Modelling Based on Response Surface Method

Muhammed Ulucan

108-119

Tunceli’de Yetişen Kuşburnu (*Rosa canina*) ve Alıç (*Crataegus orientalis*) Yabani Meyvelerinin Toplam Fenolik Madde Miktarı, Fenolik Kompozisyonu, Antioksidan Kapasitesi ile Bazı Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

*Determination of Total Phenolic Content, Phenolic Composition, Antioxidant Capacities and Some Physicochemical Features of Rosehip (*Rosa canina*) and Hawthorn (*Crataegus Orientalis*) Wild Fruits Growing in Tunceli*

Şenay Kasun, Emrah Karakavuk, Zeynep Eroğlu, Fulya Benzer

120-135

Geri Dönüştürülmüş Yer Tutucu Kullanımıyla Sürdürülebilir Titanyum Köpük Üretimi Süreci

Sustainable Production of Titanium Foams Using Recycled Space Holder Materials

Betül Demir, Aysun Ayday

136-148

Determination of Agricultural-Based Biomass Energy Potential as a Sustainable Clean Energy Source: The Case of Muş Province (2020-2024)

Sürdürülebilir Temiz Enerji Kaynağı Olarak Tarımsal Kökenli Biyokütle Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi: Muş İli Örneği (2020-2024)

Hatice Erdem

149-163

TiB2-VC Tozu ile Kaplanan St52 Çeliğinin Mikroyapı ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Microstructure and Wear Behavior of St52 Steel Coated with TiB2-VC Powder

Musa Kılıç, Anıl İmak, İhsan Kırık

164-175

Öğütülmüş Pomza Taşı ile Stabilize Edilen Kumlu Zeminin Esnek Üstyapı Tasarımına Etkisinin Araştırılması

Investigation of the Effect of Sandy Soil Stabilized with Ground Pumice Stone on Flexible Pavement Design

Tacettin Geçkil, Talha Sarıcı, Bahadır Karabaş

176-192

Mechanical Structure Investigations of Woven and Knitted Carbon Fiber- Reinforced Polymer Composites

Dokuma ve Örmeye Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Mekanik Yapı Araştırmaları

Ceyda Okta, Sidem Kaner

193-208

Effects of Invasive Plants(*Xanthium spinosum*, *Xanthium strumarium* and *Phragmites australis*) on Rhizobacteria Density

Bazı İstilacı Bitkilerin (Xanthium spinosum, Xanthium strumarium ve Phragmites australis) Kök Bakterileri Yoğunlukları Üzerine Etkileri

Şeyma Çankaya Kılıç, İdris Bektaş, Dudu Duygu Kılıç, Burak Sürmen

209-218

Kaotik Sistemlerin Kontrolü için Bir Kullanıcı Grafik Arabirim Tasarımı

A Graphical User Interface Design for the Control of Chaotic Systems

Usame Elhüseyyan, Mustafa Türk, Vedat Çelik

219-239

Design and Finite Element Analysis of 2.5D Lattice Structures for Internal Air-Cooled Gas Turbine Blades

Dahili Hava Soğutmalı Gaz Türbini Kanatçıkları için 2.5D Kafes Yapılarının Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi

Mustafa Güven Gök, Halil İbrahim Kurt

240-251

Experimental Analysis of Single Propeller Scour Dynamics Near Vertical and Parallel Quay Walls

Dikey ve Paralel Yanaşma Yapıları Önünde Tekil Pervane Kaynaklı Oyulma Dinamiklerinin DeneySEL Olarak Araştırılması

Erdal Kesgin, Rumeysa Kuzgun, R. İlayda Tan Kesgin, Kadir Gezici

252-268

Üniversite Öğrencilerinin Eleştirel Düşünme Profillerinin k-Means Kümeleme Algoritması ile Analizi

Analysis of Critical Thinking Profiles of University Students with k-Means Clustering Algorithm

Tuğba Tümen, Ferhat Bahçeci

269-280

Alzheimer Hastalığının Tespiti CNN Model Sınıflandırması

Detection of Alzheimer's Disease CNN Model Classification

Ceren Gündüzalp, Gökalep Tulum, Tahsin Gündüzalp

281-297

Fren Balatalarının Tasarımında Kullanılan Malzemeler ve Balata Performansı Üzerindeki Etkileri

Materials Used in the Design of Brake Pads and Their Effects on Pad Performance

Zülal Arca Batı, Noman Gündüz, Yahya Hışman Çelik

298-316

Peynir Altı Suyunun İşlemesi ve Değerlendirilmesindeki Son Gelişmeler

Recent Advances in Whey Processing and Valorisation

Nihat Akın, Damla Özışık

317-348

Research Article

Investigation of Thermomechanical Buckling Characteristics of Auxetic Core Layered Smart Sandwich Plates

Mustafa Buğday^{1*} 

Received: 28.11.2024

Accepted: 07.02.2025

¹Department of Mechanical Engineering, Karabuk University, Karabuk, Turkey;

mustafabugday@karabuk.edu.tr

*Corresponding author

Abstract: This study analytically investigated the thermo-mechanical buckling behavior of smart sandwich plates with auxetic core layer based on the theory of high-order shear deformation. The outer layers of the plate were modeled as BaTiO₃ and CoFe₂O₄, and the core layer was modeled as nickel material with auxetic cell structure. The equations of motion derived using Hamilton's Principle were solved by Navier method, and the effects of auxetic core properties and electric and magnetic fields were evaluated. Although the analytical model was based on the literature, new equations were developed for the interaction of auxetic core and smart materials. The findings showed that auxetic parameters and external fields have significant effects on the buckling temperature and critical loads. This study provides a theoretical basis for the thermo-mechanical buckling analysis of auxetic core sandwich plates.

Keywords: auxetic structure; smart sandwich plate; magneto strictive material; electro elastic material; thermal buckling

Araştırma Makalesi

Auxetic Çekirdek Katmanlı Akıllı Sandviç Plakaların Termomekanik Burkulma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Özet: Bu çalışma, yüksek dereceli kayma deformasyonu teorisini temel alarak, auxetic çekirdek katmanlı akıllı sandviç plakaların termo-mekanik burkulma davranışını analitik olarak incelemiştir. Plakanın dış katmanları BaTiO₃ ve CoFe₂O₄, çekirdek katmanı ise auxetic hücre yapısına sahip nikel malzeme ile modellenmiştir. Hamilton İlkesi kullanılarak türetilen hareket denklemleri, Navier yöntemiyle çözülmüş, auxetic çekirdek özellikleri ile elektrik ve manyetik alanların etkileri değerlendirilmiştir. Analitik model literatüre dayanmakla birlikte, auxetic çekirdek ve akıllı malzemelerin etkileşimine yönelik yeni denklemler geliştirilmiştir. Bulgular, auxetic parametreler ve harici alanların, burkulma sıcaklığı ve kritik yükler üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, auxetic çekirdekli sandviç plakaların termo-mekanik burkulma analizi için teorik bir temel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: auxetic yapı; akıllı sandviç plaka; manyetostriktif malzeme; elektro elastik malzeme; termal burkulma

1. Introduction

Magneto-electro-elastic (MEE) materials represent a distinct category of smart materials that display piezoelectric and piezomagnetic characteristics in a stratified arrangement [1]. These materials, referred to as multiferroics, have garnered considerable interest due to their capacity to efficiently couple distinct phases, rendering them advantageous in multiple industries [2]. The magnetoelectric coupling effects in MEE materials have resulted in their extensive application in engineering fields, including sensors, actuators, robotics, structural health monitoring, vibration control, and medical instruments [3].

Researchers have investigated the fabrication of multiphase magneto-electro-elastic (MMEE) materials by adjusting the volume fractions of various constituents such as BaTiO₃ and CoFe₂O₄ [4]. Research on magneto-electro-elastic nanoplates has demonstrated that surface effects significantly influence the propagation of anti-plane shear waves in these materials [5]. Furthermore, polymer-based magneto-electro-elastic composites have arisen as promising materials, exhibiting macro-scale magneto-electric coupling through homogenization techniques [6].

Piezo-magnetic plates have garnered attention in numerous research studies centered on intelligent composite materials. A micromechanical model has been created for the examination of smart composite piezo-magneto-thermoelastic thin plates with rapidly fluctuating thickness [7]. These studies encompass thermoelastic damping, orthotropic materials, and finite element methods to analyze the behavior of complex structures [8]. Furthermore, investigations have been undertaken on sandwich nanoplates incorporating piezo-magnetic face-sheets, utilizing theories such as sinusoidal shear deformation plate theory to formulate equations of motion for these structures [9]. Javani et al. [10] examine the temperature-dependent functionally graded material circular plate with piezoelectric sensor/actuator layers in relation to the active control of thermally induced vibrations.

Smart plates, especially those utilizing advanced materials and technologies, provide numerous applications and advantages. These plates can be fabricated through various techniques, including the incorporation of conductive materials into textile structures [11], the application of piezoelectric materials for shape modulation [12], and the use of shape memory polymers for bidirectional shape memory functionality [13]. Moreover, the optimization of piezoelectric sensors and actuators can be achieved for vibration control [14], while laminated structures can be modeled to enhance dynamic stability [15].

Thermal buckling is a significant phenomenon that arises in structures exposed to thermal loads and constraints that restrict their movement [16]. Disregarding thermal stress, which may constitute up to 40% of mechanical stress, poses considerable safety hazards, particularly in aerospace structures [17]. Studies indicate that thermal buckling frequently occurs in materials such as titanium alloy plates, attributed to their low critical thermal buckling temperature, resulting in intricate nonlinear responses under thermal-acoustic loadings [18]. Research has emphasized the necessity of performing thermal buckling analysis to ascertain critical buckling temperatures and modal responses under various thermal loads [19].

The thermomechanical behavior of smart plate systems is a significant and contemporary concern, as previously noted. This study examines the modeling of sandwich plates with auxetic core layers and electroelastic and magnetostrictive surface layers. Higher-order plate theory is employed to precisely characterize the behavior of these plates. A thorough framework is examined for the thermomechanical buckling characteristics of the smart sandwich plate. The results of this study can be applied to the advancement of electromechanical smart systems and applications related to vibration and shock damping in high-temperature environments.

2. Mathematical formulation

Figure 1 illustrates a thick rectangular plate constructed from a metal auxetic core and piezo magnetic materials, with dimensions of length a , width b , and thickness t . It is located between two piezo electromagnetic patches, each with a thickness of h_p .

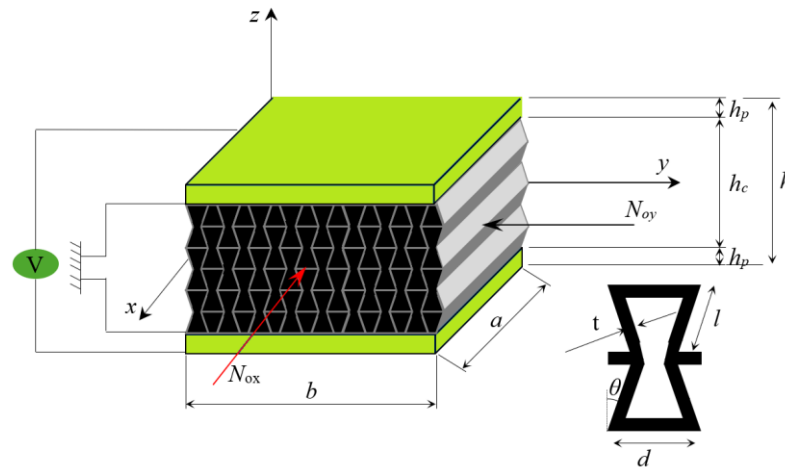


Figure 1. The diagram of the smart sandwich plate and auxetic cell.

The origin is in the central plane, at the midpoint of the plate, and the Cartesian coordinate system is employed for this analysis. The subsequent assumption underpins the present formulation [20]:

1. The three layers of the sandwich plate are seamlessly bonded, eliminating any potential slippage at their interfaces.
2. The characteristics of the upper and lower piezo electromagnetic layers are identical and homogeneous.

In the study, length ratio β_l and thickness ratio β_3 were calculated as follows:

$$\beta_1 = \frac{l}{d} \quad (1a)$$

$$\beta_3 = \frac{t}{l} \quad (1b)$$

2.1. The types of the temperature increase

Equations for uniform (UTI), nonlinear (NLTI), and linear (LTI) temperature variations are provided for each thickness of the sandwich nanoplate.

Assuming a linear temperature increase (LTI) from the bottom surface T_b to the top surface T_t across the thickness, the temperature of a plane extending along the z -axis can be determined using the following equation [21].

$$T(z) = T_b + (T_t - T_b) \left(\frac{h + 2z}{2h} \right) \quad (2)$$

In the case of nonlinear temperature increase (NLTI) across the thickness, the temperatures of the sandwich nanoplate's upper surface T_t and lower surface T_b can be calculated using equation 1 [22].

$$-\frac{d}{dz} \left(\kappa(z) \frac{dT}{dz} \right) = 0, \quad T\left(\frac{h}{2}\right) = T_t, \quad T\left(-\frac{h}{2}\right) = T_b \quad (3)$$

The temperature of the complete FGM sandwich nanoplate, which experiences a uniform temperature increase from T_0 to T , can be determined using the following equation:

$$\Delta T = T - T_0 \quad (4a)$$

$$T(z) = T_b + \frac{(T_t - T_b)}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{\kappa(z)} dz} \int_{-\frac{h}{2}}^z \kappa(z) dz \quad (4b)$$

Here, $\kappa(z)$ represents the thermal conductivity coefficient. This study utilizes the nonlinear temperature rise (Eq. 4) for analysis.

2.2. Displacement field

Due to the prominence of shear deformations in the current plate and the necessity for high precision in this system, the displacement field is represented using two SSDT variables, as indicated in [23].

$$u(x, y, z, t) = u_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_b(x, y, t)}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s(x, y, t)}{\partial x}, \quad (5)$$

$$v(x, y, z, t) = v_0(x, y, t) - z \frac{\partial w_b(x, y, t)}{\partial y} - f(z) \frac{\partial w_s(x, y, t)}{\partial y}, \quad (6)$$

$$w(x, y, z, t) = w_b(x, y, t) + w_s(x, y, t) \quad (7)$$

In this context, u_0 , v_0 , w_b , and w_s represent the mid-surface components of displacement, while u , v , and w denote the displacement components of the plate along the x , y , and z axes, respectively. The transverse displacements caused by shearing and bending are denoted by the variables w_s and w_b , respectively. The shape function, $f(z)$, is equivalently expressed as [24]:

$$f(z) = z - \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \quad (8)$$

The components of the strain tensor concerning the displacement field in Equations (1, 2, 3) are as follows:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - f(z) \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_b}{\partial y^2} - f(z) \frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} - 2z \frac{\partial^2 w_b}{\partial x \partial y} - 2f(z) \frac{\partial^2 w_s}{\partial x \partial y} \\ \gamma_{yz} &= g(z) \frac{\partial w_s}{\partial y} \end{aligned} \quad (9)$$

where:

$$g(z) = 1 - f'(z) \quad (10)$$

where the normal strain component is ε_{ii} and the shear strain component is γ_{ij} ($ii=xx, yy$ and $ij=xy, yz, xz$), respectively.

2.3. Hamilton's principle

The equations of motion are derived utilizing Hamilton's principles. This concept is articulated as follows:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta T - \delta W) dt = 0 \quad (11)$$

U , T , and W represent external work, kinetic energy, and strain energy, respectively.

2.4. Navier's solution

Analytical solutions exist for equations of motion pertaining to plates with simply supported boundary conditions. The displacements are considered functions that satisfy various geometric boundary conditions according to Navier's solution.

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_b \\ w_s \\ \phi \\ \psi \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} \bar{u} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \\ \bar{v} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \\ \bar{w}_b \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{h\pi y}{b}\right) \\ \bar{w}_s \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \\ \bar{\phi} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \\ \bar{\psi} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \end{Bmatrix} e^{i\omega t} \quad (12)$$

The maximum values of the displacement components, electric and magnetic potentials, and unknown coefficients are represented by the variables $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}_b$, $\bar{w}_s$, $\bar{\phi}$, and $\bar{\psi}$. The natural frequency is denoted as ω .

The following relation is used for the non-dimensional buckling load for the modes m , n :

$$\lambda_{cr}(m, n) = \frac{12(1 - \nu_c^2)N_{cr}a^2}{E_c h^3} \quad (13)$$

For the nondimensional external electric and magnetic potentials the following relations are used.

$$V_m = \frac{V_0}{D_c} ; D_c = \frac{E_c h^3}{12(1 - \nu_c^2)} \quad (14)$$

$$h_m = \frac{h_0}{h_c} ; h_c = \frac{E_c h^3}{12(1 - \nu_c^2)} \quad (15)$$

Table 1 presents the magnetic, piezoelectric, electrostatic, and thermal properties of the CoFe_2O_4 and BaTiO_3 materials utilized. CoFe_2O_4 exhibits robust magnetic characteristics and is significant in magneto mechanical interactions. BaTiO_3 is an essential material for electromechanical interactions owing to its elevated dielectric constant and piezoelectric responsiveness. These qualities are fundamental parameters for comprehending the response of the core layer in the sandwich structure to external loads. The study meticulously evaluated the effects of the combination of these materials on the system under the influence of magnetic fields, piezoelectric contributions, and thermal loads.

Table 1 The magnetic, piezo, electro and thermal properties of CoFe_2O_4 and BaTiO_3 [25,26]

		CoFe_2O_4	BaTiO_3
C_{11}	[GPa]	286	166
C_{22}		286	166
C_{33}		269.5	162
C_{12}		173	77
C_{13}		170.5	78
C_{23}		170.5	78
C_{44}		45.3	43
C_{55}		45.3	43
C_{66}		56.5	44.5
e_{31}	[C/m ²]	0	-4.4
e_{32}		0	-4.4
e_{33}		0	18.6
q_{31}	[N/A.m]	580.3	0
q_{32}		580.3	0
q_{33}		699.7	0
ξ_{11}	[10 ⁻⁹ C ² /N.m ²]	0.08	11.2
ξ_{22}		0.08	11.2
ξ_{33}		0.093	12.6
$\zeta_{11} = \zeta_{22} = \zeta_{33}$	[s/m]	0	0
χ_{11}	[10 ⁻⁶ N.s ² /C]	-590	5
χ_{22}		-590	5
χ_{33}		157	10
$p_{11} = p_{22}$	[10 ⁻⁷ C/m ² K]	0	0
p_{33}		0	-11.4
$\lambda_{xx} = \lambda_{yy}$	[10 ⁻⁵ Wb/m ² K]	0	0
λ_{zz}		-36.2	0
$\alpha_1 = \alpha_2$	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	10	15.8
ρ	[kg/m ³]	5800	5300

The material characteristics of the auxetic core layer are the fundamental parameters that dictate the mechanical reaction. Table 2 comprises critical engineering data, including modulus of elasticity, density, Poisson's ratio, and thermal expansion coefficient. Auxetic structures have a negative Poisson's ratio, resulting in distinct deformation behavior under mechanical loads compared to conventional materials. This characteristic enhances structural integrity and augments the energy dissipation capability. The study assessed the stability of the auxetic core layer under mechanical and thermal loads, as well as critical buckling loads and deformation characteristics, by considering these material features.

Table 2. Material properties of the Auxetic core layer [27]

Material	Property	P_{-1}	P_0	P_1	P_2	P_3
Nickel	ρ (kg/m ³)	0	8900	0	0	0
	E (Pa)	0	223.95x 10 ⁹	-2.794x10 ⁻⁴	3.998x10 ⁻⁹	0
	ν	0	0.31	0	0	0
	α (1K ⁻¹)	0	9.9209x10 ⁻⁶	8.705x10 ⁻⁴	0	0
	ψ (W/mK)	0	58.74	-4.614x10 ⁻⁴	6.670x10 ⁻⁷	-1.523x10 ⁻⁷

3. Results and Discussion

In the study, a MATLAB based analysis method was applied to evaluate the thermo-mechanical buckling behavior of the sandwich plate, and the obtained data were interpreted through graphs examining the effects of auxetic core parameters, axial compressive force, external electric and magnetic potentials.

3.1. Influence of Auxetic Core Parameters on the Thermal Buckling Behavior of Sandwich Plates

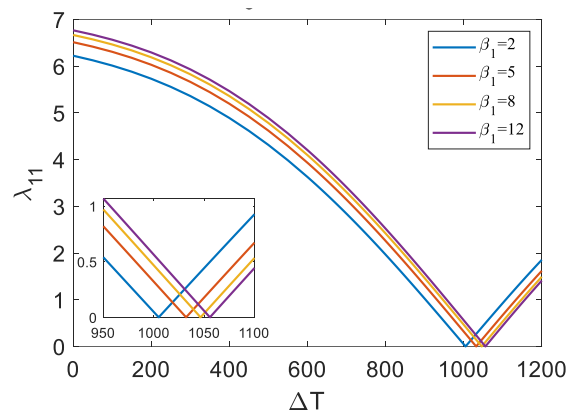


Figure 2. Variation of the dimensionless buckling load λ_{11} of sandwich plate depending on the auxetic length ratio $\beta_1 = 2, 5, 8$ and 12 ; and for auxetic thickness ratio $\beta_3 = 0.1$; $\theta = 45^\circ$; $a = 1$; $b = a$; $h = a/10$; $h_c = 0.9h$; $h_p = 0.05H$;

$$N_x = N_y = 0$$

In Figure 2, the variation of the dimensionless buckling load depending on the Auxetic length ratio and temperature is presented. Here, the analyzes were made for the parameters of the Auxetic core layer, $\beta_3 = 0.1$ and $\theta = 45^\circ$. At $\beta_1 = 2$, while the critical buckling load at $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 6.22$, at $\Delta T = 1005$ K, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$. While the critical buckling load at $\beta_1 = 5$ and $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 6.51$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 1032$ K. While the critical buckling load at $\beta_1 = 8$ and $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 6.66$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 1046$ K. At $\beta_1 = 12$, while the critical buckling load at $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 6.77$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 1055$ K.

3.2. Impact of Axial Compression Force on the Thermal Buckling Response of the Sandwich Plate

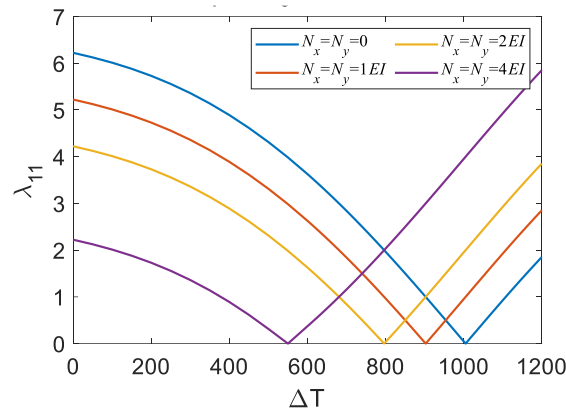


Figure 3. Variation of the dimensionless buckling load λ_{11} of sandwich plate depending on the auxetic length ratio $\beta_1 = 2$; and for auxetic thickness ratio $\beta_3 = 0.1$; $\theta = 45^\circ$; $a = 1$; $b = a$; $h = a/10$; $h_c = 0.9h$; $h_p = 0.05h$; $N_x = N_y = 0, 1EI, 2EI, 4EI$

Figure 3 shows the variation of dimensionless buckling load depending on axial compression load and temperature. Here, the analyzes were carried out for the parameters of the Auxetic core layer, $\beta_1 = 2$, $\beta_3 = 0.1$ and $\theta = 45^\circ$. In the case where there is no compression load at $N_x = N_y = 0$, the critical buckling load at $\Delta T = 0$ is $\lambda_{11} = 6.22$, while at $\Delta T = 1003$ K, buckling occurs by decreasing to $\lambda_{11} = 0$. In the case where the compression load is $1EI$ at $N_x = N_y = 1EI$, while the critical buckling load at $\Delta T = 0$ K is $\lambda_{11} = 5.22$, at $\Delta T = 903$ K, buckling occurs by decreasing to $\lambda_{11} = 0$. In the case where the compression load is $2EI$ at $N_x = N_y = 2EI$, while the critical buckling load at $\Delta T = 0$ K is $\lambda_{11} = 4.22$, buckling occurs by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 796$ K. In the case where the compression load is $4EI$ at $N_x = N_y = 4EI$, while the critical buckling load at $\Delta T = 0$ K is $\lambda_{11} = 2.22$, at $\Delta T = 550$ K, buckling occurs by decreasing to $\lambda_{11} = 0$.

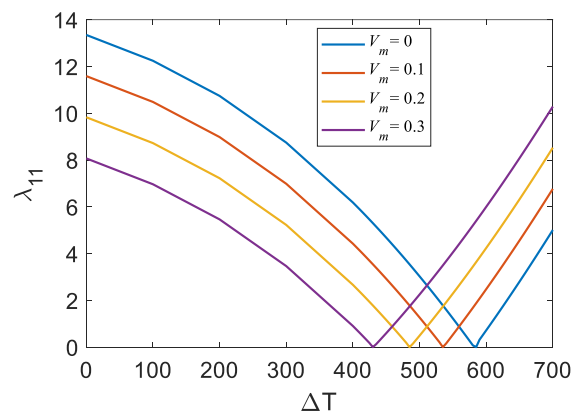


Figure 4. Variation of the dimensionless buckling load λ_{11} of sandwich plate depending on the nondimensional external electric potential $V_m = 0, 0.1, 0.2$ and 0.3 ; for $\theta = 45^\circ$, $\beta_1 = 2$; $\beta_3 = 0.1$; $a = 1$; $b = a$; $h = a/10$; $h_c = 0.2h$; $h_p = 0.4h$; $N_x = N_y = 0$

3.3. Variation in Thermal Buckling Temperature of the Sandwich Plate Under External Electric Potential

As the external electric potential increases, the sandwich plate shows a softening effect due to the electroelastic properties of the surface layers and the buckling temperature decreases.

Figure 4 shows the variation of the dimensionless buckling load depending on external electric potential and temperature. Here, the parameters of the analysis Auxetic core layer was chosen as $\beta_1 = 2, \beta_3 = 0.1$. While the critical buckling load at $V_m = 0$ and $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 13.35$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 585$ K. While the critical buckling load at $V_m = 0.1$ and $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 11.59$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 535$ K. While the critical buckling load at $V_m = 0.2$ and $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 9.83$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 485$ K. Similarly, at $V_m = 0.3$, while the critical buckling load at $\Delta T = 0$ was $\lambda_{11} = 8.07$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 430$ K. From $V_m = 0.3$ to $V_m = 0$, the buckling temperature decreased by 1.36 times.

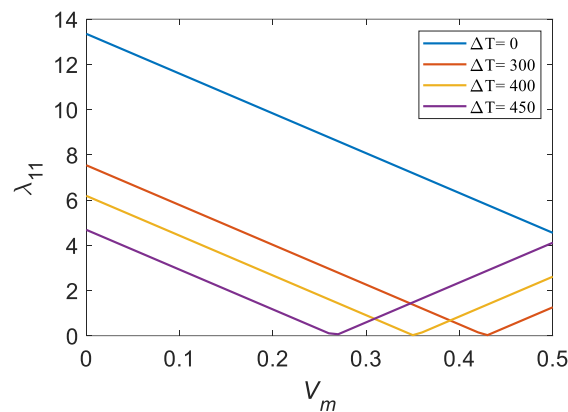


Figure 5. Variation of the dimensionless buckling load λ_{11} of sandwich plate depending on $\Delta T = 0, 350, 400$ and 450; and for the nondimensional external electric potential $V_m = 0-0.5$ $\theta = 45^\circ, \beta_1 = 2; \beta_3 = 0.1; a = 1; b = a; h = a/10; h_c = 0.2h; h_p = 0.4h; N_x = N_y = 0$

Figure 5 shows the variation of the dimensionless buckling load depending on external electric potential and temperature. Here, the parameters of the analysis Auxetic core layer was chosen as $\beta_1 = 2, \beta_3 = 0.1$. At $\Delta T = 0$, critical buckling load at $V_m = 0$ is $\lambda_{11} = 13.35$, where no buckling has occurred. At $\Delta T = 300$, while the critical buckling load was $\lambda_{11} = 7.54$ at $V_m = 0$, buckling occurred by decreasing to $\lambda_{11} = 0$ at $V_m = 0.0277$. While the critical buckling load was $\lambda_{11} = 6.18$ at $\Delta T = 400, V_m = 0$, it decreased to $\lambda_{11} = 0$ at $V_m = 0.0273$ and buckling took place. While the critical buckling load was $\lambda_{11} = 4.68$ at $\Delta T = 450, V_m = 0$, it decreased to $\lambda_{11} = 0$ at $V_m = 0.067$ and buckling took place.

3.4. Thermal Buckling Behavior of the Sandwich Plate Subjected to External Magnetic Potential

Due to the magnetostrictive property of cobalt ferrite in the surface layers of the sandwich plate, a hardening effect occurs on the sandwich plate depending on the magnitude of the external magnetic potential applied and accordingly the buckling temperature decreases.

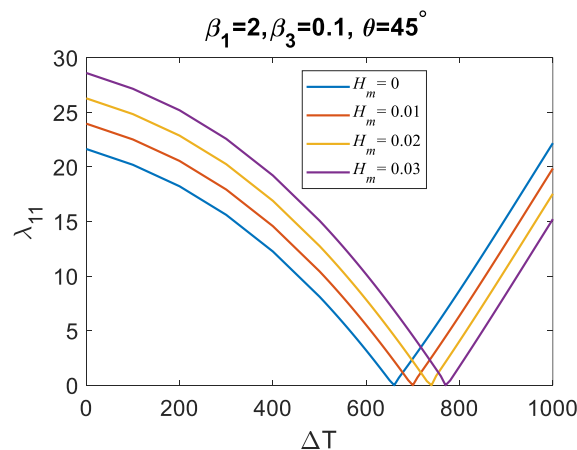


Figure 6. Variation of the dimensionless buckling load λ_{11} of sandwich plate depending on the nondimensional external magnetic potential $H_m = 0, 0.01, 0.02$ and 0.03 ; for $\theta = 45^\circ, \beta_1 = 2; \beta_3 = 0.1; a = 1; b = a; h = a/10; h_c = 0.2H; h_p = 0.4h; N_x = N_y = 0$

Figure 6 shows the variation of the dimensionless buckling load depending on external magnetic potential and temperature. Here, the parameters of the analysis Auxetic core layer was chosen as $\beta_1 = 2, \beta_3 = 0.1$. While the critical buckling load at $\Delta T = 0$ and $H_m = 0$ was $\lambda_{11} = 21.64$, at $\Delta T = 660$ K, it decreased to $\lambda_{11} = 0$ and buckling took place. While the critical buckling load at $\Delta T = 0$ and $H_m = 0.01$ was $\lambda_{11} = 23.96$, at $\Delta T = 700$ K, it decreased to $\lambda_{11} = 0$ and buckling took place. While the critical buckling load was $\lambda_{11} = 26.28$ at $\Delta T = 0$ and $H_m = 0.02$, it decreased to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 740$ K and buckling took place. While the critical buckling load was $\lambda_{11} = 28.61$ at $\Delta T = 0$ and $H_m = 0.03$, it decreased to $\lambda_{11} = 0$ at $\Delta T = 770$ K and buckling took place. The buckling temperature increased by 1.17 times from $H_m = 0.03$ to $H_m = 0$.

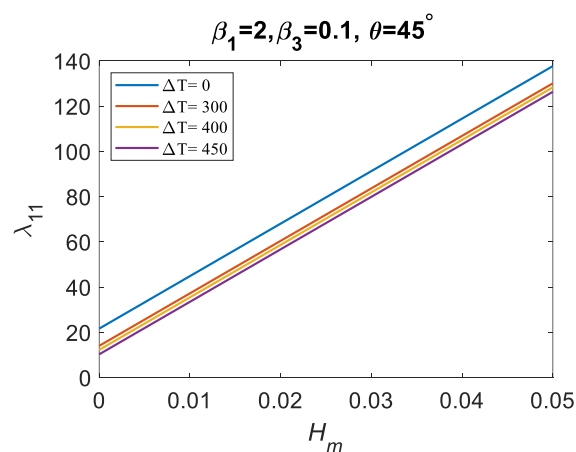


Figure 7. Variation of the dimensionless buckling load λ_{11} of sandwich plate depending on $\Delta T = 0, 350, 400$ and 450 ; and for the nondimensional external magnetic potential $H_m = 0-0.5$ $\theta = 45^\circ, \beta_1 = 2; \beta_3 = 0.1; a = 1; b = a; h = a/10; h_c = 0.2h; h_p = 0.4h; N_x = N_y = 0$

Figure 7 shows the variation of the dimensionless buckling load depending on external magnetic potential and temperature. Here, the parameters of the analysis Auxetic core layer was chosen as $\beta_1 = 2$, $\beta_3 = 0.1$. No buckling occurs at $\Delta T = 0, 300, 400, 450$ K. The critical buckling loads occurring at $H_m = 0$ and $\Delta T = 0, 300, 400, 450$ K are $\lambda_{11} = 21.64, 14.03, 12.25$ and 10.28 , respectively.

4. Conclusion

This research investigates the modeling and analysis of the thermomechanical buckling characteristics of smart sandwich plates featuring auxetic cores, employing higher-order shear deformation theory. The outer layers of the smart plate comprise electro elastic BaTiO₃ (Barium Titanate) and magnetostrictive CoFe₂O₄ (Cobalt Ferrite) materials. A thorough analysis was performed utilizing the length, thickness, and inclination angle of the auxetic structure to examine the thermomechanical buckling characteristics of the smart sandwich plate. The impact of electric and magnetic potentials on the surface plates of the smart structure regarding buckling behavior was examined. The results obtained are summarized as follows:

Comparing the values of the variable length ratio (β_l), constant thickness ratio ($\beta_3 = 0.1$), and constant inclination angle ($\theta = 45^\circ$) reveals that an increase in the length parameter leads to a significant rise in thermal resistance. This phenomenon can be attributed to the fact that a longer auxetic core structure facilitates enhanced energy dissipation and mechanical stability, thereby increasing the temperature at which buckling occurs. The extended length results in a more uniform distribution of thermal stress, delaying the onset of instability in the system.

As axial forces increase from $N_x=N_y=0$ to $N_x=N_y=4EI$, the thermal resistance of the axial force exhibits a noticeable increase with respect to the length parameter ($\beta_l=2$), constant thickness parameter ($\beta_3 = 0.1$), and fixed inclination angle ($\theta = 45^\circ$). This trend indicates that the applied axial forces reinforce the auxetic core's ability to resist thermal loads by increasing the overall stiffness of the structure. However, as the system reaches a critical state, the accumulation of stress leads to a reduction in the buckling temperature, meaning that under higher axial loads, thermal instability is triggered at lower temperatures. This inverse relationship highlights the trade-off between axial force-induced stiffness enhancement and the loss of thermal stability due to stress accumulation.

When evaluating the external electric potential applied to the auxetic core ($\beta_l=2$), with a constant thickness parameter ($\beta_3 = 0.1$) and a fixed inclination angle ($\theta = 45^\circ$), it is evident that an increase in the external electric potential is primarily influenced by the electro elastic effect in the surface layers. The presence of this electric potential generates additional strain within the material, modifying its overall stiffness and stress distribution. This effect, in turn, leads to a decrease in thermal resistance, causing a reduction in the buckling temperature. The results suggest that the electro elastic coupling effect has a destabilizing impact on the structure under thermal loads, reinforcing the importance of accounting for electric field interactions in auxetic core designs.

Similarly, when considering the effect of the external magnetic potential on the auxetic core ($\beta_l=2$, $\beta_3 = 0.1$, $\theta = 45^\circ$), it is observed that an increase in the magnetic field intensity contributes to a decrease

in buckling temperature. This reduction is associated with the interaction between the Lorentz forces and the internal mechanical stress distribution within the auxetic core. As the temperature rises, the system becomes increasingly susceptible to premature buckling, particularly under lower magnetic field intensities. This result suggests that although magnetic fields can be used to modulate mechanical stability, excessive exposure to thermal loads under a magnetic field may compromise the overall integrity of the structure.

The findings of this study underscore the complex interplay between geometric parameters, external force fields, and thermal effects on the stability of auxetic core structures. The results demonstrate that while increasing the length parameter enhances thermal resistance and delays buckling, higher axial loads and external electric/magnetic potentials can significantly reduce the critical buckling temperature. These outcomes suggest that optimizing the design of auxetic core structures requires a careful balance between structural dimensions, applied forces, and environmental conditions. Future research could explore adaptive materials with tunable auxetic properties to mitigate the destabilizing effects of thermal and electromagnetic loads. Additionally, experimental validation of the numerical findings would provide deeper insights into the practical implications of the proposed model.

Acknowledgment

The author would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The author asserts that, to the best of his knowledge, he possesses no conflict of interest or shared interest with any institution, organization, or individual that could affect the article's review process.

Author Contribution

This research was independently conducted by Mustafa BUĞDAY. The author executed research design, data collection and analysis, composition, and article editing processes. Throughout this process, ethical guidelines and principles of academic integrity were strictly followed.

Research and Publication Ethics Statement

The author declare that they have complied with the scientific, ethical, and citation principles of the *International Journal of Pure and Applied Sciences* throughout all stages of the study.

References

- [1] Mahesh, V., Mahesh, V., Harursampath, D., and Abouelregal, A.E. (2022) Simulation-based assessment of coupled frequency response of magneto-electro-elastic auxetic multifunctional structures subjected to various electromagnetic circuits. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 236 (11), 2281–2296.

- [2] Moshtagh, E., Eskandari-Ghadi, M., and Pan, E. (2019) Time-harmonic dislocations in a multi-layered transversely isotropic magneto-electro-elastic half-space. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 30 (13), 1932–1950.
- [3] Park, W.-T. and Han, S.-C. (2018) Buckling analysis of nano-scale magneto-electro-elastic plates using the nonlocal elasticity theory. *Advances in Mechanical Engineering*. 10 (8), 168781401879333.
- [4] Mahesh, V. and Kattimani, S. (2019) Finite element simulation of controlled frequency response of skew multiphase magneto-electro-elastic plates. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 30 (12), 1757–1771.
- [5] Wu, B., Zhang, C., Chen, W., and Zhang, C. (2015) Surface effects on anti-plane shear waves propagating in magneto-electro-elastic nanoplates. *Smart Materials and Structures*. 24 (9), 095017.
- [6] Miehe, C. and Vallicotti, D. (2015) Variational Structural and Material Stability Analysis in Finite Electro-Magneto-Mechanics of Active Materials. *PAMM*. 15 (1), 7–10.
- [7] Hadjiloizi, D.A., Kalamkarov, A.L., Metti, Ch., and Georgiades, A. V. (2014) Analysis of Smart Piezo-Magneto-Thermo-Elastic Composite and Reinforced Plates: Part I – Model Development. *Curved and Layered Structures*. 1 (1),.
- [8] Hadjiloizi, D.A., Kalamkarov, A.L., Metti, Ch., and Georgiades, A. V. (2014) Analysis of Smart Piezo-Magneto-Thermo-Elastic Composite and Reinforced Plates: Part II – Applications. *Curved and Layered Structures*. 1 (1),.
- [9] Arefi, M. and Zenkour, A.M. (2016) Employing sinusoidal shear deformation plate theory for transient analysis of three layers sandwich nanoplate integrated with piezo-magnetic face-sheets. *Smart Materials and Structures*. 25 (11), 115040.
- [10] Javani, M., Eslami, M.R., and Kiani, Y. (2024) Active control of thermally induced vibrations of temperature-dependent FGM circular plate with piezoelectric sensor/actuator layers. *Aerospace Science and Technology*. 146 108997.
- [11] Tseghai, G.B., Malengier, B., Fante, K.A., Nigusse, A.B., and Van Langenhove, L. (2020) Integration of Conductive Materials with Textile Structures, an Overview. *Sensors*. 20 (23), 6910.
- [12] Bajoria, K.M. and Patore, S.A. (2021) Shape control of hybrid functionally graded plate through smart application of piezoelectric material using simple plate theory. *SN Applied Sciences*. 3 (2), 209.
- [13] Du, H., Yao, Y., Zhou, X., and Zhao, Y. (2023) Two-way shape memory behavior of styrene-based bilayer shape memory polymer plate. *Polymers for Advanced Technologies*. 34 (1), 252–260.

- [14] Wang, S.Y., Tai, K., and Quek, S.T. (2006) Topology optimization of piezoelectric sensors/actuators for torsional vibration control of composite plates. *Smart Materials and Structures*. 15 (2), 253–269.
- [15] Hoseinzadeh, M. and Rezaeepazhand, J. (2020) Dynamic stability enhancement of laminated composite sandwich plates using smart elastomer layer. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 22 (8), 2796–2817.
- [16] Martin, K., Daub, D., Esser, B., Gülhan, A., and Reese, S. (2021) Numerical Modelling of Fluid-Structure Interaction for Thermal Buckling in Hypersonic Flow. in: pp. 341–355.
- [17] Deng, W., Wang, B.-W., Lei, K., and Wu, J.-T. (2023) Thermal buckling behavior of metal/composite wall panels. *Journal of Physics: Conference Series*. 2472 (1), 012001.
- [18] Zou, X., Guo, D., and Zhang, L. (2015) Dynamic Analysis of the Titanium Alloy Plate under Thermal-acoustic Loadings. *MATEC Web of Conferences*. 35 01005.
- [19] Sha, Y.D., Gao, Z.J., Xu, F., and Li, J.Y. (2011) Influence of Thermal Loading on the Dynamic Response of Thin-Walled Structure under Thermo-Acoustic Loading. *Advanced Engineering Forum*. 2–3 876–881.
- [20] Ersoy, H., Mercan, K., and Civalek, Ö. (2018) Frequencies of FGM shells and annular plates by the methods of discrete singular convolution and differential quadrature methods. *Composite Structures*. 183 7–20.
- [21] Kiani, Y. and Eslami, M.R. (2013) An exact solution for thermal buckling of annular FGM plates on an elastic medium. *Composites Part B: Engineering*. 45 (1), 101–110.
- [22] Zhang, D.-G. (2014) Thermal post-buckling and nonlinear vibration analysis of FGM beams based on physical neutral surface and high order shear deformation theory. *Meccanica*. 49 (2), 283–293.
- [23] Tornabene, F. and Viola, E. (2009) Free vibration analysis of functionally graded panels and shells of revolution. *Meccanica*. 44 (3), 255–281.
- [24] Yuan, W.X. and Dawe, D.J. (2002) Free vibration of sandwich plates with laminated faces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 54 (2), 195–217.
- [25] Tocci Monaco, G., Fantuzzi, N., Fabbrocino, F., and Luciano, R. (2021) Critical Temperatures for Vibrations and Buckling of Magneto-Electro-Elastic Nonlocal Strain Gradient Plates. *Nanomaterials*. 11 (1), 87.

- [26] Esen, I. and Özmen, R. (2024) Free and forced thermomechanical vibration and buckling responses of functionally graded magneto-electro-elastic porous nanoplates. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 52 (3), 1505–1542.
- [27] Esen, I., Abdelrhmaan, A.A., and Eltaher, M.A. (2022) Free vibration and buckling stability of FG nanobeams exposed to magnetic and thermal fields. *Engineering with Computers*. 38 (4), 3463–3482.

Research Article

Detection of Mental Well-Being Status Through Data-Driven Approaches

Aysun Kazak Saltı ^{1,*}  and Evrim Ersin Kangal ² 

Received: 13.01.2025

Accepted: 25.02.2025

¹Mersin University, Vocational School of Health Sciences, Medical Services and Techniques Department, First and Emergency Aid, Mersin, Türkiye; aysn1108@gmail.com

²Computer Technology and Information Systems, School of Applied Technology and Management of Erdemli, Mersin University, Erdemli/Mersin, Türkiye; evrimersin@gmail.com

*Corresponding Author.

Abstract: Mental well-being disorders are among the most significant challenges in the modern lifestyles, and it is well-established that early detection of diseases is essential for effective prevention. On the other hand, Machine Learning (ML) algorithms currently play a valuable role in disease detection. The aim of this study is not only to investigate the performance of various ML classifiers but also to propose a modern technique for mental health diagnosis. In this context, our research considers Bootstrap Aggregating (Bagging), Extremely Randomized Trees (ExtraTrees), Passive-Aggressive, Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Perceptron, and Stochastic Gradient Descent (SGD) algorithms, which are among the widely recognized ML classifiers in literature. To address the factors contributing to mental health illnesses among the selected individuals, we employ a three-phase data processing approach: segmentation, feature extraction, and classification. Analyzing feature importance from the selected dataset, our study highlights the significant impact of age, family history, and workplace environment on a worker's mental health status.

Keywords: machine learning; classifier; health

Araştırma Makalesi

Veri Odaklı Yaklaşımlar ile Zihinsel İyi Oluş Durumunun Tespiti

Özet: Ruhsal iyi oluş düzeyi bozuklukları, modern yaşam biçimlerinin en önemli sorunları arasında yer almaktadır ve hastalıkların erken teşhisinin etkili bir önleme için ne kadar önemli olduğu artık bilinen bir gerçektir. Diğer yandan, Makine Öğrenimi (MÖ) algoritmaları günümüzde hastalık tespitinde değerli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı yalnızca çeşitli ML sınıflandırıcılarının performansını araştırmak değil aynı zamanda ruh sağlığı tanısı için modern bir teknik sunmaktır. Bu bağlamda, araştırmamızda literatürde yaygın olarak bilinen ML sınıflandırıcılarından Bootstrap Aggregating (Bagging), Extremely Randomized Trees (ExtraTrees), Passive-Aggressive, Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Perceptron ve Stochastic Gradient Descent (SGD) algoritmaları ele alınmıştır. Seçilen bireylerde ruhsal sağlık hastalıklarına katkıda bulunan faktörleri ele almak için üç aşamalı bir veri işleme yaklaşımı kullanıyoruz: parçalara ayırma, özellik çıkarımı ve sınıflandırma. Ele alınan veri setindeki özellik önemini analiz eden araştırmamız, yaşın, aile geçmişinin ve işyeri ortamının bir çalışanın ruh sağlığı durumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: makine öğrenme; sınıflandırıcı; sağlık

1. Introduction

Data science relies on advanced methodologies and state-of-the-art numerical analysis algorithms to derive insights from data. In addition to this, the ML is a branch of Artificial Intelligence (AI) that enables computers to learn from large datasets through training without requiring explicit programming [1,2]. A learning machine refers to a high-dimensional input–output mapping, expressed as

$$\underset{\text{Algorithm}}{f} \left(\underset{\text{input}}{x} \right) = \underset{\text{Output}}{y}, \quad (1.1)$$

where the output may be discrete, continuous, or a combination of both. These algorithms process data, extract insights, and make determinations or predictions. Furthermore, classification is a data mining approach aimed at predicting the specific group memberships among diverse data instances and there is a variety of techniques tailored for this purpose [3,4]. A significant milestone in the ML domain was the development of Support Vector Machines (SVM), introduced by Vapnik and Cortes in 1995 [5], renowned for their strong theoretical foundation and precise results. Given the pivotal role of ML algorithms in analyzing data obtained from specific devices or tools, researchers across various disciplines such as medicine [6-8], economy [9, 10], cosmology [11-13], astrophysics [14], and meteorology [15, 16] are increasingly employing ML approaches to streamline and enhance their investigations.

On the other hand, the prevalence of mental illness is escalating rapidly on a global scale and the World Health Organization (WHO) projects that one in four individuals will encounter mental or neurological disorders at some point in their lives [17]. Mental health diagnosis is a complex process that involves multiple steps and is not straightforward. It typically begins with a carefully structured interview that includes questions regarding the symptoms and medical history, and may also involve a physical examination in some cases [18, 19]. Diverse psychological assessments are also administered to ensure that the symptoms are solely attributable to the mental health condition and not to any other underlying issues. The overlap of factors and symptoms across various mental health conditions makes health condition diagnoses increasingly complex and, in some cases, may lead to the possibility of misdiagnosis. As the ML methods, grounded in concepts from probability and other disciplines, are well-suited to manage uncertain or incomplete information, researchers and healthcare professionals have progressively utilized the ML techniques for the analysis of mental health data. For instance, Reddy et al. [20] utilized six ML techniques to investigate stress patterns in working adults and to identify the primary factors that strongly influence stress levels. Next, in Ref. [21], the authors analyzed a dataset collected for the mental state of employees in a workplace and examined the factors influencing their mental health status via various ML approaches. Jain et al. [22] used eight well-known ML algorithms for a dataset of 1,429 individuals to construct precise and reliable predictive models, with the aim of improving decision-making accuracy and contributing to the reduction of suicide cases through diverse methodological approaches. Garriga et al. [23] proposed an ML model that utilizes electronic health records to monitor patients continuously for the risk of a mental health crisis within a 28-day timeframe. Rezapour and Hansen [24] focused on a survey data from the Inter-university Consortium for Political and Social Research and considered a range of statistical and ML techniques to investigate the effects of the COVID-19 pandemic on the mental health of frontline workers in the United States.

This investigation is based on a comprehensive mental health dataset [25] of 1,257 patients, encompassing a broad spectrum of variables, including demographic attributes, care options, family history, environmental conditions, workplace quality, and health-related behaviors. The variation in characteristic variables within the selected dataset, collected in the context of mental health issues among workers in an anonymous workplace, significantly influences the hyperparameter tuning, classification performance, and runtime of the ML model. In this context, it is important to determine and apply the right model and make the right intervention early to increase the performance of employees in the workplace.

Thereby our study not only addresses a critical gap in literature but also present a viable approach for the workplace directors by exploring the mental health status of individuals in the workplace through six mainstream ML algorithms.

2. Material and Method

The dataset used was structured in a tabular format, comprising 27 feature columns and 1,257 rows of individual data. It is crucial to emphasize at this point that the classification phase may present considerable challenges for the ML algorithms, and training the selected architecture with samples that lack adequate labeling information can lead to unreliable or meaningless predictions from the algorithm. The columns "Timestamp", "Country", "State" and "Comments" in the dataset were excluded from the analysis due to their minimal impact on the desired outcome. While country information could have provided valuable insights, the dataset's uneven distribution across countries limited its utility. The United States has the largest number of participants (751), followed by the United Kingdom (185) and Canada (72), while several other countries, such as Spain, Japan, and Nigeria, are represented by a single participant each. Drawing conclusions about a specific country's greater struggle with employee mental health would be misleading, as nearly 60% of the employees are citizens of the United States. Note that a brief review of the "States" column reveals its relevance only for respondents from the United States, prompting its exclusion from the analysis. Additionally, the "Comment" column contains a high proportion of missing values (70%), which is understandable given that it was an optional text field, and it is reasonable to expect that many respondents would leave it blank. Hence, a set of Python codes was employed for the data cleansing process, which involved standard procedures such as filling in missing data and addressing outliers. Subsequently, in the dataset under consideration, certain columns contained misspelled words (e.g., "femake" instead of "female" and "mail" instead of "male") and missing values (1% in the "self_employee" column and 21% in the "work_interfere" column). All of the misspellings in the data were corrected carefully, and the missing parts of the data were imputed with the most frequently occurring values. Subsequently, to identify an ML relationship between the independent variables and the selected attribute, categorical data must be transformed into numerical values using dummy variables. So, one can see that Table 1 provides variables and introductory information related to the individuals' conditions, including age, gender, employment status, family history of mental health, and prior treatment for mental health conditions. On the other hand, Table 2 presents parameters that may be associated with mental health status, derived from individuals' workplace environment information. Furthermore, in our ML analysis, the attribute "treatment" is used as the target feature, while the other features presented in Tables 1 and 2 are considered as predictors. The reader can also see the numerical counterparts of the categorical data in these tables to be used in the ML analyses.

Table 1. Demographic Variables extracted from the selected mental health data

Variable	Meaning	Values
Age	Age	Below 45 (0), 46-55 (1), Above 56 (2)
Gender	Gender	Male (0), Female (1), Non-Binary (2)
self_employed	Operating own business	No (0), Yes (1)
family_history	Family history of mental health	No (0), Yes (1)
Treatment	Received care for any mental health condition	No (0), Yes (1)

Table 2. Workplace factors extracted from the selected mental health data

Factor	Meaning	Values
work_interfere	Effect of mental state on performance	Sometimes (0), Often (1), Rarely (2), Never (3)
no_employees	Number of employees	1-5 (0), 6-25 (1), 26-100 (2), 101-500 (3), 501-100 (3), >1001 (4)
remote_work	Doing work remotely	No (0), Yes (1)
coworkers	Talking about a mental health concern with coworkers	No (0), Yes (1), Sometimes (2)
benefits	Benefits offered by employer	No (0), Yes (1), Don't know (2)
care_options	Care options available	No (0), Yes (1), Not Sure (2)
well_prog	Worker wellness program	No (0), Yes (1), Don't know (2)
seek_help	Support for mental challenges	No (0), Yes (1), Don't know (2)
anonymity	Anonymity	No (0), Yes (1), Don't know (2)
obs_conseq	Observed mental issues	No (0), Yes (1)
mh_conseq	Hiding mental health condition	No (0), Yes (1), Maybe (2)
ph_conseq	Hiding physical health condition	No (0), Yes (1), Maybe (2)
leave	Take time off for mental health reasons	Don't know (0), Very Easy (1), Somewhat Easy (2), Very Difficult (3), Somewhat Difficult (4)
tech_company	Tech-based organization	No (0), Yes (1)
supervisor	Talking with supervisors	No (0), Yes (1), Some of Them (2)
mh_interview	mental health concern in an interview with potential employer	No (0), Yes (1), Maybe (2)
ph_interview	Physical health concern in an interview with potential employer	No (0), Yes (1), Maybe (2)
ment_vs_phys	employer treats mental issues with the same level of importance as physical health case	No (0), Yes (1), Don't know (2)

According to traditional statistics, the mental health status of an employee shows a significant correlation with the features gender, family_history, work_interfere, coworkers, benefits, care_options, well_prog, seek_help, anonymity, obs_conseq, mh_conseq, leave, mh_interview, and ment_ve_phys. However, no significant differences were found in relation to Age (p-value is 0.449), self_employed (p-values is 0.625), no_employed (p-values is 0.137), remote_work (p-values is 0.384), ph_conseq (p-values is 0.246), tech_company (p-values is 0.283), supervisor (p-values is 0.420), and ph_interview (p-values is 0.203).

We have now reached the stage where we can provide information about the method we follow for the ML algorithms. The sample-based ML architectures are computationally simple and are frequently associated with various models of human learning [26]. In this context, Instance-Based Learning (IBL) is a fundamental ML method that uses the nearest neighbor approach [27]. In Figure 1, we present the flow chart of classifier modeling.

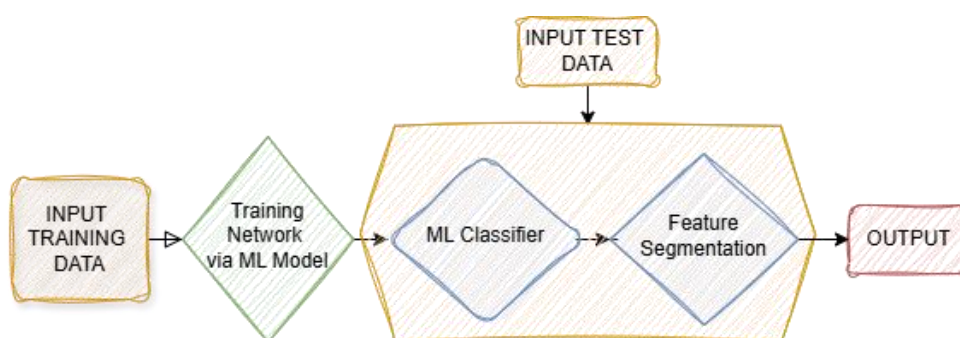


Figure 1. The workflow of classifier modeling

In the present investigation, we consider six different ML architectures in order to perform classification analysis within the scope of this study:

- **Bootstrap Aggregating (Bagging) Classifier:** Developed by Breiman in 1996 [28], this method is designed to improve the performance of models with high variance, such as decision trees.
- **Extremely Randomized Trees (ExtraTrees) Classifier:** This model, a variant of the decision tree approach, seeks to enhance prediction accuracy and generalizability by introducing a higher degree of randomness [29].
- **Passive-Aggressive Classifier:** This architecture, developed by Crammer, Dredze and Pereira in 2006 [30], is an online learning method that facilitates continuous updates to predictions by adapting to data streams, especially in large datasets.
- **Light Gradient Boosting Machine (LGBM) Classifier:** This architecture was developed by a team led by Ke [31] under the auspices of Microsoft Research. It was designed to address the limitations of traditional gradient boosting algorithms, offering an effective solution particularly for large-scale datasets and high-dimensional problems. By leveraging advanced techniques such as histogram-based feature binning and a leaf-wise tree growth strategy, the LGBM achieves superior computational efficiency and predictive performance, making it a powerful tool for modern machine learning challenges.
- **Perceptron Classifier:** The Perceptron model, developed by Rosenblatt in 1958 [32], is regarded as one of the fundamental building blocks of artificial neural networks and represents a significant milestone in the history of ML and AI. Inspired by the neural processes in the human brain, the model was constructed as a learning framework capable of performing classification tasks on linearly separable datasets.
- **Stochastic Gradient Descent (SGD) Classifier:** This is an efficient optimization method, particularly for large-scale datasets and high-dimensional problems [33]. By utilizing mini-

batches or individual data samples for weight updates, it significantly reduces memory usage and computational costs, making it highly suitable for scalable ML tasks.

The performance of ML processes can be assessed using a variety of evaluation metrics [34]. One of the most commonly utilized metrics is the confusion matrix, which is organized in a manner that enables the identification of true (T) and false (F) values derived from the classification results. Note that the confusion matrix offers a thorough assessment of a model's performance across various classes. In binary classification tasks, it is commonly represented as a 2×2 matrix, as shown in Figure 2.

		Predicted Values	
		Positive (P)	Negative (N)
Actual Values	Positive (P)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	Negative (N)	False Positive (FP)	True Negative (TN)

Figure 2. Main structure of a confusion matrix

Thence, the performance of an ML algorithm can be assessed through a variety of metrics, including accuracy, precision, recall, and the F1-score [35]:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{Total Instances}}, \quad (2.1)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}, \quad (2.2)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \quad (2.3)$$

$$\text{F1 - score} = 2 \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad (2.4)$$

Accuracy, also referred to as the recognition rate, is taken into account as the ratio of correctly classified test instances to the total number of test samples, while the average accuracy across all classes reflects the classifier's overall performance. Precision quantifies the exactness of a classifier, representing the proportion of instances classified as positive that are truly positive. It reflects the classifier's capacity to minimize the incorrect labeling of negative samples as positive. Recall assesses the completeness of a classifier, indicating the proportion of actual positive instances that are correctly identified. This interesting metric reflects the classifier's ability to capture all positive samples. The F1-score is the harmonic mean of precision and recall, offering a balanced metric that accounts for the trade-off

between these two performance measures. This quantity can be useful in scenarios involving imbalanced datasets, as it incorporates both false positives and false negatives. The performance evaluation metrics discussed here are crucial for determining which of the machine learning approaches we compare in this study yields the most successful results on the mental health data under consideration.

3. Data Analysis

The chosen mental health dataset was partitioned into training (879 employees, 70%) and test (378 employees, 30%) parts. To evaluate the performance of diverse ML techniques, we examine individual features from the dataset, where each category represents the mental health status of an employee. This approach resulted in two distinct groups: one including individuals with mental health issues and the other comprising those without. This type of grouping is frequently used in comparative analyses to examine the role of each feature and its effect on the performance of the chosen ML approach. To further strengthen our investigation, we also examine the influence of features on the outcome variable. It is known that feature importance refers to the process of identifying which attributes within a dataset have the greatest influence on a model's estimations [36]. This process aids in pinpointing the most significant factors for predicting the target outcome, allowing the model to focus on these critical features. Understanding feature importance is crucial for improving model performance by facilitating more effective feature selection, enhancing interpretability, and mitigating the risk of overfitting through the removal of irrelevant or less impactful features. In this study, the Python environment, coupled with the Jupyter Notebook interface [37], was employed to analyze the data and assess feature importance. So, Table 3 outlines the chosen values for key hyperparameters in the ML classifiers utilized in this study. These selections are based on commonly reported values in the existing literature and were refined through several preliminary tests.

Table 3. Hyperparameters of the selected ML architectures

Classifier	Hyperparameter	Value
Bagging and ExtraTrees	Number of Random State	42
	Number of Estimators	100
Passive-Aggressive, Perceptron and SGD	Maximum Iteration	100
	Number of Random State	42
	Stopping Criterion	0.001
LGBM	Learning Rate	0.09
	Number of Classes	2
	Number of Random State	42

Figures 3 and 4 present the performance results of the chosen ML architectures applied to our dataset. As previously noted, accuracy, precision, recall, and the F1-score are the metrics used to evaluate the performance of an ML model. Focusing on the accuracy values, it is clear that the Bootstrap Aggregating (Bagging) classifier surpasses the other ML approaches in performance on the given dataset, attaining a value of 0.74. The performance of the other models, in descending order, is as follows: the Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Extremely Randomized Trees (ExtraTrees), Perceptron, Stochastic Gradient Descent (SGD) and the Passive-Aggressive. Given that accuracy is a fundamental metric for evaluating classification performance, the results presented in Figure 4 indicate that the Bootstrap Aggregating (Bagging) regressor yields the most effective model fit for the selected mental health dataset. Likewise, when considering the additional metrics of precision, recall, and F1-score, the results presented in Figure 4 affirm that the Bagging Classifier model emerges as the highest-performing approach for our dataset.

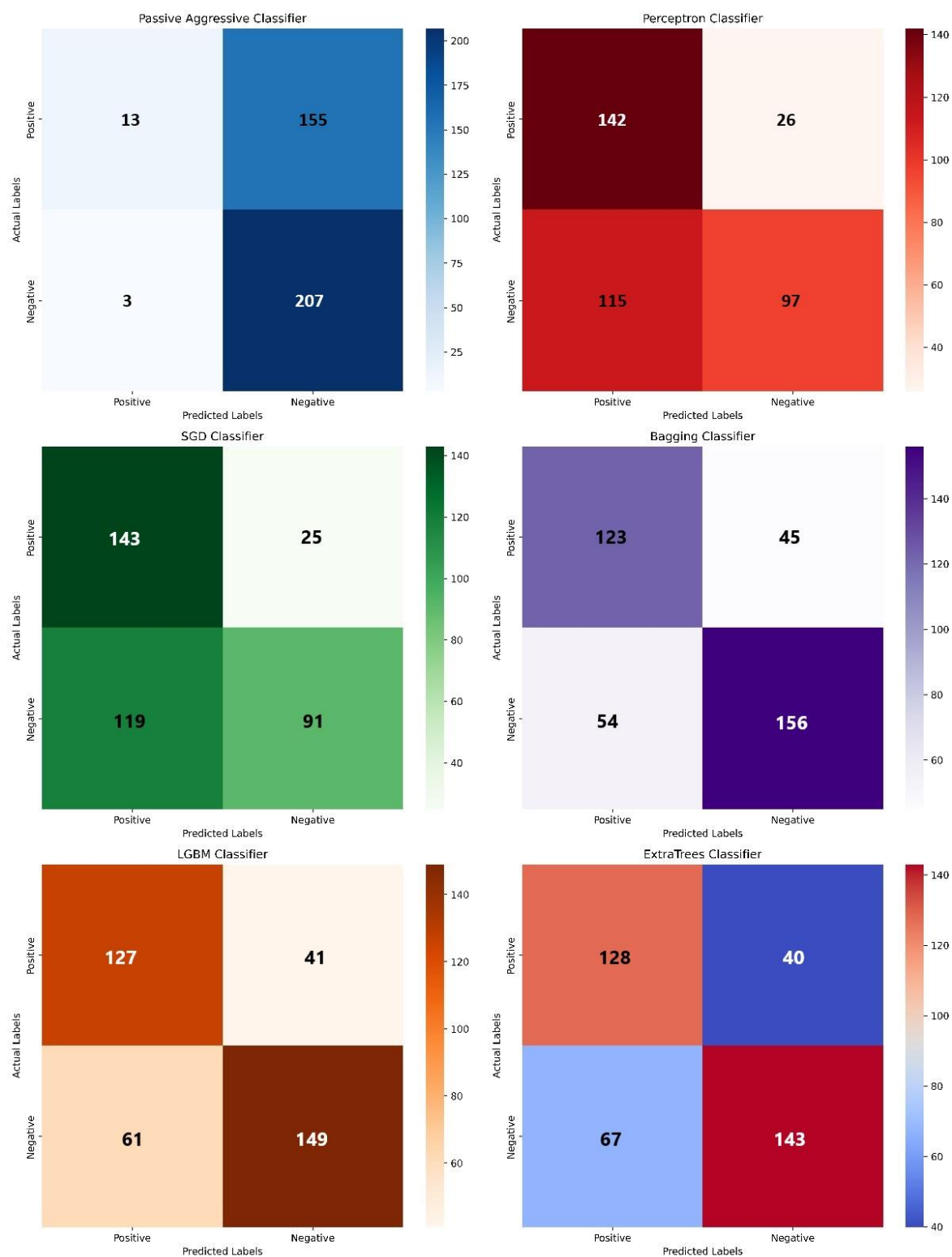


Figure 3. Confusion matrices for the ML models

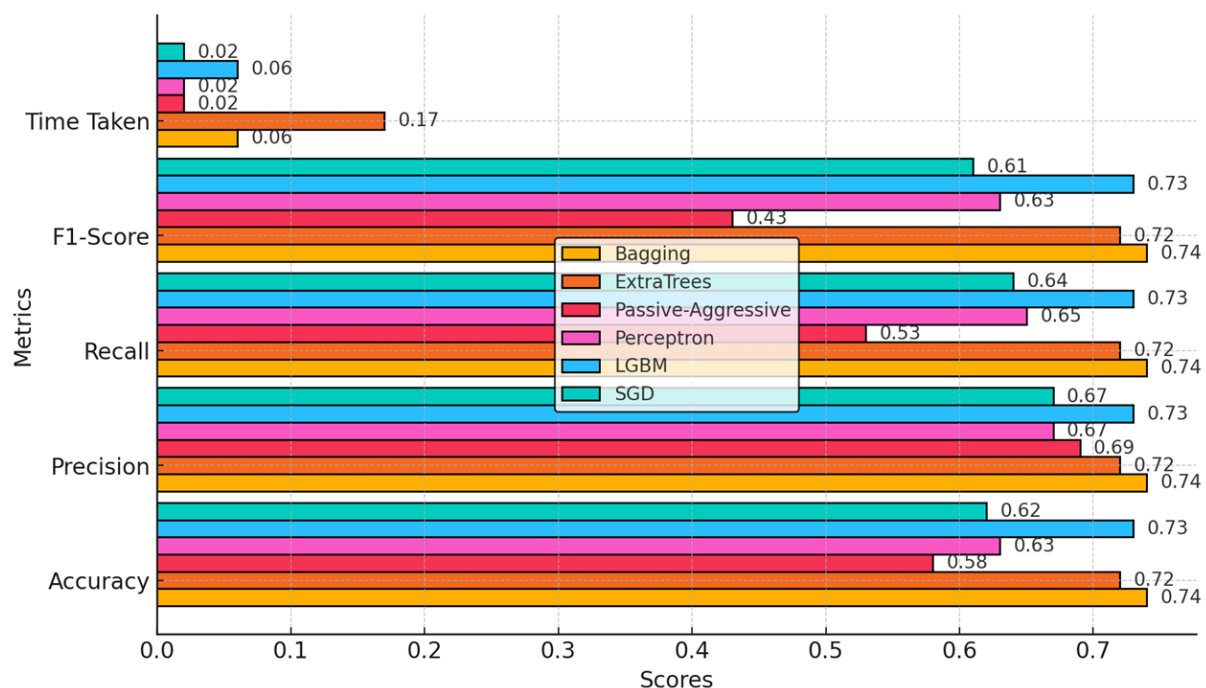


Figure 4. Performance results for the selected ML classifiers

Next, Figure 5 presents the Receiver Operating Characteristic (ROC) and Precision-Recall (PR) curves, which illustrate the comparative performance of the ML models employed for the binary classification task under investigation. It is evident that the Bagging Classifier achieves the highest Area Under the Curve (AUC) score of 0.79, alongside an Average Precision (AP) score of 0.79. These metrics demonstrate that the Bagging model outperforms the others in effectively discriminating between the positive and negative classes. In contrast, the Passive-Aggressive model exhibits the lowest performance among the evaluated models, with an Area Under the Curve (AUC) of 0.72 and an Average Precision (AP) of 0.72. These results indicate that the Passive-Aggressive classifier performs relatively poorly in distinguishing between the positive and negative classes compared to the other approaches.

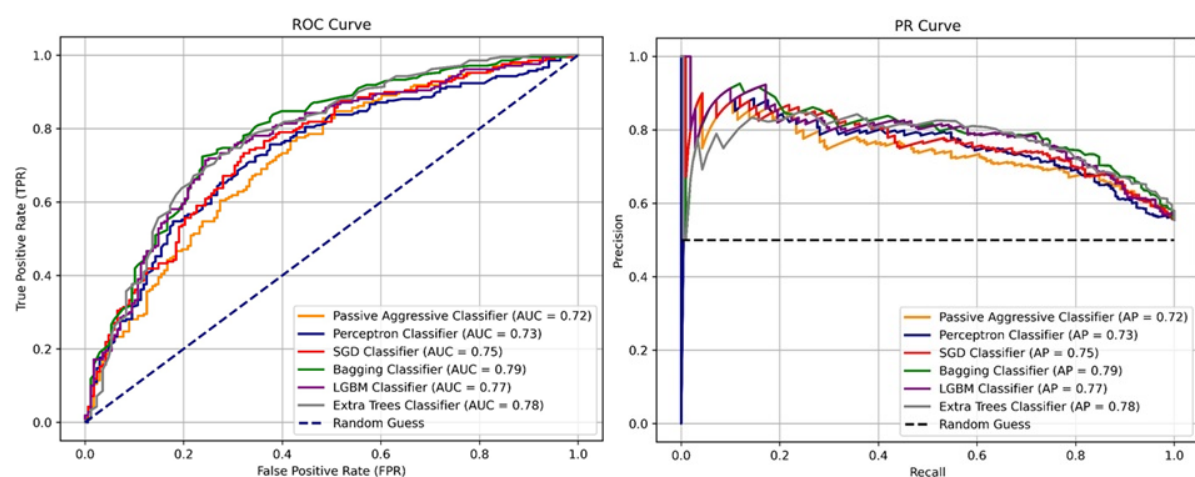


Figure 5. ROC (left) and PR (right) curves

In the subsequent phase of our research, we conduct a detailed examination of the specific contributions of each feature within the dataset. In this context, Figure 6 presents the results of feature importance analysis derived from the selected ML models. These analyses identify and rank the factors influencing

an individual's mental health. Based on the results obtained from the Bagging model, which demonstrates the highest accuracy rate, it is evident that the five most critical factors influencing an employee's mental state are work_interfere, family history, Age, no_employees, and care_options. Among individuals with a family history of mental health issues, the proportion of those receiving treatment (Yes) is notably higher than those not receiving treatment (No). This indicates that such a family history may play a crucial role in raising awareness and motivating individuals to seek professional help.

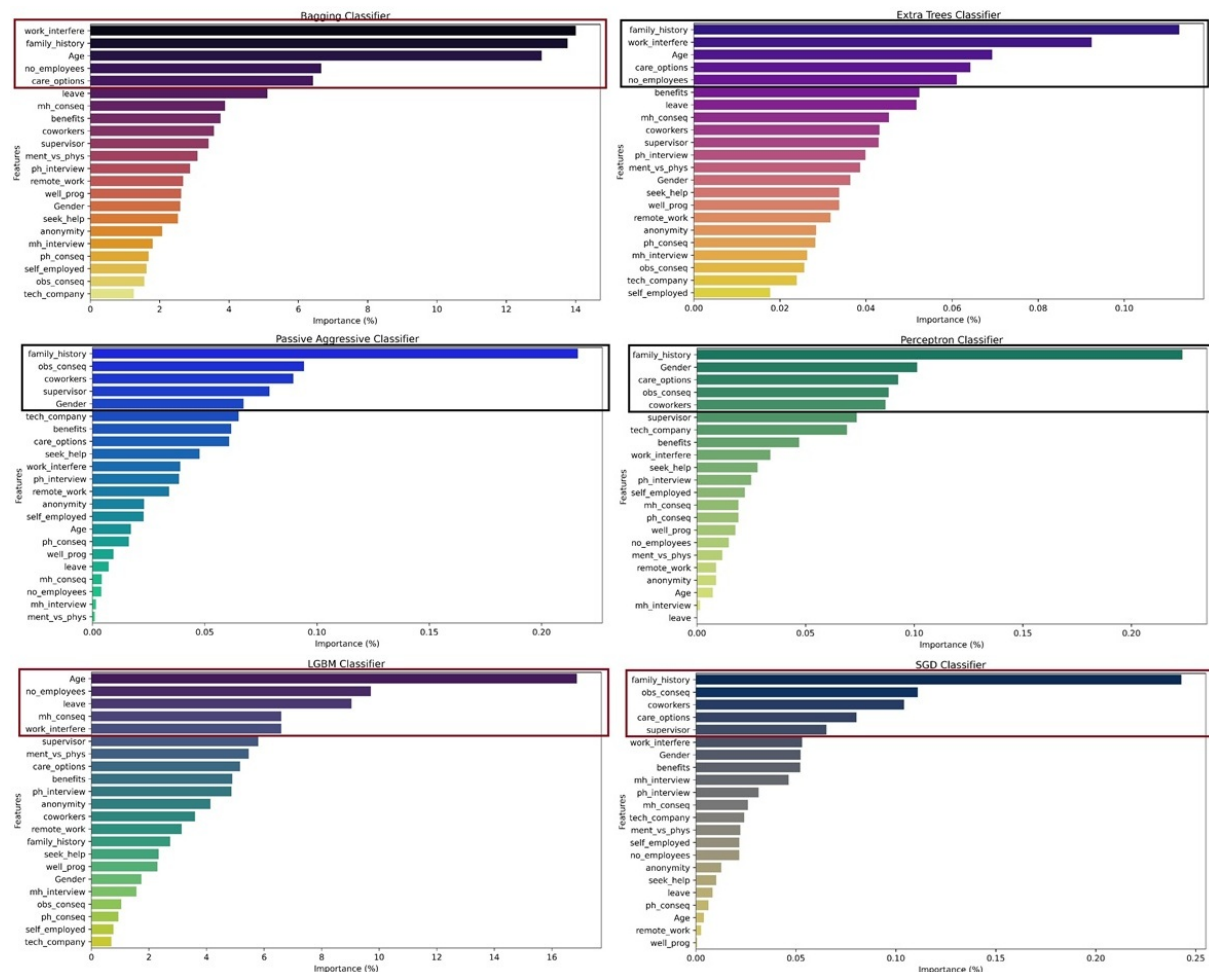


Figure 6. Illustration of our feature importance analysis

Moreover, prioritizing the factors that have the most significant impact on an individual's mental health, as identified by all models, will enable us to derive additional novel inferences. Considering all models, the factors coded as work_interfere, family history, age, no_employees, and care_options, along with obs_conseq, gender, coworkers, and leave, can be regarded as influential determinants of an individual's mental well-being level.

4. Clinical Prospects

The foundational step in conducting interdisciplinary research within behavioral science is to clearly establish the intended research objective. This typically involves selecting between two key computational strategies: forecasting a specific label or constructing a rule-based framework to define the label. Through the objective quantification of behavior using the ML algorithms, we can systematically track behavioral dynamics over extended periods. This creates significant opportunities, enabling the assessment of trajectories both preceding and following a diagnosis, as well as the evaluation of responses to

pharmacological or behavioral interventions. Moreover, as a component of a strategy to enhance a patient's behavioral health, offering healthcare professionals objective feedback on their practices through ML applications can substantially aid in their professional growth. Therefore, clinicians can become better equipped to track patient progress and adjust their approaches as needed through a detailed ML-based analysis of therapy and diagnostic sessions. These circumstances make the ML-based data analysis crucial within the context of clinical applications. In addition, an AI-driven diagnostic tool has the potential to identify diseases at their early stages by rapidly analyzing health data, thereby enabling healthcare professionals, including nurses and doctors, to expedite the treatment process and minimize errors. Consequently, the AI enhances decision-making processes, elevates the quality of care, and strengthens patient safety, all while alleviating the workload within healthcare settings. However, it is crucial to address considerations related to the ethical implementation of these technologies, safeguarding data privacy, and ensuring proper integration into clinical workflows.

Although we have highlighted the potential of ML algorithms in conducting behavioral analysis of employees to improve mental health, as the field progresses, key questions that require careful consideration emerge. For instance, it is vital that healthcare professionals receive comprehensive training to ensure the effective use of AI tools. In this regard, the ML-based researches serve as a valuable guide for the healthcare sector. Currently, a range of expert systems are being utilized in medicine to detect mental health disorders early, thereby enabling more precise and efficient treatment approaches. The insights derived from the successful analysis of mental health data hold significant value for healthcare professionals, who play a key role in offering guidance on strategies to manage stress, anxiety, and depression. With a variety of ML techniques available for constructing expert systems, it becomes imperative to assess and choose the most suitable method to address the particular health challenge. Within this framework, incorporating existing technologies into every facet of mental health research and care can bridge gaps in scientific knowledge while fostering a trusted environment to advance new intervention methods.

5. Discussions

In this research, we have examined the Bagging, ExtraTrees, Passive-Aggressive, Perceptron, LGBM and the SGD classifiers to effectively assess the risk factors related to mental health among employees. The results unequivocally demonstrate that the Bagging algorithm surpasses the other methods in terms of the accuracy, AUC and the AP scores. Following the analysis of the selected dataset using the aforementioned regressors, we have identified key predictors, including work interference, family history, age, number of employees and care options, thereby confirming their associations with mental health-related behaviors. The application of ML techniques has further refined these insights, allowing for a more thorough understanding of the data and a ranking of the predictive significance of the variables previously discussed.

There is no doubt that computational science has a significant role to play in the study of human behavior, making this an exciting period for the ML researchers. Clearly, addressing the major challenges in mental health research and clinical practice requires a collaborative effort. Moreover, key computational objectives encompass interaction modeling along with behavior prediction. Subsequently, enduring scientific advances in mental health domain can be achieved if we can overcome the technical obstacles. Beyond the practical advantages of data integration, the ML has the potential to provide valuable theoretical advancements in areas such as the theory of mind.

Acknowledgment

The authors would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The authors declare no competing interests.

Research and Publication Ethics Statement

The data is sourced from an open-access database, so there is no need for an ethics committee's evaluation.

Data Availability Statement

The data used to support the findings of this study and the code used are available from the corresponding author upon reasonable request.

References

- [1] Doupe, P., Faghmous, J. and Basu, S. (2006). *Data mining: Introductory and advanced topics*, Pearson Education India.
- [2] Ghahramani, Z. (2004). Unsupervised learning. *Advanced lectures on machine learning*, Springer; pp. 72-112.
- [3] Dunham, M.H. (2006). *Data mining: Introductory and advanced topics*. Pearson Education India.
- [4] Kotsiantis, S.B. (2007). Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. *Informatica*, 31, 249–268
- [5] Cortes, C. and Vapnik, V.N. (1995). Support Vector Network, *Machine learning*, 20, 1-25.
- [6] Panch, T., Szolovits, P. and Atun, R. (2018). Artificial intelligence, machine learning and health systems. *J. Glob. Health*, 8(2), 020303.
- [7] Doupe, P., Faghmous, J. and Basu, S. (2019). Machine Learning for Health Services Researchers. *Value in Health*, 22, 808-815.
- [8] Husnain, A., et al. (2024). Advancements in Health through Artificial Intelligence and Machine Learning: A Focus on Brain Health. *Revista Española de Documentación Científica*, 18(01), 100-123.
- [9] Gogas, P. and Papadimitriou, T. (2021). Machine Learning in Economics and Finance. *Computational Economics*, 57, 1-4.
- [10] Shami, L. and Lazebnik, T. (2024). Implementing Machine Learning Methods in Estimating the Size of the Non-observed Economy. *Computational Economics*, 63, 1459–1476.
- [11] Ntampaka, M., et al. (2019). A Deep Learning Approach to Galaxy Cluster X-Ray Masses. *ApJ*, 876, 82.
- [12] Kangal, E.E., Salti, M. and Aydogdu, O. (2019). Machine learning algorithm in a caloric view point of cosmology. *Physics of the Dark Universe*, 26, 100369.
- [13] Tilaver, H., Salti, M., Aydogdu, O. and Kangal, E.E. (2021). Deep learning approach to Hubble parameter. *Computer Physics Communications*, 261, 107809.
- [14] Salti, M., Kangal, E.E. and Aydogdu, O. (2021). Evolution of CMB temperature in a Chaplygin gas model from deep learning perspective. *Astronomy and Computing*, 37, 100504.
- [15] Chase, R.J., et al. (2022). A Machine Learning Tutorial for Operational Meteorology - Part I: Traditional Machine Learning. *Weather and Forecasting*, 37(8), 1509–1529.
- [16] Buster, G., Benton, B.N., Glaws, A. and King, R.N. (2024) High-resolution meteorology with climate change impacts from global climate model data using generative machine learning. *Nature Energy*, 9, 894-906.
- [17] Sumathi, M.R. and Poorna, B. (2016). Prediction of Mental Health Problems Among Children Using Machine Learning Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(1), 552-557.
- [18] Powers, S.I., Hauser, S. T. and Kilner, L.A. (1989). Adolescent mental health. *American Psychologist*, 44(2), 200–208.
- [19] Bhugra D., Till A. and Sartorius N. (2013). What is mental health? *International Journal of Social Psychiatry*, 59(1), 3-4.

- [20] Reddy, U.S., Thota, A.V. and Dharun, A. (2018). Machine Learning Techniques for Stress Prediction in Working Employees, *2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, (pp. 1-4), Madurai, India.
- [21] Katarya, R. and Maan, S. (2020). Predicting Mental health disorders using Machine Learning for employees in technical and non-technical companies, *2020 IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering (ICADEE)*, (pp. 1-5), Coimbatore, India.
- [22] Jain, T., Jain, A., Hada, P.S., Kumar, H., Verma, V. K. and Patni, A. (2021). Machine Learning Techniques for Prediction of Mental Health, *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, (pp1 1606-1613), Coimbatore, India.
- [23] Garriga, R., Mas, J., Abraha, S. et al. (2022). Machine learning model to predict mental health crises from electronic health records. *Nat Med* 28, 1240–1248.
- [24] Rezapour, M. and Hansen, L. (2022). A machine learning analysis of COVID-19 mental health data. *Scientific Reports*, 12, 14965.
- [25] Mulye, A. (2021). Mental Health at Workplace. Kaggle.
- [26] Hall, M.A. (1999). Correlation-based Feature Selection for Machine Learning. PhD Thesis / University of Waikato, Hamilton, New Zealand.
- [27] Cunningham, S.J., Littin, J. and Witten, I.H. (1997). Applications of machine learning in information retrieval. University of Waikato Technical Report 97/6.
- [28] Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 24(2), 123-140.
- [29] Geurts, P., Ernst, D. and Wehenkel, L. (2006). Extremely randomized trees. *Machine Learning*, 63(1), 3-42.
- [30] Crammer, K., Dredze, M., & Pereira, F. (2006). Passive-Aggressive Algorithms for Huge Online Tasks. *Journal of Machine Learning Research*, 7, 551-585.
- [31] Ke, G. et al. (2017). LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. *31st Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, CA, USA.
- [32] Rosenblatt, F. (1958). The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65(6), 386-408.
- [33] Bottou, L. (1998). Stochastic Gradient Descent. *Online Learning and Neural Networks*, MIT Press.
- [34] Caruana, R., Niculescu-Mizil, A. (2004). Data mining in metric space: an empirical analysis of supervised learning performance criteria. *Proceedings of the 10th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, Seattle-WA, USA.
- [35] Labatut, V. and Cherifi, H. (2011). Evaluation of Performance Measures for Classifiers Comparison. *Ubiquitous Computing and Communication Journal*, 6:21-34.
- [36] Chen, T., et al. (2019). Prediction of Extubation Failure for Intensive Care Unit Patients Using Light Gradient Boosting Machine. *IEEE Access*, 7, 150960-150968.
- [37] Project Jupyter. Jupyter Notebook: The Classic Notebook Interface. Available at the website <https://jupyter.org>.

Research Article

Analysis of Total Umbilical Fibers in Riemannian Submersions with Quarter Symmetric Non-Metric Connections

Esra Karataş^{1, *}, Semra Zeren² and Mustafa Altın³

Received : 26.07.2024

Accepted : 28.02.2025

¹ Department of Mathematics, İnönü University, Malatya, Türkiye; esrakrts4422@gmail.com

² Department of Engineering Fundamental Sciences, Sivas University of Science and Technology, Sivas, Türkiye; zerensemra@sivas.edu.tr

³ Department of Mathematics, Bingöl University, Bingöl, Türkiye; maltin@bingol.edu.tr

*Corresponding author

Abstract: In this study, we examine the geometric properties of Riemannian submersions with quarter symmetric non-metric connections. Our work provides a comprehensive analysis of the Weyl projective curvature tensor, the concircular curvature tensor, and the conharmonic curvature tensor. We also investigate how these curvature tensors interact with the total umbilic fibers, particularly focusing on their behavior when such fibers are present in Riemannian submersions. First we introduce basic properties of quarter symmetric non-metric connections. Subsequently, we compute the relevant curvature tensors and analyze their interplay with total umbilic fibers. In this context, we elucidate relationships between various curvature tensors and certain geometric properties, as well as the effects of these relationships on Riemannian submersions.

Keywords: curvature tensors; quarter symmetric non-metric connection; riemannian manifold; riemannian submersion.

Araştırma Makalesi

Quarter Simetrik Non-Metrik Konneksiyonlu Riemann Submersiyonlarda Total Umbilik Liflerin Analizi

Özet: Bu çalışmada quarter simetrik non-metrik konneksiyona sahip Riemann submersiyonların geometrik özellikleri incelenmektedir. Çalışma, Weyl projektif eğrilik tensörü, koncircular eğrilik tensörü ve konharmonic eğrilik tensorlerine ilişkin kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Ayrıca bu eğrilik tensörlerinin total um-bilik lifler üzerindeki etkileşimleri de araştırılmaktadır. Ek olarak söz konusu tensörlerin Riemann submersiyonlarında total umbilik liflerinin varlığı durumu ortaya çıkan yapısal özellikleri de ele alınmaktadır. İlk olarak, quarter simetrik non-metrik konneksiyonların tanımı ve temel özellikleri incelenmekte, sonrasında bu konneksiyonların Riemann submersiyonları üzerindeki etkileri incelenmektedir. Eğrilik tensörleri hesaplanarak total umbilik liflerle etkileşimleri analiz edilmektedir. Bu bağlamda, farklı eğrilik tensörlerinin geometrik özelliklerinin birbiri ile ilişkisi ve Riemann submersiyonları üzerindeki etkileri ortaya konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: eğrilik tensörleri; quarter simetrik non-metrik konneksiyon; riemann manifoldu; riemann submersiyonu.

1. Introduction

Connections play a crucial role in geometry and various scientific disciplines. Quarter symmetric non-metric connection is a notable example of such geometric structures. Friedmann and Schouten [1] introduced the concept of semi-symmetric non-metric connections with in a differentiable manifold. Later, Hayden [2] investigated of metric connections with torsion in Riemannian manifold. Subsequently Yano [3] introduced a new method called semi-symmetric metric connection focusing on a Riemannian manifold containing this connection. Many researchers [4-6] have conducted further studies on semi-symmetric and non-metric connections.

The investigation of Riemannian submersions between Riemannian manifolds was pioneered by O'Neill [7] and Gray [8]. Later; this research was extended to include manifolds with differentiable structures. Riemannian submersion theory finds active application in various fields. Moreover, Riemannian submersions have been the focus on extensive research (see [9-17]).

Akyol and Beyendi investigated Riemannian submersions endowed with a semi-symmetric non-metric connections [18]. Additionally, Sarı conducted a research on semi-invariant Riemannian submersions and investigated the application of semi-symmetric non-metric connections [19]. On the other hand, Demir and Sarı extensively examined the application of Riemannian submersions with semi-symmetric metric connections in their studies [20]. In 1975, Golab introduced the concept of quarter symmetric connection in a differentiable manifold [21]. In 2021, Demir and Sarı introduced Riemannian submersions with quarter symmetric non-metric connections and investigated the geometric properties of these new submersions by examining them in depth, focused on the basic tensor fields of Riemannian submersions related to quarter symmetric non-metric connections and calculated the relevant Riemannian curvatures [22].

Curvature tensors are essential mathematical tools that are utilized in theoretical physics and mathematics, especially in the study of gravitational theory and geometry. These tensors are used to quantify and characterize gravity's effects as well as the curvature of spaces. The Riemannian curvature tensor is a crucial tool in differential geometry, specifically for defining the curvature of n – dimensional spaces, such as Riemannian manifolds. Among curvature tensors, the Riemannian curvature tensor is the most well-known; however, other curvature tensors, such as the Ricci tensor and scalar curvature, also play significant roles in differential geometry. A new class of curvature tensors on Riemannian manifolds, including the concircular curvature tensor, was introduced by Mishra in the work [23]. Building on this work, Pokhariyal and Mishra [24] further developed the Weyl projective curvature tensor for Riemannian manifolds. Afterward, Ojha [25] introduced the M –projective curvature tensor. The conditions for the conharmonic curvature tensor were investigated in 1988 by M. Doric et al. [26], particularly in the context of Kaehler hypersurfaces in complex space forms. Furthermore, Ahsan [27] investigated the relativistic implications of the concircular curvature tensor. G. Hall conducted a thorough analysis of projectively linked connections on space-time manifolds in 2018, paying particular attention to the Weyl projective tensor, which is based on Einstein's geodesic postulate [28]. In the field of mathematics, these tensors play a crucial role in categorizing Riemannian and pseudo-Riemannian manifolds, thereby enhancing our comprehension of the diverse geometric structures that can exist. Lately, Akyol and Ayar [29] have been conducting research on New curvature tensors along Riemannian submersions. Their work contributes to the exploration of these tensors within the context of Riemannian submersions.

Building on these foundational ideas we first introduce the foundational concepts of Riemannian submersion, quarter symmetric non-metric connection, and Riemannian submersion with a quarter symmetric non-metric connection, which will be essential for the subsequent sections. Within this framework we conduct detailed calculations for various curvature tensors, including the Weyl projective curvature tensor, concircular and conharmonic curvature tensors. Furthermore, we analyze the behavior of these curvature tensors in the presence of totally umbilic fibers under Riemannian submersion, offering an in-depth examination of their properties in this specific geometric context.

2. Preliminaries

A linear connection $\tilde{\nabla}$ defined on M_1 is termed symmetric if the torsion $\tilde{T}$ of $\tilde{\nabla}$ expressed as

$$\tilde{T}(X_1, X_2) = \tilde{\nabla}_{X_1} X_2 - \tilde{\nabla}_{X_2} X_1 - [X_1, X_2],$$

vanishes for all vector fields X_1 and X_2 in M_1 . In case it does not equal zero, it is denoted as non-symmetric [2].

Let (M_1, g_1) be an n -dimensional Riemannian manifold, and let

$$\tilde{\nabla}_{X_1} X_2 = \nabla_{X_1} X_2 + \eta(X_2)\varphi X_1 \quad (2.1)$$

connection be a linear connection on the Riemannian manifold (M_1, g_1) . Here, X_1 and X_2 are arbitrary vector fields, η is a 1-form on M_1 associated with the vector field U_1 on M_1 via $\eta(X_2) = g_1(U_1, X_2)$, ∇ is the Levi-Civita connection, and φ is a (1,1)-type tensor field. For all $X_1, X_2 \in \Gamma(TM_1)$, the torsion tensor of the M_1 manifold with the $\tilde{\nabla}$ connection is calculated as

$$\tilde{T}(X_1, X_2) = \eta(X_2)\varphi X_1 - \eta(X_1)\varphi X_2$$

$$(2.2)$$

using the equation (2.1). On the other hand, for $\forall X_1, X_2 \in \Gamma(TM_1)$ and Riemannian metric g_1 , the relation

$$(\tilde{\nabla}_{X_1} g_1)(X_2, X_3) = -\eta(X_2)g_1(\varphi X_1, X_3) - \eta(X_3)g_1(X_2, \varphi X_1) \quad (2.3)$$

is derived from equation (2.1). The linear connection $\tilde{\nabla}$ defined by (2.1) is termed a quarter symmetric non-metric connection for the $\tilde{\nabla}$ connection since it satisfies equations (2.2) and (2.3) [21].

A differentiable transformation $f: M_1 \rightarrow M_2$ between Riemannian manifolds (M_1, g_1) and (M_2, g_2) , with dimensions m_1 and m_2 , respectively, is termed a Riemannian submersion if the following conditions are satisfied:

- i.) f has maximal rank.
- ii.) The transformation f_{*p} preserves the lengths of horizontal vectors $X_p \in \Gamma(\mathcal{H}_p)$ at each point $p \in M_1$.

On the other hand, for $\exists \in \mathbb{R}, f^{-1}(q)$ is $(m_1 - m_2)$ -dimensional submanifold of $\mathbb{R}_1$. The submanifolds $f^{-1}(q)$ are called the fibers of the submersion. A vector field on $\mathbb{R}_1$ is termed a vertical vector field if it is always tangent to the fibers; if it is orthogonal to the fibers, it is called a horizontal vector field. If the vector field X_1 is a horizontal vector field on the manifold $\mathbb{R}_1$ and X_1 is f -related to the vector field X_1' on the manifold M_2 , then X_1 is called the fundamental vector field [30].

In this study, we will denote vertical vector fields and horizontal vector fields with the symbols $\mathcal{V}$ and $\mathcal{H}$, respectively.

Lemma 2.1 Let $(\mathbb{R}_1, \mathbb{R}_1)$ and $(\mathbb{R}_2, \mathbb{R}_2)$ be Riemannian manifolds, and let $f: M_1 \rightarrow M_2$ be Riemannian submersion. In this case, following expressions hold:

- i. $g_1(X_1, X_2) = g_2(X_1', X_2') \circ f$.
- ii. For the fundamental vector field $h[X_1, X_2]$, $f_* h[X_1, X_2] = [X_1', X_2'] \circ f$.
- iii. The fundamental vector field $h(\nabla_{X_1} X_2)$ is f -related to $(\nabla'_{X_1'}, X_2')$ where ∇ and ∇' are the Levi-Civita connections on M_1 and M_2 respectively.
- iv. For any $U_1 \in \Gamma(\mathcal{V})$, $[X_1, U_1] \in \Gamma(\mathcal{V})$,
where X_1 and X_2 are basic vector fields that are f -related to X_1' and X_2' respectively [31].

The distribution $\mathcal{V}$ corresponds to the foliation of $\mathbb{R}_1$ by setting $\mathcal{V}_p = \ker f_p$ for any $p \in \mathbb{R}_1$. At each point p , $\mathcal{V}_p$ is defined as vertical space, where $\mathcal{V}$ represents the vertical distribution. The sections of $\mathcal{V}$

are determined as a Lie subalgebra, denoted as $\chi^v(\mathbb{B}_1)$, of the tangent bundle $\chi(\mathbb{B}_1)$. The complementary distribution of $\mathcal{V}$ produced by the Riemannian metric $\mathbb{B}_1$ is denoted by $\mathcal{H}$. Hence, the orthogonal decomposition $T_p\mathbb{B}_1 = \mathcal{V}_p \oplus \mathcal{H}_p$ at any $p \in \mathbb{B}_1$ is referred to as the horizontal space at p . Given any $E \in \chi(\mathbb{B}_1)$, where vE and hE denote the vertical and horizontal components of E respectively [31].

O'Neill tensor fields are determined by a Riemannian submersion $f: M_1 \rightarrow M_2$. The following are the fundamental tensor fields:

$$\mathcal{T}_E F = h\nabla_{vE} vF + v\nabla_{vE} hF, \quad (2.4)$$

$$\mathcal{A}_E F = v\nabla_{hE} hF + h\nabla_{hE} vF, \quad (2.5)$$

for any $E, F \in \chi(M_1)$, where v and h represent the vertical and horizontal projections, respectively. Moreover

$$\nabla_{U_1} U_2 = \mathcal{T}_{U_1} U_2 + v\nabla_{U_1} U_2, \quad (2.6)$$

$$\nabla_{U_1} X_1 = \mathcal{T}_{U_1} X_1 + h\nabla_{U_1} X_1, \quad (2.7)$$

$$\nabla_{X_1} U_1 = \mathcal{A}_{X_1} U_1 + v\nabla_{X_1} U_1, \quad (2.8)$$

$$\nabla_{X_1} X_2 = \mathcal{A}_{X_1} X_2 + h\nabla_{X_1} X_2, \quad (2.9)$$

where $X_1, X_2 \in \chi^h(M_1)$; $U_1, U_2 \in \chi^v(M_1)$. Furthermore, if X_1 is a basic vector field, then, $h\nabla_{U_1} X_1 = h\nabla_{X_1} U_1 = \mathcal{A}_{X_1} U_1$. We note that $\mathcal{T}_{U_1} U_2 = \mathcal{T}_{U_2} U_1$ [30].

Definition 2.2 Let $(\mathbb{B}_1, \mathbb{B}_1)$ be a Riemannian manifold with Levi-Civita connection ∇ . In this case the Riemannian curvature tensor R is defined as

$$R(X, Y)Z = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z,$$

where X, Y, Z are vector fields on $\mathbb{B}_1$.

At a point p in $\mathbb{B}_1$, a Riemannian manifold with metric $\mathbb{B}_1$, the sectional curvature K_p defined as follows:

$$K_p = \frac{g_1(R(X_1, X_2)X_2, X_1)}{\|X_1\|^2 \|X_2\|^2 - g_1(X_1, X_2)^2}. \quad (2.10)$$

Furthermore, the Ricci curvature, denoted as Ric , is characterized as follows:

$$\text{Ric}: C_2^\infty(TM_1) \rightarrow C_0^\infty(TM_1) \text{ by } \text{Ric}(X_1, X_2) = \sum_{i=1}^m g_1(R(X_1, e_i)e_i, X_2).$$

Thus, the scalar curvature τ is obtained as

$$\tau = \sum_{j=1}^m R_i(e_j, e_j) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m g_1(R(e_i, e_j)e_j, e_i), \quad (2.11)$$

where $\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ signifies any local orthonormal frame for the tangent bundle [32].

In this work, $S(X_1, X_2)$ is used to signify $\text{Ric}(X_1, X_2)$.

Definition 2.3 Let (M_1, g_1) be a Riemannian manifold. An f -adapted local orthonormal frame $\{X_i, U_j\}$ with $1 \leq i \leq n$ and $1 \leq j \leq r$ is defined such that each X_i is horizontal and each U_j is vertical [31].

Lemma 2.4 Given two Riemannian manifolds (M_1, g_1) and (M_2, g_2) , let f be a Riemannian submersion between them. Then we have:

$$\sum_{i=1}^n g_1(\mathcal{T}_{U_1} X_i, \mathcal{T}_{U_2} X_i) = \sum_{j=1}^r g_1(\mathcal{T}_{U_1} U_j, \mathcal{T}_{U_2} U_j), \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^n g_1(\mathcal{A}_{X_1} X_i, \mathcal{A}_{X_2} X_i) = \sum_{j=1}^r g_1(\mathcal{A}_{X_1} U_j, \mathcal{A}_{X_2} U_j), \quad (2.13)$$

$$\sum_{i=1}^n g_1(\mathcal{A}_{X_1} X_i, \mathcal{T}_{U_1} X_i) = \sum_{j=1}^r g_1(\mathcal{A}_{X_1} U_j, \mathcal{T}_{U_1} U_j), \quad (2.14)$$

where $X_1, X_2 \in \chi^h(M_1)$, $U_1, U_2 \in \chi^v(M_1)$, and $\{X_i, U_j\}$ is an f -adaptable frame on (M_1, g_1) [31].

Definition 2.5 Let the manifold (M_1, g_1) is Riemannian manifold and $\mathcal{V}$ be the local orthonormal frame of the vertical distribution. In this case we introduce horizontal vector field $\mathcal{N}$ on (M_1, g_1) defined as follows [31]:

$$\mathcal{N} = \sum_{j=1}^r \mathcal{T}_{U_j} U_j. \quad (2.15)$$

Let us write

$$\tilde{\nabla}_{X_1} X_2 = \nabla_{X_1} X_2 + \eta(X_2) \varphi X_1, \quad (2.16)$$

where X_1, X_2 any vector fields on M_1 and η is a 1-form, and φ is a (1,1)-type tensor field.

Note that we will abbreviate the Riemannian submersions with quarter-symmetric non-metric connections as Q-SNMC.

Let $f: M_1 \rightarrow M_2$ be a Riemannian submersion from a Riemannian manifold M_1 to a Riemannian manifold M_2 equipped with Q-SNMC. In this case, expression (2.16) yields

$$\tilde{\mathcal{T}}(E, F) = \tilde{\mathcal{T}}_E F = \mathcal{T}_E F + \eta(vF) h\varphi(vE) + \eta(hF) v\varphi(vE), \quad (2.17)$$

$$\tilde{\mathcal{A}}(E, F) = \tilde{\mathcal{A}}_E F = \mathcal{A}_E F + \eta(hF) v\varphi(hE) + \eta(vF) h\varphi(hE), \quad (2.18)$$

for tensor fields of type (1,2) $\mathcal{T}$ and $\mathcal{A}$ on M_1 with respect to $\tilde{\nabla}$, where $E, F \in \Gamma(TM_1)$ [22].

Consider (M_1, g_1) and (M_2, g_2) as Riemannian manifolds, and let $\tilde{\nabla}$ denote a Q-SNMC. Furthermore, suppose $f: M_1 \rightarrow M_2$ is a Riemannian submersion mapping from a Riemannian manifold M_1 to another Riemannian manifold M_2 endowed with a Q-SNMC. In this case following equations are obtained:

$$\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_2 = \tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_1 + \eta(vU_2) h\varphi(vU_1) - \eta(vU_1) h\varphi(vU_2), \quad (2.19)$$

$$\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} X_1 = \mathcal{T}_{U_1} X_1 + \eta(hX_1) v\varphi(vU_1), \quad (2.20)$$

$$\tilde{\mathcal{A}}_{X_1} X_2 = -\tilde{\mathcal{A}}_{X_2} X_1 + \eta(hX_2) v\varphi(hX_1) + \eta(hX_1) v\varphi(hX_2), \quad (2.21)$$

$$\tilde{\mathcal{A}}_{X_1} U_1 = \mathcal{A}_{X_1} U_1 + \eta(vU_1) h\varphi(hX_1), \quad (2.22)$$

where $U_1, U_2 \in \Gamma(\mathcal{V})$, $X_1, X_2 \in \Gamma(\mathcal{H})$ [22].

On the other hand, the following equations are derived using equation (2.16):

$$\tilde{\nabla}_{U_1} U_2 = \tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_2 + \hat{\nabla}_{U_1} U_2 - \eta(U_2) \varphi(U_1), \quad (2.23)$$

$$\tilde{\nabla}_{U_1} X_1 = \mathcal{T}_{U_1} X_1 + h\tilde{\nabla}_{U_1} X_1 + \eta(X_1) v\varphi(U_1), \quad (2.24)$$

$$\tilde{\nabla}_{X_1} U_1 = \mathcal{A}_{X_1} U_1 + v\tilde{\nabla}_{X_1} U_1 + \eta(U_1) h\varphi(X_1), \quad (2.25)$$

$$\tilde{\nabla}_{X_1} X_2 = \mathcal{A}_{X_1} X_2 + h\tilde{\nabla}_{X_1} X_2 + \eta(X_2) v\varphi(X_1), \quad (2.26)$$

where $U_1, U_2 \in \Gamma(\mathcal{V})$, $X_1, X_2 \in \Gamma(\mathcal{H})$, and $\hat{\nabla}_{U_1} U_2 = v\tilde{\nabla}_{U_1} U_2$.

Theorem 2.6 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ being a Riemannian submersion. Let $\tilde{R}$, R' and $\hat{R}$ be the Riemannian curvature tensors of M_1 , M_2 , and the fiber $(f^{-1}(x), \hat{g}_x)$ with respect to a Q-SNMC, respectively. In this case, the following equations are obtained:

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(U_1, U_2)U_3, U_4) &= g_1(\hat{R}(U_1, U_2)U_3, U_4) - g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_2} U_3) \varphi(U_1), U_4) + g_1(\mathcal{T}_{U_1} \tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_3, U_4) \\ &\quad + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_3) v\varphi(U_1), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \eta(U_3) \varphi(U_2), U_4) + g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1} U_3) \varphi(U_2), U_4) \\ &\quad - g_1(\mathcal{T}_{U_2} \tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_3, U_4) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_3) v\varphi(U_2), U_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \eta(U_3) \varphi(U_1), U_4) \end{aligned}$$

$$(2.27) \quad +g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1, U_2]), U_4),$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(U_1, U_2)U_3, X_1) &= g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}\tilde{\nabla}_{U_2}U_3, X_1) - g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_2}U_3)\varphi(U_1), X_1) + g_1(h\tilde{\nabla}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3, X_1) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2), X_1) - g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}\tilde{\nabla}_{U_1}U_3, X_1) + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2), X_1) - g_1(h\tilde{\nabla}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3, X_1) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1), X_1) - g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{[U_1, U_2]}U_3, X_1) + g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1, U_2]), X_1), \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(X_1, X_2)X_3, X_4) &= g_1(R'(X_1, X_2)X_3, X_4) + g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_1}X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_2}X_3) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)h\varphi(X_2), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), X_4) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), X_4), \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(X_1, X_2)X_3, U_1) &= g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(X_1), U_1) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}X_3, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3, U_1) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1, X_2]), U_1), \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(X_1, U_1)X_2, U_2) &= g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2)v\varphi(X_1), U_2) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{U_1}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2, U_2) \\ &- \eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)g_1(v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_2) \\ &- g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_2) - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_1]), U_2), \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(X_1, X_2)U_1, X_3) &= g_1(h(\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}U_1, X_3) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1, X_3) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1)h\varphi(X_1), X_3) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(h\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}U_1, X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1, X_3) \\ &- g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_1)h\varphi(X_1), X_3) - g_1(\mathcal{A}_{[X_1, X_2]}U_1, X_3) \\ &- g_1(\eta(U_1)h\varphi([X_1, X_2]), X_3), \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{R}(X_1, U_1)U_2, U_3) &= g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\tilde{\nabla}_{U_1}U_2, U_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_3, \tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_2) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_2)v\varphi(X_1), U_3) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_2)\varphi(U_1), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}U_3, \mathcal{A}_{X_1}U_2) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}U_2)v\varphi(U_1), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_2, U_3) \\ &+ g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_2)\varphi(U_1), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_2)h\varphi(X_1), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{[X_1, U_1]}U_2, U_3) \\ &+ g_1(\eta(U_2)\varphi([X_1, U_1]), U_3), \end{aligned} \quad (2.33)$$

where $U_1, U_2, U_3, U_4 \in \Gamma(\mathcal{V})$, $X_1, X_2, X_3, X_4 \in \Gamma(\mathcal{H})$.

Proof: If the Riemannian curvature tensor from Definition(2.2) is used for $U_1, U_2, U_3 \in \Gamma(\mathcal{V})$, then the relation $\tilde{R}(U_1, U_2)U_3 = \tilde{\nabla}_{U_1}\tilde{\nabla}_{U_2}U_3 - \tilde{\nabla}_{U_2}\tilde{\nabla}_{U_1}U_3 - \tilde{\nabla}_{[U_1, U_2]}U_3$ is obtained. By multiplying this equation by $U_4 \in \Gamma(\mathcal{V})$ and using equation (2.23) and (2.24), the equation (2.27) is easily established. The other equations can be derived in a similar manner.

Proposition 2.7 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ being a Riemannian submersion. Let $\tilde{S}$, S' and $\hat{S}$ be the Ricci tensors of M_1 , M_2 , and the fiber

$(f^{-1}(x), \hat{g}_{1x})$ with respect to a Q-SNMC $\tilde{V}$, respectively. In this case, the following equations are obtained:

$$\begin{aligned} \tilde{S}(U_1, U_2) = & \hat{S}(U_1, U_2) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_2) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}}) v\varphi(U_1), U_2) + \sum_i \{-g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i} U_i) \varphi(U_1), U_2) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \eta(U_i) \varphi(U_i), U_2) + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_1} U_i) (\varphi(U_i), U_2) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_2) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i) v\varphi(U_i), U_2) \\ & + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i) \varphi(U_1), U_2) + g_1(\eta(U_i) \varphi([U_1, U_i]), U_2)\} - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_1} X_j, U_2) \\ & - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_2, h\tilde{\nabla}_{U_1} X_j) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1} X_j) v\varphi(X_j), U_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j) v\varphi(U_1), U_2) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_2) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j) g_1(\varphi(U_1), U_2)) + g_1(\mathcal{T}_{U_1} U_2, h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j) \\ & - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j) g_1(v\varphi(U_1), U_2)) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \eta(X_j) v\varphi(X_j), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]} X_j, U_2) \\ & - g_1(\eta(X_j) v\varphi([X_j, U_1]), U_2)\}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}(X_1, X_2) = & S'(X'_1, X'_2) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_1} X_2) - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1} \mathcal{T}_{U_i} X_2, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1} U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i} X_2) \\ & + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i} X_2) v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1} \eta(X_2) v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i} \mathcal{A}_{X_1} X_2, U_i) \\ & + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1} X_2) \varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1} X_2) v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i} \eta(X_2) v\varphi(X_1), U_i) \\ & - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]} X_2, U_i) - g_1(\eta(X_2) v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1} X_j, \mathcal{A}_{X_2} X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1} X_2, \mathcal{A}_{X_j} X_j) \\ & + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j) h\varphi(X_1), X_2) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1} X_j) h\varphi(X_j), X_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1} \eta(X_j) v\varphi(X_j), X_2) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j) v\varphi(X_1), X_2)\}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}(X_1, U_1) = & \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1} \mathcal{A}_{X_i} X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_1} U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i} X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i} X_i) v\varphi(X_1), U_1) \\ & + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1} \eta(X_i) v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i} \mathcal{A}_{X_1} X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i} U_1, h\tilde{\nabla}_{X_1} X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1} X_i) v\varphi(X_i), U_1) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i} \eta(X_i) v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_i) v\varphi([X_1, X_i]), U_1)\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1} \hat{\nabla}_{U_j} U_j, U_1) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{X_1} \eta(U_j) \varphi(U_j), U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j} U_1, \mathcal{A}_{X_1} U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1} U_j) v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j} v\tilde{\nabla}_{X_1} U_j, U_1) \\ & + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1} U_j) \varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j} \eta(U_j) h\varphi(X_1), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_1, U_j]} U_j, U_1) \\ & + g_1(\eta(U_j) \varphi([X_1, U_j]), U_1) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_1} U_1) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}}) v\varphi(X_1), U_1)\}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

where, $U_1, U_2 \in \Gamma(\mathcal{V})$, $X_1, X_2 \in \Gamma(\mathcal{H})$, $\tilde{\mathcal{N}} = \sum_{j=1}^r \tilde{\mathcal{T}}_{U_j} U_j$, and $\{X_i, U_j\}$ is an f -adaptable frame on (M_1, g_1) .

Proof: Let $\tilde{S}(U_1, U_2) = \sum_i g_1(\tilde{R}(U_1, U_i)U_i, U_2) + \sum_j g_1(\tilde{R}(U_1, X_j)X_j, U_2)$.

By utilizing equations (2.27) and (2.31), equation (2.34) can be derived with ease. The proofs of the other equations can similarly be demonstrated.

Theorem 2.8 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ being a Riemannian submersion. Let $\tilde{\tau}$, τ' , $\hat{\tau}$ denote the scalar curvatures of M_1 , M_2 , and $(f^{-1}(x), \hat{g}_{1x})$ fibre respectively, and let $\{X_i, U_j\}$ be an f -adaptable frame on (M_1, g_1) . Then, the scalar curvature of the Riemannian manifold M_1 with Q-SNMC $\tilde{\nabla}$ is as follows:

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} = & \tau' \circ f + \hat{\tau} - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{N}) + \sum_i \{g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{T}_{U_i}X_i, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_i) + \\ & g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_i)v\varphi(X_i), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_i}X_i)\varphi(U_i), U_i) \\ & - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_i, U_i]}X_i, U_i) \\ & - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_i, U_i]), U_i)\} + \sum_{i,j} \{-g_1(\mathcal{A}_{X_i}X_j, \mathcal{A}_{X_i}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_i}X_i, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ & + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_i), X_i) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_i}X_j)h\varphi(X_j), X_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_i) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_i), X_i) - g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_j), U_j) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_i)\varphi(U_i), U_j) + \\ & g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_j}U_i)\varphi(U_i), U_j) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_j}U_i, \mathcal{T}_{U_i}U_j) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_j}U_i)v\varphi(U_i), U_j) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_j), U_j) \\ & + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_j, U_i]), U_j)\} - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_j}X_j, U_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_j, h\tilde{\nabla}_{U_j}X_j) \\ & + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_j}X_j)v\varphi(X_j), U_j) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_j), U_j) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\mathcal{A}_{X_j}X_j, U_j) \\ & + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_j), U_j) + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_j), U_j) \\ & - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_j) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_j]}X_j, U_j) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_j]), U_j) \\ & + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_j), U_j)\}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Proof: By applying equations (2.34) and (2.35) to the equation

$$\tilde{\tau} = \sum_i \tilde{S}(X_i, X_i) + \sum_j \tilde{S}(U_j, U_j)$$

the equation (2.37) is easily obtained.

3. Calculations of Curvature Tensors in Riemannian Submersions with Quarter-Symmetric Non-Metric Connections

3.1 Weyl projective curvature tensor

In this section using Q-SNMC in the context of Riemannian submersions the relationships related to the Weyl projective curvature tensor between the base space, the total space, and the fiber bundles are examined.

Definition 3.1 Let M_1 be an n -dimensional C^∞ manifold. In this scenario, within the n -dimensional space V^n , for every $X_1, X_2, X_3 \in \chi(M_1)$, the Weyl projective curvature tensor field of M_1 is defined as follows:

$$\tilde{P}(X_1, X_2)X_3 = \tilde{R}(X_1, X_2)X_3 - \frac{1}{n-1} \{ \tilde{S}(X_2, X_3)X_1 - \tilde{S}(X_1, X_3)X_2 \}, \quad (3.1)$$

where $\tilde{R}$ and $\tilde{S}$ denote the Riemannian curvature tensor and Ricci curvature tensor of the total space, respectively [23].

Theorem 3.2 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with, $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ representing a Riemannian submersion, and $\tilde{R}, R'$, and $\hat{R}$ denote the Riemannian curvature tensors, $\tilde{S}, S'$, and $\hat{S}$ represent the Ricci tensors of M_1 , M_2 , and the fiber $(f^{-1}(x), \hat{g}_{1x})$ respectively. Then, for every $U_1, U_2, U_3, U_4 \in \chi^v(M_1)$ and $X_1, X_2, X_3, X_4 \in \chi^h(M_1)$, the following Weyl projective curvature tensor relations hold:

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{P}(X_1, X_2)X_3, X_4) &= g_1(R'(X_1, X_2)X_3, X_4) + g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_1}X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_2}X_3) \\ &+ \eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)g_1(h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)h\varphi(X_2), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), X_4) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), X_4) - \frac{1}{(n-1)} \{ g_1(X_1, X_4)[S'(X'_2, X'_3) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3) \\ &- \sum_i \{ g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{T}_{U_i}X_3, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_2), U_i) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)\varphi(U_i), U_i) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_2), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_2, U_i]}X_3, U_i) \\ &- g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_2, U_i]), U_i) \} + \sum_j \{ -g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_j, \mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_3, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_j)h\varphi(X_j), X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_3) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_2), X_3) \} - g_1(X_2, X_4)[S'(X'_1, X'_3) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3) \\ &- \sum_i \{ g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_3, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_1), U_i) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_3, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)\varphi(U_i), U_i) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]}X_3, U_i) \\ &- g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1, U_i]), U_i) \} + \sum_j \{ -g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_3, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_3) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_3) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_3) \} \}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$g_1(\tilde{P}(X_1, X_2)X_3, U_1) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(X_1), U_1) \\ + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}X_3, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3, U_1) \\ - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1, X_2]), U_1), \quad (3.3)$$

$$g_1(\tilde{P}(X_1, U_1)X_2, U_2) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2)v\varphi(X_1), U_2) \\ + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{U_1}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2, U_2) \\ - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_2) \\ - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_1]), U_2) + \frac{1}{(n-1)}\{g_1(U_1, U_2)[S'(X'_1, X'_2) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2) \\ - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_2, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2)v\varphi(X_1), U_i) \\ + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_i), U_i) \\ - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]}X_2, U_i) \\ - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_2}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_2, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_2) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_2) \\ - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_2)\}], \quad (3.4)$$

$$g_1(\tilde{P}(U_1, U_2)U_3, X_1) = g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}\hat{\nabla}_{U_2}U_3, X_1) - g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_2}U_3)\varphi(U_1), X_1) + g_1(h\tilde{\nabla}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3, X_1) \\ - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2), X_1) - g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}\hat{\nabla}_{U_1}U_3, X_1) + g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2), X_1) - g_1(h\tilde{\nabla}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3, X_1) \\ + g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1), X_1) - g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{[U_1, U_2]}U_3, X_1) + g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1, U_2]), X_1), \quad (3.5)$$

$$g_1(\tilde{P}(U_1, U_2)U_3, U_4) = g_1(\hat{R}(U_1, U_2)U_3, U_4) - g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_2}U_3)\varphi(U_1), U_4) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3, U_4) \\ + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3)v\varphi(U_1), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2), U_4) + g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2), U_4) \\ - g_1(\mathcal{T}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3, U_4) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3)v\varphi(U_2), U_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1), U_4) \\ + g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1, U_2]), U_4) - \frac{1}{n-1}\{g_1(U_1, U_4) \cdot [\hat{S}(U_2, U_3) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{T}_{U_2}U_3) \\ + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_2), U_3) + \sum_i \{-g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_2), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_i)\varphi(U_i), U_3) \\ + g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_2}U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_i, \mathcal{T}_{U_i}U_3) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_i)v\varphi(U_i), U_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_2), U_3) \\ + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_2, U_i]), U_3)\} - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_2}X_j, U_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_3, h\tilde{\nabla}_{U_2}X_j) \\ + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_2}X_j)v\varphi(X_j), U_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_2), U_3) - g_1(\hat{\nabla}_{U_2}\mathcal{A}_{X_j}X_j, U_3) \\ + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_2), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_2}U_3, h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_2), U_3) \\ - g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_3) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_2]}X_j, U_3) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_2]), U_3)\} \\ - g_1(U_2, U_4)[\hat{S}(U_1, U_3) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{T}_{U_1}U_3) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_1), U_3) + \sum_i \{-g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_1), U_3) \\$$

$$\begin{aligned}
& -g_1(\tilde{v}_{U_1}\eta(U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\eta(\tilde{v}_{U_i} U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_3) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i)v\varphi(U_i), U_3) \\
& + g_1(\tilde{v}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_1), U_3) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_3) - \sum_j \{g_1(v\tilde{v}_{X_j}\mathcal{T}_{U_1} X_j, U_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_3, h\tilde{v}_{U_1} X_j) \\
& + g_1(\eta(h\tilde{v}_{U_1} X_j)v\varphi(X_j), U_3) + g_1(\tilde{v}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_1), U_3) - g_1(\tilde{v}_{U_1} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_3) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_1), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_1} U_3, h\tilde{v}_{X_j} X_j) - g_1(\eta(h\tilde{v}_{X_j} X_j)v\varphi(U_1), U_3) \\
& - g_1(\tilde{v}_{U_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_3) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]} X_j, U_3) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_3)\}, \quad (3.6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& g_1(\tilde{P}(X_1, X_2)U_1, X_3) = g_1(h\tilde{v}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2} U_1, X_3) + g_1(\mathcal{A}_{X_1} v\tilde{v}_{X_2} U_1, X_3) + g_1(\eta(v\tilde{v}_{X_2} U_1)h\varphi(X_1), X_3) \\
& + g_1(\tilde{v}_{X_1}\eta(U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(h\tilde{v}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1} U_1, X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_2} v\tilde{v}_{X_1} U_1, X_3) \\
& - g_1(\eta(v\tilde{v}_{X_1} U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\tilde{v}_{X_2}\eta(U_1)h\varphi(X_1), X_3) - g_1(\mathcal{A}_{[X_1, X_2]} U_1, X_3) \\
& - g_1(\eta(U_1)h\varphi([X_1, X_2]), X_3) - \frac{1}{n-1} \{g_1(X_1, X_3) [\sum_i \{g_1(v\tilde{v}_{X_2}\mathcal{A}_{X_i} X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2} U_1, h\tilde{v}_{X_i} X_i) \\
& + g_1(\eta(h\tilde{v}_{X_i} X_i)v\varphi(X_2), U_1) + g_1(\tilde{v}_{X_2}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{v}_{X_i}\mathcal{A}_{X_2} X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i} U_1, h\tilde{v}_{X_2} X_i) \\
& - g_1(\eta(h\tilde{v}_{X_2} X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{v}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_2, X_i]), U_1)\} \\
& \sum_j \{g_1(v\tilde{v}_{X_2}\tilde{v}_{U_j} U_j, U_1) - g_1(\tilde{v}_{X_2}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j} U_1, \mathcal{A}_{X_2} U_j) \\
& - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2} U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{v}_{U_j} v\tilde{v}_{X_2} U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{v}_{X_2} U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& - g_1(\tilde{v}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_2), U_1) - g_1(\tilde{v}_{[X_2, U_j]} U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_2, U_j]), U_1) \\
& - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_2} U_1) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(X_2), U_1)\} - g_1(X_2, X_3) [\sum_i \{g_1(v\tilde{v}_{X_1}\mathcal{A}_{X_i} X_i, U_1) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_1} U_1, h\tilde{v}_{X_i} X_i) + g_1(\eta(h\tilde{v}_{X_i} X_i)v\varphi(X_1), U_1) + g_1(\tilde{v}_{X_1}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{v}_{X_i}\mathcal{A}_{X_1} X_i, U_1) \\
& + g_1(\mathcal{A}_{X_i} U_1, h\tilde{v}_{X_1} X_i) - g_1(\eta(h\tilde{v}_{X_1} X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{v}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_1), U_1) \\
& - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_1, X_i]), U_1)\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{v}_{X_1}\tilde{v}_{U_j} U_j, U_1) - g_1(\tilde{v}_{X_1}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& + g_1(\mathcal{T}_{U_j} U_1, \mathcal{A}_{X_1} U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1} U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{v}_{U_j} v\tilde{v}_{X_1} U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{v}_{X_1} U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& - g_1(\tilde{v}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_1), U_1) - g_1(\tilde{v}_{[X_1, U_j]} U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_1, U_j]), U_1) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_1} U_1) \\
& + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(X_1), U_1)\}. \quad (3.7)
\end{aligned}$$

Proof. We can easily prove the first equation by using equations (2.29) and (2.35) in equation (3.1) for the product of $\tilde{P}$ and X_4 . The proofs of the other equations can be done similarly.

We note that if $\mathcal{T}_U V = g_1(U, V) \cdot H$ then a Riemannian submersion is referred to as a Riemannian submersion with totally umbilical fibers, where H is the fiber's mean curvature vector field and $U, V \in \Gamma(\ker f_*)$ [33]. Moreover based on Doğru's study [34], if $\mathcal{N} = 0$, then $\tilde{\mathcal{N}} = 0$.

Corollary 3.3 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, and let $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ be a Riemannian submersion. If the Riemannian submersion contains total umbilical fibres ($\mathcal{N} = 0$), then the Weyl projective curvature tensor is given by

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{P}(X_1, X_2)X_3, X_4) &= g_1(R'(X_1, X_2)X_3, X_4) + g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_1}X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_2}X_3) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)h\varphi(X_2), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), X_4) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), X_4) - \frac{1}{(n-1)}\{g_1(X_1, X_4)[S'(X'_2, X'_3) \circ f - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{T}_{U_i}X_3, U_i) \\ &- g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_2), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_i) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)\varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_2), U_i) \\ &- g_1(\mathcal{T}_{[X_2, U_i]}X_3, U_i) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_2, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_j, \mathcal{A}_{X_3}X_j) \\ &- g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_3, \mathcal{A}_{X_j}X_j) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_j)h\varphi(X_j), X_3) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_2), X_3)\} - g_1(X_2, X_4)[S'(X'_1, X'_3) \circ f \\ &- \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_3, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_1), U_i) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_3, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)\varphi(U_i), U_i) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]}X_3, U_i) \\ &- g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_3, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_3) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_3) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_3)\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{P}(X_1, U_1)X_2, U_2) &= g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2)v\varphi(X_1), U_2) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{U_1}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2, U_2) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_2) \\ &- g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_1]), U_2) + \frac{1}{(n-1)}\{g_1(U_1, U_2)[S'(X'_1, X'_2) \circ f - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_2, U_i) \\ &- g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2)v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_i) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_i) \\ &- g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]}X_2, U_i) - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_2}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_2, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +g_1\left(\eta\left(\mathcal{A}_{X_j}X_j\right)h\varphi(X_1),X_2\right)-g_1\left(\eta\left(\mathcal{A}_{X_1}X_j\right)h\varphi(X_j),X_2\right)+g_1\left(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j),X_2\right) \\
& \quad -g_1\left(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1),X_2\right), \\
& g_1\left(\tilde{P}(U_1,U_2)U_3,U_4\right)=g_1\left(\hat{R}(U_1,U_2)U_3,U_4\right)-g_1\left(\eta\left(\widehat{\nabla}_{U_2}U_3\right)\varphi(U_1),U_4\right)+g_1\left(\mathcal{T}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3,U_4\right) \\
& \quad +g_1\left(\eta\left(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3\right)v\varphi(U_1),U_4\right)-g_1\left(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2),U_4\right)+g_1\left(\eta\left(\widehat{\nabla}_{U_1}U_3\right)\varphi(U_2),U_4\right) \\
& \quad -g_1\left(\mathcal{T}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3,U_4\right)-g_1\left(\eta\left(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3\right)v\varphi(U_2),U_4\right)+g_1\left(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1),U_4\right) \\
& \quad +g_1\left(\eta(U_3)\varphi([U_1,U_2]),U_4\right)-\frac{1}{n-1}\{g_1(U_1,U_4)\cdot[\hat{S}(U_2,U_3)+\sum_i\{-g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_2),U_3) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_i)\varphi(U_i),U_3)+g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_2}U_i)\varphi(U_i),U_3)+g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_i,\mathcal{T}_{U_i}U_3)-g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_i)v\varphi(U_i),U_3) \\
& \quad +g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_2),U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(U_i)\varphi([U_2,U_i]),U_3)\}-\sum_j\{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_2}X_j,U_3)-g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_3,h\tilde{\nabla}_{U_2}X_j) \\
& \quad +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_2}X_j)v\varphi(X_j),U_3)+g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_2),U_3)-g_1(\widehat{\nabla}_{U_2}\mathcal{A}_{X_j}X_j,U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_2),U_3)+g_1(\mathcal{T}_{U_2}U_3,h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)-g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_2),U_3) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j),U_3)-g_1(\mathcal{T}_{[X_j,U_2]}X_j,U_3)-g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j,U_2]),U_3)\} \\
& \quad -g_1(U_2,U_4)[\hat{S}(U_1,U_3)+\sum_i\{-g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_1),U_3) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_i)\varphi(U_i),U_3)+g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_1}U_i)\varphi(U_i),U_3)+g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_i,\mathcal{T}_{U_i}U_3)-g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_i)v\varphi(U_i),U_3) \\
& \quad +g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_1),U_3)+g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1,U_i]),U_3)\}-\sum_j\{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_1}X_j,U_3)-g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_3,h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j) \\
& \quad +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j)v\varphi(X_j),U_3)+g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_1),U_3)-g_1(\widehat{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_j}X_j,U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_1),U_3)+g_1(\mathcal{T}_{U_1}U_3,h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)-g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_1),U_3) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j),U_3)-g_1(\mathcal{T}_{[X_j,U_1]}X_j,U_3)-g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j,U_1]),U_3)\}], \\
& g_1(\tilde{P}(X_1,X_2)U_1,X_3)=g_1(h\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}U_1,X_3)+g_1(\mathcal{A}_{X_1}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1,X_3)+g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1)h\varphi(X_1),X_3) \\
& \quad +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_1)h\varphi(X_2),X_3)-g_1(h\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}U_1,X_3)-g_1(\mathcal{A}_{X_2}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1,X_3) \\
& \quad -g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1)h\varphi(X_2),X_3)-g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_1)h\varphi(X_1),X_3)-g_1(\mathcal{A}_{[X_1,X_2]}U_1,X_3) \\
& \quad -g_1(\eta(U_1)h\varphi([X_1,X_2]),X_3)-\frac{1}{n-1}\{g_1(X_1,X_3)[\sum_i\{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_i}X_i,U_1)-g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_1,h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) \\
& \quad +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_2),U_1)+g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_i)v\varphi(X_i),U_1)-g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_2}X_i,U_1)+g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1,h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_2, X_i], U_1)) \\
& \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\hat{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_2}U_j) \\
& -g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_2), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_2, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_2, U_j]), U_1) \\
& -g_1(X_2, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_1), U_1) \\
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_1}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_1, X_i], U_1))\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\hat{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_1}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j, U_1) \\
& +g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j)\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_1), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_1, U_j]}U_j, U_1) \\
& +g_1(\eta(U_j)\varphi([X_1, U_j], U_1))\},
\end{aligned}$$

where $U_1, U_2, U_3, U_4 \in \kappa^v(M_1)$ and, $X_1, X_2, X_3, X_4 \in \kappa^h(M_1)$.

3.2 Concircular curvature tensor

In Riemannian submersions endowed with Q-SNMC, we present the curvature relations of the concircular curvature tensor here.

Definition 3.4 Let M_1 be an n -dimensional manifold. In this case, within the n -dimensional space V^n , for every $X_1, X_2, X_3 \in \chi(M_1)$, the concircular curvature tensor field of M_1 is defined as follows:

$$\tilde{C}(X_1, X_2)X_3 = \tilde{R}(X_1, X_2)X_3 - \frac{\tilde{\tau}}{n(n-1)}\{g_1(X_2, X_3)X_1 - g_1(X_1, X_3)X_2\}, \quad (3.8)$$

where $\tilde{\tau}$ represents a scalar tensor [23].

Theorem 3.5 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with, $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ representing a Riemannian submersion endowed with Q-SNMC, and $\tilde{R}, R'$, and $\hat{R}$ denote the Riemannian curvature tensors, $\tilde{\tau}, \tau'$, and $\hat{\tau}$ represent the scalar curvature tensors of M_1, M_2 , and the fiber $(f^{-1}(x), \hat{g}_{1x})$ respectively. Then, for every $U_1, U_2, U_3, U_4 \in \kappa^v(M_1)$ and $X_1, X_2, X_3, X_4 \in \kappa^h(M_1)$, the following concircular curvature tensor relations hold:

$$\begin{aligned}
g_1(\tilde{C}(X_1, X_2)X_3, X_4) &= g_1(R'(X_1, X_2)X_3, X_4) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_2}X_3) + g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_1}X_3) \\
&+ \eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)g_1(h\varphi(X_1), X_4) - \eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)g_1(h\varphi(X_2), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), X_4) \\
&- g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), X_4) - \frac{\tilde{\tau}}{n(n-1)}[g_1(X_1, X_4)g_1(X_2, X_3) - g_1(X_2, X_4)g_1(X_1, X_3)],
\end{aligned}$$

$$g_1(\tilde{C}(X_1, X_2)X_3, U_1) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(X_1), U_1)$$

$$\begin{aligned}
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2),U_1)-g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}X_3,U_1)-g_1(\mathcal{A}_{X_2}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3,U_1) \\
& -g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(X_2),U_1)-g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1),U_1)-g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1,X_2]),U_1), \\
\\
& g_1(\tilde{C}(X_1,U_1)X_2,U_2)=g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_1}X_2,U_2)+g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2,U_2)+g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2)v\varphi(X_1),U_2) \\
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_1),U_2)-g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_1}X_2,U_2)+g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_1),U_2) \\
& -g_1(\mathcal{T}_{U_1}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2,U_2)-g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_1),U_2)-g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_2)v\varphi(X_1),U_2)-g_1(\mathcal{T}_{[X_1,U_1]}X_2,U_2) \\
& -g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1,U_1]),U_2)+\frac{\tilde{\tau}}{n(n-1)}g_1(X_1,X_2)g_1(U_1,U_2), \\
\\
& g_1(\tilde{C}(U_1,U_2)U_3,X_1)=g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}\hat{\nabla}_{U_2}U_3,X_1)-g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_2}U_3)\varphi(U_1),X_1)+g_1(h(\tilde{\nabla}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3,X_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2),X_1)-g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}\hat{\nabla}_{U_1}U_3,X_1)+g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2),X_1)-g_1(h(\tilde{\nabla}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3,X_1) \\
& +g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1),X_1)-g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{[U_1,U_2]}U_3,X_1)+g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1,U_2]),X_1), \\
\\
& g_1(\tilde{C}(U_1,U_2)U_3,U_4)=g_1(\hat{R}(U_1,U_2)U_3,U_4)-g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_2}U_3)\varphi(U_1),U_4)+g_1(\mathcal{T}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3,U_4) \\
& +g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3)v\varphi(U_1),U_4)-g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2),U_4)+g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2),U_4) \\
& -g_1(\mathcal{T}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3,U_4)-g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3)v\varphi(U_2),U_4)+g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1),U_4) \\
& +g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1,U_2],U_4)-\frac{\tilde{\tau}}{n(n-1)}\{g_1(U_2,U_3)g_1(U_1,U_4)-g_1(U_1,U_3)g_1(U_2,U_4)\}, \\
\\
& g_1(\tilde{C}(X_1,X_2)U_1,X_3)=g_1(h(\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}U_1,X_3)+g_1(\mathcal{A}_{X_1}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1,X_3)+\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1)g_1(h\varphi(X_1),X_3) \\
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_1)h\varphi(X_2),X_3)-g_1(h(\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}U_1,X_3)-g_1(\mathcal{A}_{X_2}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1,X_3) \\
& -\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1)g_1(h\varphi(X_2),X_3)-g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_1)h\varphi(X_1),X_3)-g_1(\mathcal{A}_{[X_1,X_2]}U_1,X_3) \\
& -g_1(\eta(U_1)h\varphi([X_1,U_1]),X_3),
\end{aligned}$$

where $U_1, U_2, U_3, U_4 \in \kappa^v(M_1)$ and $X_1, X_2, X_3, X_4 \in \kappa^h(M_1)$.

Proof. The proof of the initial equation in Theorem 3.5 can be readily demonstrated by taking an inner product between $\tilde{C}$ and X_4 and applying (2.29) from (3.8). Similarly, analogous proofs can be conducted for other equations.

Corollary 3.6 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be a Riemannian manifold, and $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ be Riemannian submersion. Then the concircular curvature tensor of the Riemannian submersion endowed with Q-SNMC has no totally umbilical fibres.

3.3 Conharmonic curvature tensor

In this section, we present curvature relations of the Conharmonic curvature tensor in Riemannian submersions endowed with Q-SNMC.

Definition 3.7 Let M_1 be an n -dimensional manifold. In this case, within the n -dimensional space V^n , for every $X_1, X_2, X_3 \in \chi(M_1)$, the conharmonic curvature tensor field of M_1 is defined as follows:

$$\tilde{L}(X_1, X_2)X_3 = \tilde{R}(X_1, X_2)X_3 - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_2, X_3)QX_1 - g_1(X_1, X_3)QX_2 + \tilde{S}(X_2, X_3)X_1 - \tilde{S}(X_1, X_3)X_2\}, \quad (3.9)$$

where $\tilde{Q}$, $\tilde{R}$ and $\tilde{S}$ denote the Ricci operator, Riemannian curvature tensor and Ricci curvature tensor, respectively [23].

Theorem 3.8 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with, $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ representing a Riemannian submersion endowed with Q-SNMC, and $\tilde{R}$, R' and $\hat{R}$ be Riemannian curvature tensors, $\tilde{S}$, S' and $\hat{S}$ be Ricci tensors of M_1 , M_2 and the fiber $(f^{-1}(x), \hat{g}_{1x})$ respectively. Then, for every $U_1, U_2, U_3, U_4 \in \kappa^v(M_1)$ and $X_1, X_2, X_3, X_4 \in \kappa^h(M_1)$, the following Conharmonic curvature tensor relations hold:

$$\begin{aligned} g_1(\tilde{L}(X_1, X_2)X_3, X_4) &= g_1(R'(X_1, X_2)X_3, X_4) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_2}X_3) + g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_1}X_3) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)h\varphi(X_2), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), X_4) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), X_4) - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_2, X_3)[S'(X'_1, X'_4) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_4) \\ &- \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_4, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4)v\varphi(X_1), U_i) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_4)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_4, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_4)\varphi(U_i), U_i) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_4)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_4)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]}X_4, U_i) \\ &- g_1(\eta(X_4)v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_4}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_4) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_4)\} - g_1(X_1, X_3)[S'(X'_2, X'_4) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_4)] \\ &- \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{T}_{U_i}X_4, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4)v\varphi(X_2), U_i) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_4)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_2}X_4, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_4)\varphi(U_i), U_i) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_4)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_4)v\varphi(X_2), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_2, U_i]}X_4, U_i) \\ &- g_1(\eta(X_4)v\varphi([X_2, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_j, \mathcal{A}_{X_4}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\ &+ g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_2), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_j)h\varphi(X_j), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_4) \\ &- g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_2), X_4)\} + g_1(X_1, X_4)[S'(X'_2, X'_3) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)] \\ &- \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{T}_{U_i}X_3, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_2), U_i) \\ &+ g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)\varphi(U_i), U_i) \\ &- g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_2), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_2, U_i]}X_3, U_i) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_2, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_j, \mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_3, \mathcal{A}_{X_j}X_j) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_j)h\varphi(X_j), X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_3) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_2), X_3) - g_1(X_2, X_4)[S'(X'_1, X'_3) \circ f + \\
& \quad g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3) - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}T_{U_i}X_3, U_i) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(U_i), U_i) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_3, U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)\varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(U_i), U_i) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(T_{[X_1, U_i]}X_3, U_i) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1, U_i]), U_i) \\
& + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_3, \mathcal{A}_{X_j}X_j) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_3) \\
& - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_3)\}], \\
& g_1(\tilde{L}(X_1, X_2)X_3, U_1) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3, U_1) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(X_1), U_1) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}X_3, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3, U_1) \\
& - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1, X_2]), U_1) \\
& - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_2, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_1), U_1) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_1}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_i, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_1, X_i]), U_1)\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\tilde{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(T_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_1}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j, U_1) \\
& + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j)\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_1), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{[X_1, U_j]}U_j, U_1) \\
& + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_1, U_j]), U_1) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_1}U_j) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(X_1), U_1)\} \\
& - g_1(X_1, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_2), U_1) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_2}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_i, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_2, X_i]), U_1)\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\tilde{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(T_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_2}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}U_j)v\varphi(U_j), U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j)\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_2), U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{[X_2, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_2, U_j]), U_1) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_2}U_1) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(X_2), U_1),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& g_1(\tilde{L}(X_1, U_1)X_2, U_2) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2)v\varphi(X_1), U_2) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{U_1}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2, U_2) \\
& - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_2) \\
& - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_1]), U_2) + \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_1, X_2)[\hat{S}(U_1, U_2) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{T}_{U_1}U_2) \\
& + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_1), U_2) + \sum_i\{-g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_i), U_2) \\
& + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_i), U_2) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_i}U_i, \mathcal{T}_{U_i}U_2) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_i}U_i)v\varphi(U_i), U_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_1), U_2) \\
& + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_2) - \sum_j\{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_1}X_j, U_2) - g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_2, h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j) \\
& + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j)v\varphi(X_j), U_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_j}X_j, U_2) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_1), U_2) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}U_2, h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_1), U_2) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]}X_j, U_2) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_2)\}\} \\
& + g_1(U_1, U_2)[S'(X'_1, X'_2) \circ f + g_1(\mathcal{N}, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2) - \sum_i\{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_2, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2) \\
& + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2)v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_i) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_i), U_i) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_i) - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_i]), U_i) \\
& + \sum_j\{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_2}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_2, \mathcal{A}_{X_j}X_j) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_2) \\
& - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_2)\}\}, \\
& g_1(\tilde{L}(U_1, U_2)U_3, U_4) = g_1(\hat{R}(U_1, U_2)U_3, U_4) - g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_2}U_3)\varphi(U_1), U_4) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3, U_4) \\
& + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3)v\varphi(U_1), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2), U_4) + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2), U_4) \\
& - g_1(\mathcal{T}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3, U_4) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3)v\varphi(U_2), U_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1), U_4) \\
& + g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1, U_2]), U_4) - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(U_2, U_3)[\hat{S}(U_1, U_4) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_4) \\
& + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_1), U_4) + \sum_i\{-g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_1), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_i), U_4) \\
& + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_i), U_4) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_i}U_i, \mathcal{T}_{U_i}U_4) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_i}U_i)v\varphi(U_i), U_4) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_1), U_4) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_4)\} - \sum_j\{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_1}X_j, U_4) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_4, h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j)v\varphi(X_j), U_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_1), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_j}X_j, U_4) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_1), U_4) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}U_4, h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_1), U_4) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_4) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]}X_j, U_4) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_4)\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -g_1(U_1, U_3)[\hat{S}(U_2, U_4) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{T}_{U_2} U_4) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_2), U_4) + \sum_i \{-g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_2), U_4) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_4) + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_2} U_i)\varphi(U_i), U_4) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_4) \\
& \quad -g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_j)v\varphi(U_j), U_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_2), U_4) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_2, U_i]), U_4) \\
& \quad -\sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_2} X_j, U_4) - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_4, h\tilde{\nabla}_{U_2} X_j) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_2} X_j)v\varphi(X_j), U_4) \\
& \quad +g_1(\tilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j)v\varphi(U_2), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_4) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_2), U_4) \\
& \quad +g_1(\mathcal{T}_{U_2} U_4, h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j)v\varphi(U_2), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \eta(X_j)v\varphi(X_j), U_4) \\
& \quad -g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_2]} X_j, U_4) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_2]), U_4)\}] + g_1(U_1, U_4)[\hat{S}(U_2, U_3) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{T}_{U_2} U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_2), U_3) + \sum_i \{-g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_2), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_2} U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_3) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i)v\varphi(U_i), U_3) \\
& \quad +g_1(\tilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_2), U_3) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_2, U_i]), U_3) - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_2} X_j, U_3) \\
& \quad -g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_3, h\tilde{\nabla}_{U_2} X_j) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_2} X_j)v\varphi(X_j), U_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j)v\varphi(U_2), U_3) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_3) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_2), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_2} U_3, h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j) \\
& \quad -g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j)v\varphi(U_2), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_2} \eta(X_j)v\varphi(X_j), U_3) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_2]} X_j, U_3) \\
& \quad -g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_2]), U_3)\} - g_1(U_2, U_4)[\hat{S}(U_1, U_3) - g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{T}_{U_1} U_3) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(U_1), U_3) \\
& \quad \sum_i \{-g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_1), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\eta(\tilde{\nabla}_{U_1} U_i)\varphi(U_i), U_3) \\
& \quad +g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_3) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i)v\varphi(U_i), U_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_1), U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_3) - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_1} X_j, U_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_3, h\tilde{\nabla}_{U_1} X_j) \\
& \quad +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1} X_j)v\varphi(X_j), U_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j)v\varphi(U_1), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_3) \\
& \quad +g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_1), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_1} U_3, h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j} X_j)v\varphi(U_1), U_3) \\
& \quad -g_1(\tilde{\nabla}_{U_1} \eta(X_j)v\varphi(X_j), U_3) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]} X_j, U_3) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_3)\}], \\
& g_1(\tilde{L}(X_1, X_2)U_1, X_3) = g_1(h(\tilde{\nabla}_{X_1} \mathcal{A}_{X_2} U_1, X_3) + g_1(\mathcal{A}_{X_1} v\tilde{\nabla}_{X_2} U_1, X_3) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2} U_1)h\varphi(X_1), X_3) \\
& \quad +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1} \eta(U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(h\tilde{\nabla}_{X_2} \mathcal{A}_{X_1} U_1, X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_2} v\tilde{\nabla}_{X_1} U_1, X_3) \\
& \quad -g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1} U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2} \eta(U_1)h\varphi(X_1), X_3) - g_1(\mathcal{A}_{[X_1, X_2]} U_1, X_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -g_1(\eta(U_1)h\varphi([X_1, X_2]), X_3) - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_1, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) \\
& -g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_2), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& -g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_2}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& -g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_2, X_i], U_1))\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\hat{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_2}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_2), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_2, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_2, U_j]), U_1)\} \\
& -g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_2}U_1) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(X_2), U_1) - g_1(X_2, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) \\
& -g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& -g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_1}X_i, U_1) \\
& + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i)v\varphi(X_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_1), U_1) \\
& -g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_1, X_i], U_1))\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\hat{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_1}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_1), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_1, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_1, U_j]), U_1)\} \\
& -g_1(\tilde{\mathcal{N}}, \mathcal{A}_{X_1}U_1) + g_1(\eta(\tilde{\mathcal{N}})v\varphi(X_1), U_1)].
\end{aligned}$$

Proof. We can easily demonstrate the first equation by using (2.29) and (2.35) in equation (3.9) for the inner product of $\tilde{L}$ and X_4 . The proofs of other equations can be done similarly.

Corollary 3.9 Let (M_1, g_1) and (M_2, g_2) be Riemannian manifolds, with, $f: (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$ representing a Riemannian submersion endowed with Q-SNMC, and $\tilde{R}, R'$ and $\hat{R}$ be Riemannian curvature tensors, $\tilde{S}, S'$ and $\hat{S}$ be Ricci tensors of M_1, M_2 and the fiber $(f^{-1}(x), \hat{g}_{1x})$ respectively. If the Riemannian submersion has total umbilical fibres ($\mathcal{N} = 0$), then the conharmonic curvature tensor is given by

$$\begin{aligned}
& g_1(\tilde{L}(X_1, X_2)X_3, X_4) = g_1(R'(X_1, X_2)X_3, X_4) + g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4, \mathcal{A}_{X_1}X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_2}X_3) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)h\varphi(X_2), X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2), X_4) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1), X_4) - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_2, X_3)[S'(X'_1, X'_4) \circ f - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_4, U_i) \\
& -g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4)v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_4)v\varphi(U_i), U_i) - \\
& g_1(\hat{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_4, U_i) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_4)\varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_4)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_4)v\varphi(X_1), U_i) \\
& -g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_i]}X_4, U_i) - g_1(\eta(X_4)v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_4}X_j) \\
& -g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_4, \mathcal{A}_{X_j}X_j) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j),X_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1),X_4)\} - g_1(X_1,X_3)[S'(X'_2,X'_4)\circ f \\
& - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{T}_{U_i}X_4,U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i,h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_4)v\varphi(X_2),U_i) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_4)v\varphi(U_i),U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_2}X_4,U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_4)\varphi(U_i),U_i) \\
& - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_4)v\varphi(U_i),U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_4)v\varphi(X_2),U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_2,U_i]}X_4,U_i) \\
& - g_1(\eta(X_4)v\varphi([X_2,U_i]),U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_j,\mathcal{A}_{X_4}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_4,\mathcal{A}_{X_j}X_j) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_2),X_4) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_j)h\varphi(X_j),X_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j),X_4) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_2),X_4)\} + g_1(X_1,X_4)[S'(X'_2,X'_3)\circ f - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{T}_{U_i}X_3,U_i) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_i,h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_2),U_i) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(U_i),U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_2}X_3,U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_3)\varphi(U_i),U_i) \\
& - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(U_i),U_i) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_2),U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_2,U_i]}X_3,U_i) \\
& - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_2,U_i]),U_i)\} + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_j,\mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}X_3,\mathcal{A}_{X_j}X_j) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_2),X_3) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}X_j)h\varphi(X_j),X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_j)v\varphi(X_j),X_3) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_2),X_3) - g_1(X_2,X_4)[S'(X'_1,X'_3)\circ f - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_3,U_i) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i,h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_3)v\varphi(X_1),U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(U_i),U_i) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_3,U_i) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_3)\varphi(U_i),U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(U_i),U_i) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_3)v\varphi(X_1),U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1,U_i]}X_3,U_i) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1,U_i]),U_i) \\
& + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j,\mathcal{A}_{X_3}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_3,\mathcal{A}_{X_j}X_j) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1),X_3) \\
& - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j),X_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j),X_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1),X_3)\}], \\
& g_1(\tilde{L}(X_1,X_2)X_3,U_1) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}X_3,U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3,U_1) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_3)v\varphi(X_1),U_1) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_3)v\varphi(X_2),U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}X_3,U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3,U_1) \\
& - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_3)v\varphi(X_2),U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_3)v\varphi(X_1),U_1) - g_1(\eta(X_3)v\varphi([X_1,X_2]),U_1) \\
& - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_2,X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_i}X_i,U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i,h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_1),U_1) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_i)v\varphi(X_i),U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_1}X_i,U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_i,h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i)v\varphi(X_i),U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_1),U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_1,X_i]),U_1)\} + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\hat{\nabla}_{U_j}U_j,U_1) \\
& - g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_j)\varphi(U_j),U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1,\mathcal{A}_{X_1}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}U_j)v\varphi(U_j),U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j,U_1) \\
& + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j)\varphi(U_j),U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_1),U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_1,U_j]}U_j,U_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +g_1(\eta(U_j)\varphi([X_1, U_j], U_1))\} - g_1(X_1, X_3) \left[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) \right. \\
& +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_2), U_1) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_2}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i) \\
& -g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_2), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_2, X_i], U_1))\} \\
& + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\hat{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_2}U_j) \\
& -g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_2), U_1) - g_1(\hat{\nabla}_{[X_2, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_2, U_j], U_1))\}\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& g_1(\tilde{L}(X_1, U_1)X_2, U_2) = g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_2)v\varphi(X_1, U_2) \\
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\hat{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_2) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{U_1}h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2, U_2) \\
& -g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_2) \\
& -g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_1]), U_2) + \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_1, X_2)[\hat{S}(U_1, U_2) \\
& +\sum_i \{-g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_i}U_i)\varphi(U_1), U_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_i)\varphi(U_i), U_2) \\
& +g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1}U_i)\varphi(U_i), U_2) + g_1(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_i, \mathcal{T}_{U_i}U_2) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_i)v\varphi(U_i), U_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(U_i)\varphi(U_1), U_2) \\
& +g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_2) - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_1}X_j, U_2) - g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_2, h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j) \\
& +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j)v\varphi(X_j), U_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_1), U_2) - g_1(\hat{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_j}X_j, U_2) \\
& +g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_1), U_2) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}U_2, h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_1), U_2) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_2) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]}X_j, U_2) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_2) \\
& +g_1(U_1, U_2)[S'(X'_1, X'_2) \circ f - \sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{T}_{U_i}X_2, U_i) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_i, h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2) \\
& +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_i}X_2)v\varphi(X_1), U_i) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_2)v\varphi(U_i), U_i) - g_1(\hat{\nabla}_{U_i}\mathcal{A}_{X_1}X_2, U_i) \\
& +g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_2)\varphi(U_i), U_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_2)v\varphi(U_i), U_i) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_i}\eta(X_2)v\varphi(X_1), U_i) - g_1(\mathcal{T}_{[X_1, U_1]}X_2, U_i) - g_1(\eta(X_2)v\varphi([X_1, U_i]), U_i)\} \\
& + \sum_j \{-g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_j, \mathcal{A}_{X_2}X_j) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}X_2, \mathcal{A}_{X_j}X_j) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)h\varphi(X_1), X_2) \\
& -g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}X_j)h\varphi(X_j), X_2) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), X_2) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(X_1), X_2)\}\}\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& g_1(\tilde{L}(U_1, U_2)U_3, U_4) = g_1(\hat{R}(U_1, U_2)U_3, U_4) - \eta(\hat{\nabla}_{U_2}U_3)g_1(\varphi(U_1), U_4) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3, U_4) \\
& +g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_2}U_3)v\varphi(U_1), U_4) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(U_3)\varphi(U_2), U_4) + g_1(\eta(\hat{\nabla}_{U_1}U_3)\varphi(U_2), U_4) \\
& -g_1(\mathcal{T}_{U_2}\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3, U_4) - g_1(\eta(\tilde{\mathcal{T}}_{U_1}U_3)v\varphi(U_2), U_4) + g_1(\tilde{\nabla}_{U_2}\eta(U_3)\varphi(U_1), U_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +g_1(\eta(U_3)\varphi([U_1, U_2]), U_4) - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(U_2, U_3)[\hat{S}(U_1, U_4) \\
& + \sum_i \{-g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_1), U_4) - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_1} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_4) \\
& + g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_1} U_i)\varphi(U_i), U_4) + g_1(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_4) - g_1(\eta(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i)v\varphi(U_i), U_4) \\
& + g_1(\widetilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_1), U_4) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_4) - \sum_j \{g_1(v\widetilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_1} X_j, U_4) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_4, h\widetilde{\nabla}_{U_1} X_j) + g_1(\eta(h\widetilde{\nabla}_{U_1} X_j)v\varphi(X_j), U_4) + g_1(\widetilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j)v\varphi(U_1), U_4) - g_1(\widehat{\nabla}_{U_1} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_4) \\
& + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_1), U_4) + g_1(\mathcal{T}_{U_1} U_4, h\widetilde{\nabla}_{X_j} X_j) - g_1(\eta(h\widetilde{\nabla}_{X_j} X_j)v\varphi(U_1), U_4) \\
& - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_1} \eta(X_j)v\varphi(X_j), U_4) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]} X_j, U_4) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_4)\}] \\
& - g_1(U_1, U_3)[\hat{S}(U_2, U_4) + \sum_i \{-g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_2), U_4) - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_2} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_4) \\
& + g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_2} U_i)\varphi(U_i), U_4) + g_1(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_4) - g_1(\eta(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i)v\varphi(U_i), U_4) \\
& + g_1(\widetilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_2), U_4) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_2, U_i]), U_4) \\
& - \sum_j \{g_1(v\widetilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_2} X_j, U_4) - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_4, h\widetilde{\nabla}_{U_2} X_j) + g_1(\eta(h\widetilde{\nabla}_{U_2} X_j)v\varphi(X_j), U_4) \\
& + g_1(\widetilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j)v\varphi(U_2), U_4) - g_1(\widehat{\nabla}_{U_2} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_4) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_2), U_4) \\
& + g_1(\mathcal{T}_{U_2} U_4, h\widetilde{\nabla}_{X_j} X_j) - g_1(\eta(h\widetilde{\nabla}_{X_j} X_j)v\varphi(U_2), U_4) - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_2} \eta(X_j)v\varphi(X_j), U_4) \\
& - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_2]} X_j, U_4) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_2]), U_4)\}] + g_1(U_1, U_4)[\hat{S}(U_2, U_3) \\
& + \sum_i \{-g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_2), U_3) - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_2} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_3) \\
& + g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_2} U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_3) - g_1(\eta(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_2} U_i)v\varphi(U_i), U_3) \\
& + g_1(\widetilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_2), U_3) + g_1(\eta(U_i)\varphi([U_2, U_i]), U_3) - \sum_j \{g_1(v\widetilde{\nabla}_{X_j} \mathcal{T}_{U_2} X_j, U_3) \\
& - g_1(\mathcal{A}_{X_j} U_3, h\widetilde{\nabla}_{U_2} X_j) + g_1(\eta(h\widetilde{\nabla}_{U_2} X_j)v\varphi(X_j), U_3) + g_1(\widetilde{\nabla}_{X_j} \eta(X_j)v\varphi(U_2), U_3) \\
& - g_1(\widehat{\nabla}_{U_2} \mathcal{A}_{X_j} X_j, U_3) + g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j} X_j)\varphi(U_2), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_2} U_3, h\widetilde{\nabla}_{X_j} X_j) \\
& - g_1(\eta(h\widetilde{\nabla}_{X_j} X_j)v\varphi(U_2), U_3) - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_2} \eta(X_j)v\varphi(X_j), U_3) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_2]} X_j, U_3) \\
& - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_2]), U_3)\}] - g_1(U_2, U_4)[\hat{S}(U_1, U_3) \\
& \sum_i \{-g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_i} U_i)\varphi(U_1), U_3) - g_1(\widetilde{\nabla}_{U_1} \eta(U_i)\varphi(U_i), U_3) + g_1(\eta(\widehat{\nabla}_{U_1} U_i)\varphi(U_i), U_3) \\
& + g_1(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i, \mathcal{T}_{U_i} U_3) - g_1(\eta(\widetilde{\mathcal{T}}_{U_1} U_i)v\varphi(U_i), U_3) + g_1(\widetilde{\nabla}_{U_i} \eta(U_i)\varphi(U_1), U_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +g_1(\eta(U_i)\varphi([U_1, U_i]), U_3) - \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_j}\mathcal{T}_{U_1}X_j, U_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_j}U_3, h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j) \\
& +g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{U_1}X_j)v\varphi(X_j), U_3) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_j}\eta(X_j)v\varphi(U_1), U_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\mathcal{A}_{X_j}X_j, U_3) \\
& +g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_j}X_j)\varphi(U_1), U_3) + g_1(\mathcal{T}_{U_1}U_3, h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_j}X_j)v\varphi(U_1), U_3) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_1}\eta(X_j)v\varphi(X_j), U_3) - g_1(\mathcal{T}_{[X_j, U_1]}X_j, U_3) - g_1(\eta(X_j)v\varphi([X_j, U_1]), U_3)\}, \\
& g_1(\tilde{L}(X_1, X_2)U_1, X_3) = g_1(h(\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_2}U_1, X_3) + g_1(\mathcal{A}_{X_1}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1, X_3) + \eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_1)g_1(h\varphi(X_1), X_3) \\
& +g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(h\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_1}U_1, X_3) - g_1(\mathcal{A}_{X_2}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1, X_3) \\
& -g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_1)h\varphi(X_2), X_3) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_1)h\varphi(X_1), X_3) - g_1(\mathcal{A}_{[X_1, X_2]}U_1, X_3) \\
& -g_1(\eta(U_1)h\varphi([X_1, X_2]), X_3) - \frac{1}{(n-2)}\{g_1(X_1, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) \\
& -g_1(\mathcal{A}_{X_2}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + \eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)g_1(v\varphi(X_2), U_1) + g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) \\
& -g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_2}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i) - g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_2}X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_2), U_1) \\
& -g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_2, X_i]), U_1) + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_2}\tilde{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_2}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& +g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_2}U_j) - g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_2}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_2}U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_2), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{[X_2, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_2, U_j]), U_1)\} \\
& -g_1(X_2, X_3)[\sum_i \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\mathcal{A}_{X_i}X_i, U_1) - g_1(\mathcal{A}_{X_1}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i) + g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_i}X_i)v\varphi(X_1), U_1) \\
& + g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(v\tilde{\nabla}_{X_i}\mathcal{A}_{X_1}X_i, U_1) + g_1(\mathcal{A}_{X_i}U_1, h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i) \\
& -g_1(\eta(h\tilde{\nabla}_{X_1}X_i)v\varphi(X_i), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_i}\eta(X_i)v\varphi(X_1), U_1) - g_1(\eta(X_i)v\varphi([X_1, X_i]), U_1)\} \\
& + \sum_j \{g_1(v\tilde{\nabla}_{X_1}\tilde{\nabla}_{U_j}U_j, U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{X_1}\eta(U_j)\varphi(U_j), U_1) + g_1(\mathcal{T}_{U_j}U_1, \mathcal{A}_{X_1}U_j) \\
& -g_1(\eta(\mathcal{A}_{X_1}U_j)v\varphi(U_j), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j, U_1) + g_1(\eta(v\tilde{\nabla}_{X_1}U_j)\varphi(U_j), U_1) \\
& -g_1(\tilde{\nabla}_{U_j}\eta(U_j)h\varphi(X_1), U_1) - g_1(\tilde{\nabla}_{[X_1, U_j]}U_j, U_1) + g_1(\eta(U_j)\varphi([X_1, U_j]), U_1)\}.
\end{aligned}$$

4. Conclusion and Discussion

This study presents significant geometric results by computing the Weyl projective curvature tensor, the concircular curvature tensor, and the conharmonic curvature tensor under quarter-symmetric non-metric connections in Riemannian submersions. In particular, the interplay among these curvature tensors sheds light on the underlying structure of submersions, especially when totally umbilic fibers are present. Therefore, the results indicate that quarter-symmetric non-metric connections play a pivotal role in shaping the curvature and geometry of Riemannian submersions.

The results obtained in this study are expected to inspire further investigations into the interrelations among various curvature tensors and potential generalizations to other geometric structures.

Acknowledgment

The authors would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding this paper.

Research and Publication Ethics Statement

The authors declare that this study complies with research and publication ethics.

References

- [1] Friedmann, A. and Schouten, J. A. (1924). Über die Geometrie der halbsymmetrischen Übertragungen, *Mathematische Zeitschrift*, 21(1), 211-223.
- [2] Hayden, H. A. (1932). Subspaces of a space with torsion, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(1), 27-50.
- [3] Yano, K. (1970). On semi symmetric metric connection, *Revue Roumaine de Mathématiques pures et appliquées*, 15, 1579-1586.
- [4] Ayar, G. and Demirhan, D. (2019). Ricci solutions on nearly Kenmotsu manifolds with semi-symmetric metric connection, *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 4(3), 131-140.
- [5] Altın, M. (2020). Projective curvature tensor on $N(\kappa)$ contact metric manifold admitting semi-symmetric non-metric connection, *Fundamental Journal of Mathematics and Applications*, 3(2), 94-100.
- [6] Chaubey, S. K. and Ojha, R. H. (2008). On a semi-symmetric non-metric and quarter symmetric metric connexions, *Tensor N. S.*, 70(2), 202-213.
- [7] O'Neill, B. (1966). The fundamental equations of a submersion, *Michigan Mathematical Journal*, 13(4), 459-469.
- [8] Gray, A. (1967). Pseudo-Riemannian almost product manifolds and submersions, *Journal of Mathematics and Mechanics*, 16(7), 715-737.
- [9] Escobales, Jr. and Richard, H. (1975). Riemannian submersions with totally geodesic fibers, *J. Differential Geometry*, 10, 253-276.
- [10] Ianus, S., Mazzocco, R., and Vilcu, G. E. (2008). Riemannian submersions from quaternionic manifolds, *Acta Applicandae Mathematicae*, 104, 83-89.
- [11] Berestovskii, V. N. and Guijarro, L. (2000). A metric characterization of Riemannian submersions, *Annals of Global Analysis and Geometry*, 18, 577-588.
- [12] Eken Meriç, Ş., Gülbahar, M., and Kılıç, E. (2017). Some inequalities for Riemannian submersions, *Analele Stiintifice Ale Universitatii Al I Cuza Din Iasi-Serie Noua- Mathematica*, 63, 1-12.
- [13] Şahin, B. (2013). Riemannian submersions from almost Hermitian manifolds, *Taiwanese Journal of Mathematics*, 17, 629-659.
- [14] Narita, F. (1993). Riemannian submersion with isometric reflections with respect to the fibers. *Kodai Math. J.*, 16, 416-427.
- [15] Karatas, E., Zeren, S., and Altın, M. (2023). Riemannian submersions endowed with a new type of semi-symmetric non-metric connection, *Thermal Science*, 27(4B), 3393-3403.
- [16] Ayar, G. (2021). Pseudo-projective and quasi-conformal curvature tensors on Riemannian submersions, *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 44(17), 13791-13798.
- [17] Karataş, E., Zeren, S., and Altın, M. (2024). Geometric Analysis of Riemannian Submersions: Curvature Tensors and Total Umbilic Fibers. *Konuralp Journal of Mathematics*, 12(2), 158-171.
- [18] Akyol, M. A. and Beyendi S. (2018). Riemannian submersions endowed with a semi-symmetric non-metric connection, *Konuralp Journal of Mathematics*, 6(1), 188-193.
- [19] Sarı, R. (2021). Semi-invariant Riemannian submersions with semi-symmetric non-metric connection, *Journal of New Theory*, (35), 62-71.

- [20] Demir, H. and Sarı, R. (2022). Riemannian submersions endowed with a semi-symmetric metric connection, *Tbilisi Centre for Mathematical Sciences*, 10, 99-108.
- [21] Golab, S. (1975). On semi-symmetric and quarter symmetric linear connections, *Tensor N. S.*, 29, 249-254.
- [22] Demir, H. and Sarı, R. (2021). Riemannian submersions with quarter symmetric non-metric connection, *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 6(1), 1-8.
- [23] Mishra, R. S. (1970). H-Projective curvature tensor in Kähler manifold, *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 1, 336-340.
- [24] Pokhariyal, G. P. and Mishra, R. S. (1971). Curvature tensors and their relativistic significance, *II. Yokohama Math. J.*, 19(2), 97-103.
- [25] Ojha, R. H. (1975). A note on the $\bar{\nabla}$ - projective curvature tensor, *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 8(12), 1531-1534.
- [26] Doric, M., Petrovic- Torgasev, M., and Versraelen L. (1988). Conditions on the conharmonic curvature tensor of Kaehler hypersurfaces in complex space forms, *Publications de l'Institut Mathématique (N. S.)*, 44(58), 97-108.
- [27] Ahsan, Z. and Siddiqui, S. A. (2009). Conircular curvature tensor and fluid spacetimes, *International Journal of Theoretical Physics*, 48, 3202-3212.
- [28] Hall, G. (2018). Einstein's geodesic postulate, projective relatedness and Weyl's projective tensor. In Mathematical Physics. *Proceedings of the 14th Regional Conference*, 27-35.
- [29] Ayar, G. and Akyol, M. A. (2023). New curvature tensors along Riemannian submersions, *Miskolc Mathematical Notes*, 24, 1161-1184.
- [30] Sahin, B. (2017). *Riemannian submersions, Riemannian maps in Hermitian geometry, and their applications*, Academic Press.
- [31] Falcitelli, M., Ianus, S., and Pastore, A. M. (2004). *Riemannian Submersions and Related Topics*, World Scientific.
- [32] Gundmundson, S. (2014). *An Introduction to Riemannian Geometry*. Lecture Notes in Mathematics, University of Lund, Faculty of Science. Lund, Sweden.
- [33] Şahin, B. (2013). Semi-invariant Submersions from Almost Hermitian Manifolds, *Canadian Mathematical Bulletin*, 56(1), 173-183.
- [34] Doğru, Y. (2011). On some properties of submanifolds of a Riemannian manifold endowed with a semi-symmetric non-metric connection, *Analele Stiintifice ale Universitatii Ovidius Constanta, Serie Matematica*, 19(3), 85-100.

Research Article

Investigation Basic Properties of Custom Designed Controlled Porous Implants Produced by P/M Method for Biomedical Applications

M. Selçuk Keskin¹, Haluk Kejanlı², Şükrü Çetinkaya³ and Kadir Turan^{4,*}

Received: 13.02.2025

Accepted: 26.03.2025

^{1, 2, 3, 4} Department of Mechanical Engineering, Dicle University, Diyarbakır, Türkiye;
¹mseleuk.keskin@dicle.edu.tr, ²kejanli@dicle.edu.tr, ³scetinkaya@dicle.edu.tr,
^{4,*}kturan@dicle.edu.tr
* Corresponding author

Abstract: This study investigates the production of implant-like porous pure titanium materials for biomedical applications, produced by powder metallurgy (T/M). The material consists of a solid titanium core and a porous titanium outer layer designed to enhance bone conformability and strength. Magnesium powder (50 µm) was used in proportions of 10, 20 and 30 wt% to create the porous structure. The samples were sintered in argon atmosphere at 1000°C, 1100°C and 1200°C for different times (60, 90 and 120 minutes) and Magnesium was removed. The experimental work was carried out by tensile stripping test in a tensile testing machine. The effects of sintering temperature, time and grain size were analyzed by Taguchi method. ANOVA and Signal-to-Noise (S/N) ratio analyses were applied to evaluate joint quality and optimize strength. The findings contribute to the understanding of cost-effective design parameters for high-strength porous titanium implants, highlighting the influence of processing conditions on mechanical performance.

Keywords: porous structure; titanium; powder metallurgy; taguchi method

Araştırma Makalesi

Biyomedikal Uygulamalar için T/M Yöntemiyle Üretilen Özel Tasarım Kontrollü Gözenekli İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması

Özet: Bu çalışma; biyomedikal uygulamalar için toz metalürjisi (T/M) yöntemi ile üretilen implant benzeri gözenekli saf titanyum malzemelerin üretimini araştırmaktadır. Malzeme, kemik uyumu ve mukavemeti artırmak için tasarlanmış katı bir titanyum çekirdek ve gözenekli bir titanyum dış katmandan oluşmaktadır. Gözenekli yapı oluşturmak amacı ile Magnezyum tozu (50 µm) ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında kullanılmıştır. Numuneler argon atmosferinde 1000°C, 1100°C ve 1200°C'de farklı sürelerde (60, 90 ve 120 dakika) sinterlenmiş ve Magnezyum çıkarılmıştır. Deneysel çalışma; çekme test cihazında çekerek sıyırma testi ile gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sıcaklığı, süresi ve tane boyutunun etkileri Taguchi yöntemiyle analiz edilmiştir. Eklem kalitesini değerlendirmek ve mukavemeti optimize etmek için ANOVA ve Sinyal-Gürültü (S/N) oranı analizleri uygulanmıştır. Bulgular, yüksek mukavemetli gözenekli titanyum implantlar için uygun maliyetli tasarım parametrelerinin anlaşılmasına katkıda bulunarak işleme koşullarının mekanik performans üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: gözenekli yapı; titanyum; toz metalürjisi; taguchi metodu

1. Introduction

Titanium and titanium alloys are widely used in biomedical applications, aerospace industry, marine industry and chemical engineering due to their low density, desirable mechanical properties, high corrosion resistance and excellent biocompatibility [1, 2]. Recently, titanium and its alloys have also been widely used as implant materials due to their high corrosion resistance, high specific strength, low density, good fatigue behavior and biocompatibility. Porous titanium and titanium alloys have elastic modulus values close to those of human bones. The optimum number of pores in implant materials varies depending on biomechanical and biological requirements. In general, 30-70% porosity is considered suitable for biomedical applications [2]. The porous structure allows bone tissue to grow inside the porous metal, resulting in better mechanical bonding [3, 4]. Implants are materials used to fulfill or support the functions of living tissues and organs in the human body [5]. The inability of existing traditional materials to respond to technological developments has led researchers to new part production techniques [6]. This situation has accelerated both the commercial use of alloys produced with new production techniques and new metallurgical research [7]. Products obtained by powder metallurgy have started to be widely used especially in the field of implants [8]. Porous titanium is used to produce medical implants, especially as a filter material in a corrosive environment and naturally fixed in the human body by bone ingrowth [9, 10]. Porous metallic surfaces can be produced more easily by powder metallurgy and the desired porosity can be achieved [11]. The development of a novel porous titanium biomaterial has been proposed to improve the connection of an implant to bone, provide better stabilization and reduce the risk of implant loss [12]. Titanium and powder metallurgy applications have become indispensable in order to fabricate parts from expensive powders such as titanium without material waste and to fabricate implants with mechanical and physical properties compatible with the bone of the porous structure [13]. Modulus of elasticity, tensile strength and percent elongation values of biomaterials should be compatible with bone. According to scientific studies, titanium and its alloys are used as biomaterials due to their high strength despite low density, modulus of elasticity close to bone and excellent biocompatibility [14]. Titanium and its alloys are best adapted to the biomechanical conditions of the musculoskeletal system. Metal alloys are preferred because they can withstand weight, variable and sudden loads within certain limits without losing their properties [15]. Metal biomaterials are preferred because the mechanical strength and modulus of elasticity of metallic implants are much higher than the jaw bone strength [16, 17, 18]. Especially open-cell metal foams, which allow the formation of new bone tissue and the circulation of body fluids, are important materials that can be used as biomaterials [19]. In the final stage, the materials produced from the powder are sintered at high temperature to ensure mechanical integrity. With this method, open-cell titanium foams with homogeneous pore size, high pore percentage and modulus of elasticity comparable to that of bone can be prepared [20, 21]. Modulus of elasticity of metallic biomaterials are very high. While stainless steel 316L is around 193 GPa and titanium around 110 GPa, this value is around 10 to 15 GPa in human jawbone [22, 23]. This mechanical mismatch causes dental implants to be harder than human bone. During a force, the stress distribution in bone tissue is negatively affected. For these reasons, the dental implant material should be selected from the material closest to the modulus of elasticity of the bone tissue at the site of use [24]. Porous materials are particularly attractive because they can be tailored and manufactured with strength and modulus of elasticity as close as possible to the strength and modulus

of elasticity of natural bone [25]. Porous titanium can be used in the production of medical implants in the human body or skeleton through bone growth [26, 27]. In hollow materials produced by powder metallurgy, a certain amount of void-forming material can be added to the titanium powder [28]. After pressing, the void-forming material is removed either by the action of a solvent or heat and a very good porous structure is obtained [29]. The strength of the hollow titanium is ensured by the subsequent sintering process [30]. The use of techniques such as Taguchi Design of Experiments in biomedical applications provides valuable data that can be applied to optimize parameters to produce high quality implants [31]. The Taguchi design method is used to optimize these parameters specifically for biomedical applications with a focus on improving the quality and performance of implants [32]. The Taguchi technique effectively improves product and process quality by minimizing variation through various statistical methods. One of the most basic tools used in this technique is the orthogonal array, which allows experimenters to test the effects of multiple factors on a response variable with a minimum number of experiments [33]. In this study, it is aimed to produce a controlled porous implant-like material that wraps a titanium rod that will provide high strength in the middle at different parameters by T/M method. A pull-out test was performed for the mechanical strength of the porous implant materials produced and the results were analyzed by Variance (Anova) analysis with Taguchi optimization method to find the most effective parameters and to determine the reliability level of the experiment.

2. Materials and Methods

In this study, biomaterials, which are characterized as a new research area, are examined in general perspective. In recent years, research in this field has focused on the development of new materials for implant applications and porous titanium alloys. In the present study, a void-forming technique was used to produce a titanium part with a porous structure, in which the additive material was eliminated. The method used consisted of several steps (Figure 1).

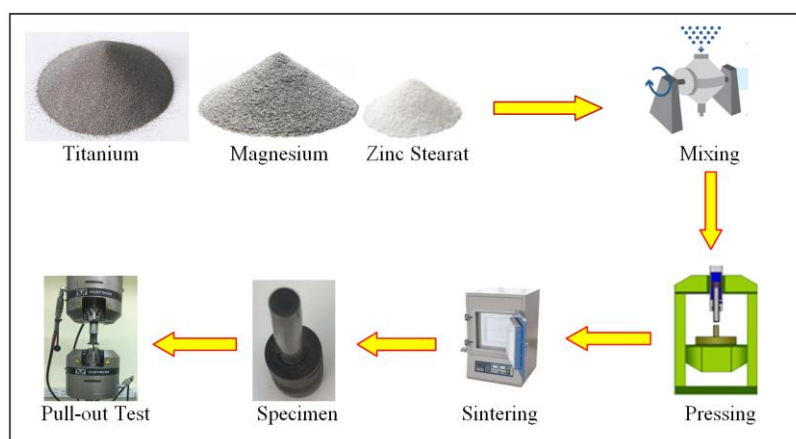


Figure 1. Work flow chart in the experimental studies

First, a pure titanium rod is placed in a specially fabricated mold. Then titanium metal powder with a grain size of 50 μm and magnesium metal powders with a grain size of 100 μm are mixed with pure titanium powder in different proportions (10, 20 and 30 wt%). Zinc stearat ($[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}]_2\text{Zn}$)

was added to the mixture at a rate of 0.1-3% to ensure a homogeneous distribution of the powders in the mold and on each other. Then, the powder mixture of titanium, void-forming and lubricating agent was poured into a mold with a titanium rod in the center. Porosifiers (e.g., urea, salt) in powder metallurgy influence pore structure, affecting cell infiltration and osseointegration. However, residuals or toxic substances may harm biocompatibility. Lubricants (e.g., stearic acid, paraffin) can create voids or leave residues after sintering, potentially affecting sterilization and cell interaction. Therefore, complete removal and non-toxicity of additives are crucial for biomedical applications. Therefore, all additives must be non-toxic and completely removable for biomedical applications. The specially manufactured mold, which gives the part geometry, was uniaxially loaded in a cylindrical mold in a 30-ton capacity pressing machine until the pellets shown schematically in Figure 2 were obtained.

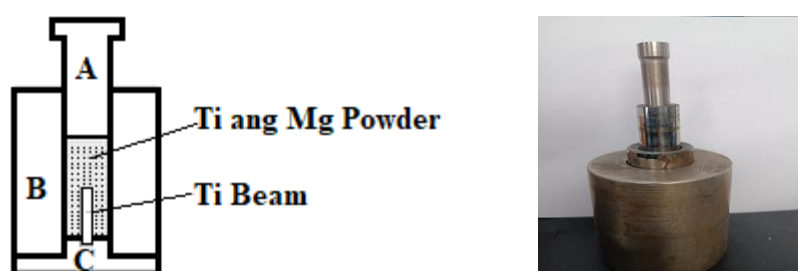


Figure 2. Set of molds used for sample production with T/M: schematic of the mold A, C bottom and top punch and B mold.

During the pressing process, the powder mixtures were compressed under a certain pressure to form green bodies. This process allowed the pore size of the materials to be controllable. Pressing caused densification of the powder mixture and additional densification of the pellet containing the void holder. Furthermore, a network of titanium particles with a certain green strength was formed. The specimens were then subjected to sintering to reach the final strength, which was carried out in an argon gas-controlled furnace at three different temperatures (1000, 1100 and 1200°C) and three different times (60, 90 and 120 min). In the next step, all of the void-retaining material was removed from the samples by thermal decomposition and pores were formed inside the titanium mesh according to the proportion of void-forming material inside the titanium part. During the sintering process, the magnesium powders were removed from the material by evaporation, resulting in a controlled porous structure. The porous structures formed here contributed to the faster removal of pellet decomposition products, and finally, in the samples obtained, the residues (inclusions) that remained in the porous structure and could not be removed were tried to be removed by using ethyl alcohol solvent with ultrasonic (supersonic wave) cleaning machine for 5 minutes. In this way, specimens with a diameter of 15 mm and a length of 20 mm were pressed with a pressure of 30 tons and produced in 3 pieces for each group (Figure 3).

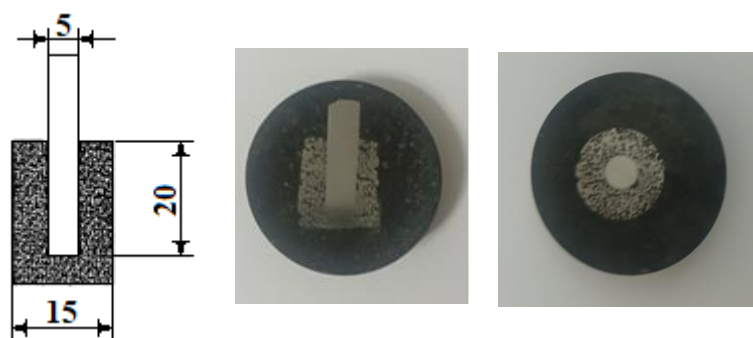


Figure 3. Bakelite cross-sectional image of the porous sample after sintering.

In the materials produced, 100 μm sized magnesium powders added to titanium powder to form voids were used as a highly effective space holder material. The use of different ratios of magnesium powders, which formed pores around 100 μm in the samples, enabled the pore size and density to be adjusted. In samples containing 10%, 20% and 40% magnesium, it was observed that the pore size increased with increasing magnesium content. The relatively low melting point (650°C) and evaporation temperature of magnesium allowed the magnesium to completely evaporate away from the material during the sintering process (e.g. at temperatures as high as 1100°C), resulting in the formation of voids (pores) in the areas where magnesium was present (Figure 4). Furthermore, magnesium does not react chemically with titanium and does not disturb the chemical structure of the material during sintering. This ensures that the titanium retains its pure structure and the mechanical properties of the material are not adversely affected. The complete removal of magnesium by evaporation during the sintering process requires no additional processing. This simplifies the production process and reduces costs. Magnesium does not increase the overall density of the material as it is a light metal. Magnesium and titanium are biocompatible materials, these properties make it possible to use the porous materials produced in biomedical applications (e.g. implants) [34]. The addition of magnesium powder to the samples directly affects the mechanical properties of the material. As the size and density of the pores increase, the density and strength of the material decreases. However, this is advantageous in applications where a porous structure is required (e.g. bone implants) because the porous structure allows tissues to penetrate the material and provide mechanical conformability. Magnesium powder can be easily processed during pressing and sintering processes. This increases the efficiency of the production process and makes it possible to produce porous materials with complex shapes. As a result, magnesium powder can be used as a highly effective void-forming material in the production of titanium-based porous materials. Thanks to its properties such as low melting and evaporation temperature, chemical compatibility, easy removability and ability to form controlled pore structure, magnesium powder is a preferred material for the production of porous materials, especially for biomedical and implant applications. However, since the amount and distribution of magnesium directly affect the mechanical properties of the material, these parameters need to be carefully optimized.

2.1. Sintering of Samples:

The pressed porous implant samples were sintered in an argon gas environment at three different temperatures in three different times in an atmosphere-controlled furnace (Figure 4).

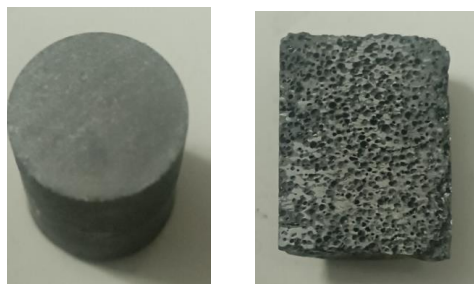


Figure 4. Specimen image of pressed specimens after sintering

As a result of the sintering process, materials with different pore sizes were produced. Three samples from each group were placed in the center of the atmosphere-controlled furnace. In order to prevent oxidation of the samples, argon gas was sent to the environment at a flow rate of 5lt/min and sintering was carried out in a protective environment. The samples were sintered at different times and temperatures and the thermal cycle was completed by heating and cooling at a rate of 20°C/min from room temperature to sintering temperature and 15°C/min from sintering temperature and time to room temperature (Figure 5).

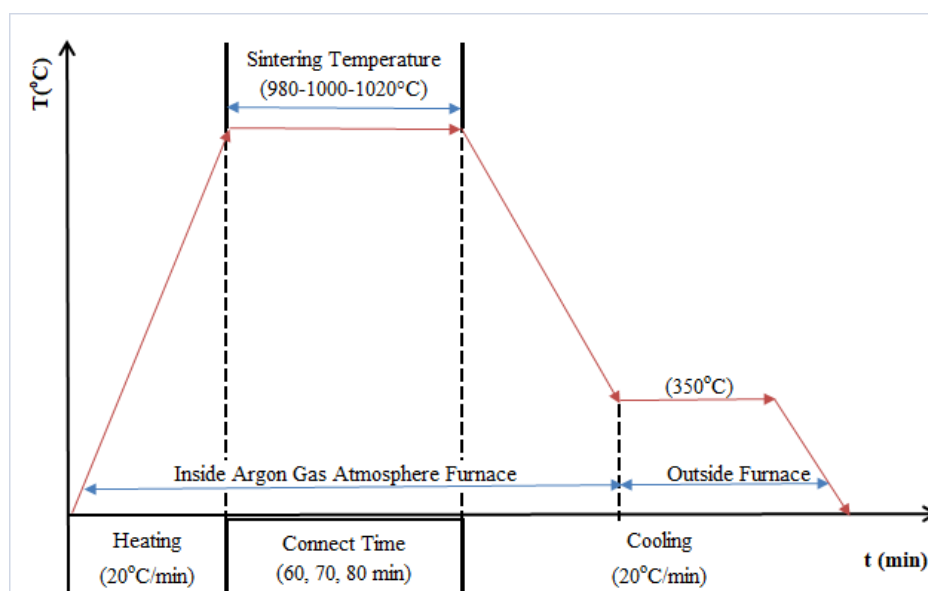


Figure 5: Thermal cycling of sintering process

3. Results and Discussions

3.1. Pull-out Strength Test Results

The tensile pull-out strength of the porous specimens produced with T/M with different parameters (Figure 6) was performed at Dicle University Central Laboratory using Instron BS 8801 tensile tester (Figure 7) and the results are given in Table 1.



Figure 6. Porous samples produced with different parameters.

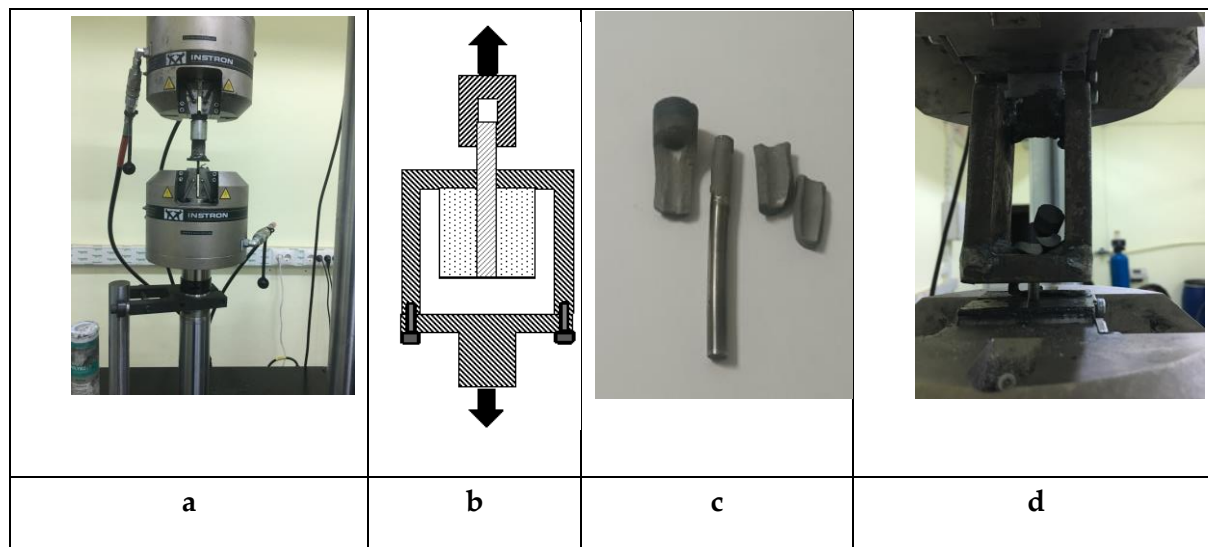


Figure 7. Tensile testing machine, a) schematic tensile test apparatus, b) and c) specimens with pull-out strength applied.

The results of the pull-out test showed that the mechanical strength properties of the produced materials varied depending on the pore size and distribution. Samples containing 10% magnesium exhibited higher strength values due to smaller pore sizes. In contrast, the specimens containing 40% magnesium showed a decrease in strength values with increasing pore size. These results show that the pore size has a significant effect on the mechanical properties of the material.

Table 1. Pull-out results of sintered specimens at different parameters

Specimen Num.	Temperature (°C)	Time (min)	Magnesium Perc. (%)	Pull-out Strength (N)
1	1000	60	10	1729.4
2	1000	90	20	1458.3
3	1000	120	30	1103.7
4	1100	60	20	1829
5	1100	90	30	1291.6
6	1100	120	10	1930.3
7	1200	60	30	1797.8
8	1200	90	10	2127.9
9	1200	120	20	2071.8

The sintering process has played a critical role in increasing the density and strength of materials. The sintering process under argon gas atmosphere prevented oxidation of the materials and ensured homogeneous sintering of the material at high temperature. It is important to analyze the effect of each parameter in the sintering process on the tensile-pull-out strength. Here, the effect of temperature, in experiments at 1000°C, tensile-pull-out strength generally decreases with increasing time and magnesium content. At 1000°C, it is 1729.4 N for 60 minutes and 10% magnesium content, while it decreases to 1103.7 N for 120 minutes and 30% magnesium content. At 1100°C, it was 1829 N at 60

minutes and 20% magnesium and 1930.3 N at 120 minutes and 10% magnesium. This shows that temperature increase can increase the strength under certain conditions. At 1200°C, it was measured as 1797.8 N at 60 minutes and 30% magnesium, and 2071.8 N at 120 minutes and 20% magnesium. This shows that the combination of high temperature and longtime can increase the strength. As for the effect of time, in general, it is seen that the strength decreases as the time increases. However, this may vary depending on the temperature and magnesium content. For example, a high value of 2127.9 N was obtained at 1200°C for 90 minutes and 10% magnesium content. When the effect of magnesium content is examined, it is seen that the strength generally decreases as the magnesium content increases. While it is 1729.4 N at 1000°C for 60 minutes and 10% magnesium content, it decreases to 1103.7 N at 30% magnesium content. However, this effect may vary with temperature and time. In conclusion, temperature, time and magnesium content have significant effects on tensile pull-out strength. Optimizing these parameters was found to be critical to improve the performance of the material.

3.2. Taguchi Analysis Method

Taguchi method was used as the experiment analysis method. The main step of this method is to determine the material with the most suitable strength depending on the tensile pull-out tests of the samples sintered with different parameters. Different magnesium ratios, different dwell times and different temperatures of the materials were selected as experimental parameters. There are 3 levels in each experimental parameter and $3^3 = 27$ experiments are required for the realization of this study. However, when the L9 orthogonal array (Table 2) was selected in the Taguchi method, this number of experiments was reduced to 9, which allowed the experiments to be carried out at less cost and time.

Table 2. Taguchi L9 working table

Specimen Num.	Sintering Temperature (1000-1100-1200°C)	Sintering Time (60-90-120 dk)	Magnezyum Perc. (10-20-30%)
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	4	2	1
5	5	2	2
6	6	2	3
7	7	3	1
8	8	3	2
9	9	3	3

Obtaining Signal to Noise (S/N) Ratios; Taguchi optimization is used to determine the most effective diffusion source parameters. Therefore, the use of S/N ratio is an effective factor in determining the welding parameters that give the best results [35, 36]. S/N ratios are a measure used to minimize unwanted variation while maximizing the desired yield in a process. Higher S/N ratios indicate that the process is more efficient. In this analysis, the effect of sintering temperature, sintering time and the addition amount of void-forming magnesium on S/N ratios were examined (Figure 6).

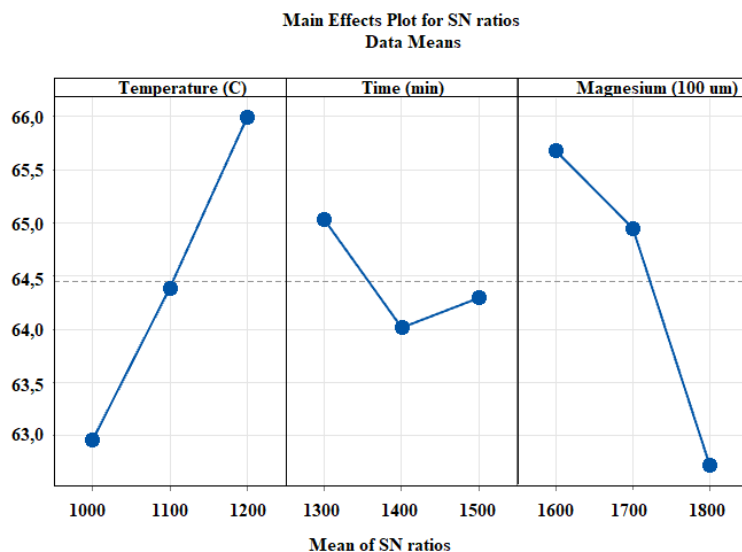


Figure 6. S/N performance plot for tensile pull-out strength.

This graph shows the main effects of S/N ratios for tensile-pull-out strength. The S/N ratio is used to measure the performance of a process and is evaluated on the principle of “the bigger the better”. Here, when the effects of different parameters (temperature, time, magnesium content) on the tensile-pull-out strength are analyzed, it is seen that the S/N ratio generally increases as the temperature increases. Especially at 1200°C, the S/N ratio reaches its highest value, indicating that higher temperatures can improve the tensile-pull-out strength performance. As the duration increases, the S/N ratio first increases but then decreases. 90 minutes time provides the highest S/N ratio. This indicates that the strength performance may decrease after a certain period of time. It is seen that the S/N ratio decreases as the magnesium content increases. 10% magnesium content provides the highest S/N ratio. This shows that lower magnesium ratios can improve the strength performance. The highest S/N ratio is obtained at the combination of 1200°C temperature, 90 minutes time and 10% magnesium content. This indicates that these parameters are the optimal conditions for optimizing tensile-pull-out strength performance. The combination of high temperature and appropriate time can improve the strength performance, while keeping the magnesium content low is also an important factor.

3.3. Analysis of Variance (ANOVA)

The purpose of using ANOVA in the experimental study is to investigate the parameters that affect the quality of strength in porous material production. Analysis of variance is a mathematical method in experimental studies and is used to interpret experimental data correctly and to determine which parameter level has more influence in the experimental study. The results of the analysis of variance (ANOVA) studies performed by Taguchi method for pull-out strength are given in Table 3. When Table 3 is examined, it is seen that the most effective parameter in porous implant production is sintering temperature with 49.60%, followed by magnesium content with 43.15% and time with 3.89%.

Table 3. Analysis of Variance results for porous implant strength

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Magnesium	1	423738	43.15%	423738	423738	38.45	0.008

Temperature (°C)	2	487074	49.60%	487074	243537	22.10	0.016
Time (min)	2	38172	3.89%	38172	19086	1.73	0.316
Error	3	33064	3.37%	33064	11021		
Total	8	982049	100.00%				

ANOVA is used to determine whether different factors are statistically significant. Magnesium content has a statistically significant effect on strength ($p < 0.05$). The contribution rate of 43.15% indicates that magnesium content has a significant effect on strength. Temperature also has a statistically significant effect on strength ($p < 0.05$). The contribution rate of 49.60% shows that temperature is the factor with the largest effect on strength. Duration does not have a statistically significant effect on strength ($p > 0.05$). The contribution rate of 3.89% indicates that duration has a relatively small effect on strength. Here the error term represents the variance that the model cannot explain. Here the error rate is 3.37%, indicating that the model explains the data well.

100% of the total variance is explained by the analyzed factors and the error term. Magnesium content and temperature have statistically significant effects on the strength of porous specimens. Temperature is the factor with the largest contribution. Time does not have a statistically significant effect in this analysis, but this may change under different conditions or with more data. These results suggest that factors such as magnesium content and temperature should be carefully controlled to optimize the strength of porous specimens. The effect of time seems to be less important, but more detailed studies with different parameters can be carried out for process optimization.

3.4. Regression Analysis for Pull-out Strength

A second order polynomial equation was developed with the Minitab 18 program to predict the notch impact strength within the specified level of parameters (Table 4).

Table 4. Regression analysis equation results for pull-out strength

Temperature (°C)	Time (min.)	Pull-out Strength (N) (for- 26.58 Magnesium)
1000	60	2043
1000	90	1883
1000	120	1959
1100	60	2296
1100	90	2137
1100	120	2213
1200	60	2612
1200	90	2452
1200	120	2528

Predicted pull-out strength: The probability plot in Figure 7 is distributed along the straight line and worked above the 95% confidence level and a rate of 97% was obtained.

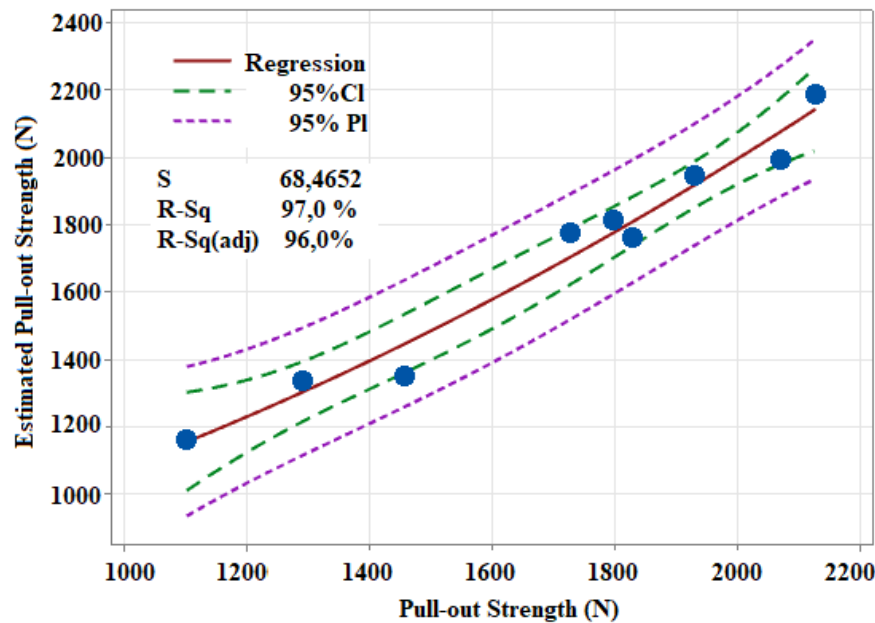


Figure 7. The graph of estimated Pull-out Strength

When the pull-out strength estimated plot is analyzed, the value of $R\text{-Sq} = 97.0\%$ shows how well the model fits the data. A high value of 97% indicates that the model explains the data very well and that there is a strong relationship between pull-out strength and predicted pull-out strength. The value of $S = 68.4652$ showed the average error in the predictions of the regression model, a lower value of S showed that the model made more accurate predictions. The 95% confidence interval showed how reliable the regression line was around the actual values. The 95% prediction interval predicted where new observations could be made and the graph showed that as the pull-out strength increased, the predicted pull-out strength also increased and this showed a positive relationship between the two variables. The regression line fit the data very well (with an $R\text{-Sq}$ value of 97%). This shows that the predictions of the model are very reliable and the data points on the graph are distributed very closely around the regression line. This shows that the model is consistent and represents the data well. When these data are evaluated, it is determined that there is a strong relationship between the pull-out strength and the estimated pull-out strength, the model fits the data very well and a high accuracy rate is achieved in the predictions. It was determined that as the pull-out strength increases, the estimated pull-out strength also increases, indicating that the material or joint can reach higher strength values.

4. Conclusions

In this study, it was aimed to produce specially designed porous titanium implant-like materials using powder metallurgy (T/M) method for biomedical applications and to investigate their mechanical properties. By designing the outer surface of the materials with a porous structure, it is aimed to create a better connective tissue with the jaw bone and to strengthen this connection. The controllability of the pore size enabled the optimization of the strength of the material against the forces to be applied.

- In the study, magnesium powder was used as a void-forming material and controlled porous structures were obtained by mixing with titanium powder at different ratios (10%, 20%, 30%).

The samples were sintered at different temperatures (1000°C, 1100°C, 1200°C) and different sintering times (60, 90, 120 minutes). The porous structure was formed by the evaporation of magnesium powder during the sintering process and the mechanical properties of the material were evaluated by tensile pull-out test.

- Optimization studies using Taguchi method revealed the effects of sintering temperature, time and magnesium ratio on the mechanical strength of the material. The results of ANOVA analysis showed that sintering temperature (49.60%) and magnesium ratio (43.15%) were the most effective parameters on the strength of the material. The effect of time was found to be lower (3.89%). In addition, the Taguchi experimental design was used for optimization, which saved a great deal of time and cost.
- The results of the regression analysis showed that there was a strong relationship between the pull-out strength and the predicted pull-out strength (97% R-Sq value) and the model fit the data very well. In particular, the combination of 1200°C sintering temperature, 90 minutes sintering time and 10% magnesium content was determined as the optimal conditions under which the highest strength values were obtained.
- This study represents an important step towards the use of porous titanium implants in biomedical applications. The porous structure exhibits mechanical properties compatible with bone tissue, which can improve the long-term stability and performance of implants. The results provide a basis for future studies and emphasize the importance of parameter optimization in biomaterial design.
- The findings of this study demonstrate the advantages of using porous structures in the design and manufacturing of biomedical implants and are hoped to shed light on new research in this field.

Acknowledgements

This article is derived from Dicle University BAP Project numbered MÜHENDİSLİK.18.012.

Conflict of Interest

The authors report no conflict of interest relevant to this article.

Research and Publication Ethics Statement

The authors declare that this study complies with research and publication ethics.

References

- [1] Yang, XL., Du, XF., Xu, ZL. et al. (2024). Progress in processing of porous titanium: a review. *Rare Metals*, 43, 1932–1955. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02570-z>
- [2] Abd-Elaziem, W., Mohammed, M. M., Yehia, H. M., Sebaey, T. A., Khan, T. (2024). Porous titanium for medical implants. *Sci. Park Publ*, 1(25), 10-62184.
- [3] Abd-Elaziem, W., Darwish, M. A., Hamada, A., Daoush, W. M. (2024). Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants applications: a comprehensive review. *Materials & Design*,

- 112850.
- [4] Usta, Y. ve Köylü, A. (2012). Yakıt Hücrelerinde Kullanılacak Gözenekli Paslanmaz Çelik Toz Metal Parçaların Üretim Parametrelerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 265-274.
- [5] Bauer, S., Schmuki, P., Von Der Mark, K., Park, J. (2013). Engineering biocompatible implant surfaces: part I: materials and surfaces. *Progress in Materials Science*, 58(3), 261-326.
- [6] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-aided design*, 69, 65-89.
- [7] Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International journal of advanced manufacturing technology*, 67, 1191-1203.
- [8] Andani, M. T., Moghaddam, N. S., Haberland, C., Dean, D., Miller, M. J., Elahinia, M. (2014). Metals for bone implants. Part 1. Powder metallurgy and implant rendering. *Acta biomaterialia*, 10(10), 4058-4070.
- [9] Akdogan G., Ti-6Al-4V Alaşımının Biyokorozyon ve Biyouyumluluk Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara/Türkiye, 1998.
- [10] Bandyopadhyay, A., Mitra, I., Avila, J. D., Upadhyayula, M., Bose, S. (2023). Porous metal implants: processing, properties, and challenges. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3), 032014.
- [11] Taddei, E.B., (2005). Characterization of Ti-35Nb-Zr-5Ta Alloyed Produced by Powder Metallurgy, *Materials Science Forum*, Trans. Tech. Pub., Switzerland, 498-499, 34-39.
- [12] Pałka, K., Pokrowiecki, R. (2018). Porous titanium implants: a review. *Advanced Engineering Materials*, 20(5), 1700648.
- [13] Najafizadeh, M., Yazdi, S., Bozorg, M., Ghasempour-Mouziraji, M., Hosseinzadeh, M., Zarrabian, M., Cavaliere, P. (2024). Classification and applications of titanium and its alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 100019.
- [14] Wang W, Ouyang Y, Poh CK. (2011). Orthopaedic implant technology: biomaterials from past to future. *Ann Acad Med Singap*. 40(5),237-44. PMID: 21678015.
- [15] Zardiackas, LD., Dillon, LD., Mitchell, DW., Nunnery, LA., Poggie, R., (2001) Structure, Metallurgy, and Mechanical Properties of a Porous Tantalum Foam J. Biomed Mater Research 58(2),180.
- [16] Bram M, Stiller C, Buchkremer HP, Stöver D, Baur H, (2000). High-Porosity Titanium, Stainless Steel, and Superalloy Parts. *Adv Eng Mater*; 2:196-199.
- [17] Kawamata, S., Kawai, T., Yasuge, E., Hoshi, I., Minamino, T., Kurosu, S., Yamada, H. (2024). Investigation of the mechanical strength of artificial metallic mandibles with lattice structure for mandibular reconstruction. *Materials*, 17(14), 3557.
- [18] Wen CE, Mabuchi M, Yamada Y, Shimojima K, Chino Y, Asahina T, Processing of biocompatible porous Ti and Mg. *Script Mat*, 45: 1147-53, 2001.
- [19] Roe, SC., Implant Materials: Structural Advances in Small Animal Total Joint Replacement, *Advances in Small Animal Total Joint Replacement*, ISBN: 978-0-470-95961-9, 272 pages, Vol 2, Dec 2012.

- [20] Nogueira, P., Magrinho, J. P., Silva, M. B., de Deus, A. M., Vaz, M. F. (2024). Compression properties of cellular iron lattice structures used to mimic bone characteristics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: *Journal of Materials: Design and Applications*, 14644207241241799.
- [21] Harrysson OLA., Cansızoglu Ö., Marcellin-Little DJ., Cormier DR., West HA., (2008). Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Materials Science and Engineering: C* 28 (3), 366-373.
- [22] Yalçın, B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması, (Doktora Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, 2007.
- [23] Tuikampee, S., Chaijareenont, P., Rungsiyakull, P., Yavirach, A. (2024). Titanium Surface Modification Techniques to Enhance Osteoblasts and Bone Formation for Dental Implants: A Narrative Review on Current Advances. *Metals*, 14(5), 515.
- [24] Pourhajrezaei, S., Abbas, Z., Khalili, M. A., Madineh, H., Jooya, H., Babaeizad, A., Samadi, A. (2024). Bioactive polymers: A comprehensive review on bone grafting biomaterials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134615.
- [25] Schuh, A., Luyten, J., Vidael, R., Höhle, W., Schmickal, T. (2007). Porous titanium implant materials and their potential in orthopedic surgery. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 38(12), 1015-1018.
- [26] Laptev, A., Bram, M. (2015). Manufacturing hollow titanium parts by powder metallurgy route and space holder technique. *Materials letters*, 160, 101-103.
- [27] M. Bram, C. Stiller, H.P. Buchkremer, D. Stöver, H. Baur. (2000). High-porosity titanium, stainless steel and superalloy parts, *Adv. Eng. Mater.*, 2 pp. 196-199.
- [28] Zhu, L., Luo, D., Liu, Y. (2020). Effect of the nano/microscale structure of biomaterial scaffolds on bone regeneration. *International Journal of Oral Science*, 12(1), 6.
- [29] Kim, S. W., Jung, H. D., Kang, M. H., Kim, H. E., Koh, Y. H., Estrin, Y. (2013). Fabrication of porous titanium scaffold with controlled porous structure and net-shape using magnesium as spacer. *Materials Science and Engineering: C*, 33(5), 2808-2815.
- [30] Torres, Y., Lascano, S., Bris, J., Pavón, J., Rodriguez, J. A. (2014). Development of porous titanium for biomedical applications: A comparison between loose sintering and space-holder techniques. *Materials Science and Engineering: C*, 37, 148-155.
- [31] Qadir, M., Li, Y., Biesiekierski, A., Wen, C. (2019). Optimized fabrication and characterization of TiO₂-Nb₂O₅-ZrO₂ nanotubes on β -phase TiZr₃₅Nb₂₈ alloy for biomedical applications via the Taguchi method. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(6), 2750-2761.
- [32] Jahanshahi, M., Sanati, M. H., & Babaei, Z. (2008). Optimization of parameters for the fabrication of gelatin nanoparticles by the Taguchi robust design method. *Journal of Applied Statistics*, 35(12), 1345-1353.
- [33] Chen, W. H., Uribe, M. C., Kwon, E. E., Lin, K. Y. A., Park, Y. K., Ding, L., Saw, L. H. (2022). A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112917.
- [34] Sharma, S. K., Gajević, S., Sharma, L. K., Pradhan, R., Miladinović, S., Ašonja, A., Stojanović,

- B. (2024). Magnesium-Titanium Alloys: A Promising Solution for Biodegradable Biomedical Implants. *Materials*, 17(21), 5157.
- [35] Gur, A. K., Ozay, C., Orhan, A., Buytoz, S., Caligulu, U., Yigitturk, N. (2014). Wear properties of Fe-Cr-C and B4C powder coating on AISI 316 stainless steel analyzed by the Taguchi method. *Materials Testing*, 56(5), 393-398.
- [36] Gür, A. K., Çaligulu, U., & Taşkın, M. (2011). The Optimisation of Adhesive Wear Behavior of AlmgSi/Sic Aluminyum Composite with Taguchi Method. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 1584-1590.

Research Article

Effects of Molar Ratio, Temperature and Water Content on Acidity and Viscosity of Deep Eutectic Solvent Formed from Choline Chloride-Ethylene Glycerol

Çağlar Mert Aydın^{1,*} 

Received: 19.11.2024

Accepted: 28.04.2025

¹Munzur University, Tunceli Vocational High School, Food Technology Department, Tunceli, Türkiye; cmaydin@munzur.edu.tr

*Corresponding Author

Abstract: Deep eutectic solvents (DESs) become preferred solvents owing to unique features and promising environmentally friendly nature they have. Evaluation their properties is essential in order to use them effectively. Even though DESs are a good alternative to classic solvents, their viscosity is high, limiting their usage in industrial applications. However, this can be overcome by adding cosolvent or varying application conditions. In this study, the effect of temperature ranging from 20°C to 60°C (293.15-333.15 K), molar ratio (1:1 to 1:9) and cosolvent addition (water) on acidity and viscosity of DES were investigated. Overall, as a result of this study, operation conditions had a significant effect on acidity and viscosity of DESs. Acidity and viscosity of DESs were on decrease as molar ratio increased, and the increase in temperature negatively affected viscosity of DESs. Dynamic viscosity of DESs were temperature dependence, following Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) equality. Cosolvent addition decreased viscosity of DESs. Addition of water higher than 25% did not have a significant effect on viscosity. In addition, water addition decreased acidity of DES up to 1:5 molar ratio, but no significant effect regardless of the amount of water addition on the acidity was determined. These results provide a new perceptive about the mechanism of DES designed for usage in food applications.

Keywords: deep eutectic solvent; temperature; physicochemical property; acidity; viscosity

Araştırma Makalesi

Mol Oranı, Sıcaklık ve Su İçeriğinin Kolin Klorür-Etilen Gliserolden Üretilen Derin Ötektik Çözücülerin Asitliğine ve Viskozitesine Etkileri

Özet: Derin ötektik çözücüler (DÖÇ) kendilerine özgü özellikleri ve sahip oldukları doğaya dost yapıları her geçen gün daha çok tercih edilmelerini sağlamaktadır. Etkin kullanılmaları için özelliklerinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Her ne kadar klasik çözücülere karşı iyi alternatif olmalarına karşın yüksek viskoziteleri bu çözücülerin endüstride kullanımlarını kısıtlamaktadır. Ama bu durum yardımcı çözücü katılarak veya operasyon şartlarının düzenlenmesiyle aşılabilmektedir. Bu çalışmada, 20°C- 60°C arasında değişen sıcaklık (293.15-333.15 K), mol oranı (1:1- 1:9) ve yardımcı çözücü katımının derin ötektik çözücünün asitliği ve viskozitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Genel olarak, bu çalışma sonucu olarak ortam şartları DÖÇ'lerin asitlikleri ve viskoziteleri üzerinde önemli etki göstermiştir. DÖÇ'lerin asitliği ve viskozitesi

mol oranı arttıkça azalmış, sıcaklık artışı DÖÇ'lerin viskozitesini olumsuz olarak etkilemiştir. DÖÇ'lerin viskozitelerindeki sıcaklık bağlantılı değişim göstermiş, bu da Vogel-Fulcher-Tammann eşitliğine uyumluluk göstermektedir. Yardımcı çözücü (su) ilavesi DÖÇ'lerin viskozitelerini düşürmüştür. 25%'den fazla su ilavesi viskozitede önemli bir değişim oluşturmamıştır. Ayrıca 1:5 mol oranına dek ek çözücü ilavesi asitliği azaltmıştır, fakat ilave edilen su miktarı asitlik üzerinde anlamlı değişim oluşturmamıştır. Sonuçlar gıda endüstri uygulamalarında kullanılmak için tasarlanan DÖÇ mekanizması hakkında yeni bir bakış açısı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: derin ötektik çözücü; sıcaklık; fizikokimyasal özellik; asitlik; viskozite

1. Introduction

There is an enormous problem in chemical-based industries due to conventional solvent dependence. The conventional solvents are hazardous and flammable. Thus, replacing them with environmental-friendly solvents is a need for sustainable industrial applications [1]. Deep eutectic solvents, that are an emerging solvent, are liquid at room temperature and are recommended as a good alternative to conventional solvents in chemical-based industries in previous studies [2, 3]. Many recent studies have been performed to mainly identify aspects and applications of DESs in industry applications. The technology has various advantages, including low-cost production, environmentally friendly applications, biodegradability and increase in process efficiency [3].

DESs are recommended for use in chemical industry due to their non-toxic nature. They are produced from at least two components. Chemically, they can be formed from a HBA (hydrogen bond acceptor) and a HBD (hydrogen bond donor) compound, strong hydrogen bond interactions between them creates DESs. Melting point is another advantage of DESs. Because, DESs have much lower melting point than the components forming them [1]. The lower melting point is due to hydrogen bond interactions between HBD and HBA. The interactions can decrease electronic anion-cation strength [2].

The aspects of DESs vary depending on chemical properties of forming components (HBA: Hydrogen bond acceptor, HBD: Hydrogen bond donor). The most used HBA component in DES formation is Choline chloride (ChCl), that is cheap, biodegradable, hygroscopic and non-toxic. The DESs containing ChCl easily diffuse into the matrix, thus are effective in extraction of bioactive compounds in foods [4]. HBDs are generally comprised of metal halides, carbohydrates, amides, alcohols and carboxylic acid. Choosing an appropriate HBD has importance due to its strong effect on solubility. The HBD can increase the solubility due to surface complexation reactions in solvent [7, 34]. Ethylene glycerol is an emerging component in DES formation. Ethylene glycerol is most widely used in DES formation, because it is cheap and easy to diffuse [4]. Similar to ChCl, it is non-toxic and effective to diffuse into any matrix [5]. A previous study has reported the DES, formed from ChCl and ethylene glycerol, had the lowest freezing point and better diffusion efficiency than the DES formed from ChCl with different HBD components [6].

Suitable DES selection can be made for a specific industrial application identifying DES features. In the present study, the DES, that was synthesized from ChCl as HBA and ethylene glycerol as HBD, has been explored investigating the effect of temperature on viscosity and acidity of the DES. The impact of temperature on properties of DES has been rarely assessed so far. However, it is a fundamental aspect in evaluation of any solvent in industrial applications. Because it is effective in determination of molecular volume and activation energy. In addition, the importance of viscosity is related to chemical transformations of solution controlling mass transport [7]. The high viscosity makes DES application impossible in chemical-based industries [8]. It is the first time that a study reports the effect of temperature on viscosity and acidity of DES formed from choline chloride and ethylene glycerol at different molar ratio. Moreover, the effect of water addition on DES properties was investigated.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Choline chloride (98%) and Ethylene Glycerol were supplied from Sigma-Aldrich (St. Louis, Missouri, USA), and pH meter buffer solution powders were obtained from Duvin (DuvinDD, China).

2.2. Solvent preparation

The solvent was formed according to the method described by a previous study [12]. The corresponding components, namely choline chloride and ethylene glycerol, were mixed at different molar ratio ranging from 1:1 to 1:9 in a water bath (Wisebath, WSB series) at 70°C for 30 min until the formation of a uniform colorless transparent liquid. Then, DESs were cooled down to room temperature and kept in sealed vessel until analyze.

2.3. Determination of physicochemical properties

The investigated physicochemical properties were viscosity and acidity at temperature ranging between 20°C to 60°C (293.15- 333.15 K), at molar ratio of 1:1 to 1:9, without and with different water addition content. Each measurement was performed three times using a thermostatic water bath.

The temperature degrees were chosen according to the result of previous studies [35, 38], reporting the conservation of the characteristic supramolecular interactions in DES up to 80°. Moreover, water addition effect was investigated at the content ranging from 25% to 50%. These water content percentages were decided according to the finding of a previous study [38], stating that the increase in temperature linearly affects physicochemical properties of DES, formed from ChCl/Glycols, up to 25% water addition to DES formation, and the supramolecular structures of DES/water mixtures were affected differently from temperature after higher than 25% water content. Moreover, the molar ratios were determined according to the method of a previous study [37].

2.3.1. Viscosity

It was performed according to the method identified by a previous study [15] using Anton Paar MCR 301 (Anton Paar GmbH, Graz, Austria) within temperature range of 20°C- 60°C (293.15- 333.15 K). The increase in temperature was at the rate of 20°C per min. The gap size was 1 mm and PP25 was used as the cone (24.981 mm in diameter). The cone and plate design were selected over parallel plate layout. 1 mL of sample was applied to the apparatus using a syringe. The sample was allowed to settle on the plate before the measurements.

Apparent viscosity was measured following the method identified by Dimante and Lan [9]. The average of 30 data points from 0 s⁻¹ to 100 s⁻¹ shear rate at temperature range of 20°C to 60°C was reported as the viscosity. Anton Paar Labor-software was used to evaluate the data.

2.3.2. Acidity

Acidity was measured with a digital pH meter (Thermo Scientific, Model: Orion 4-star) at temperatures ranging from 20°C to 60°C. The calibration was verified before the analyze with buffer solutions at 4.01, 6.86 and 9.18 pH.

2.4. Statistical analysis

Statistical evaluation was performed using SPSS version 29 software (statistical package for social science). Data was firstly applied to homogeneity test (Shapiro wilk). The result showed all the data homogeneously distributed, thus parametric statistic methods were applied. ANOVA test with Duncan's multiple comparison was applied to the data for significance of differences with the significance level of $p < 0.05$.

3. Results and Discussion

All deep eutectic solvents were prepared through mixing forming components, namely ChCl and ethylene glycerol, until a homogeneous liquid was formed. Evaluation physicochemical properties of the mixture was performed according to the change in viscosity and acidity in proportion to water content and molar ratio of DES under different temperature ranging between 20°C to 60°C. In previous studies, stronger hydrogen bond interactions between HBD and HBA was reported with water addition [36], and the molar ratio of the composition impacted the eutectic point of a solution [13, 14]. In addition, temperature can directly influence hydrogen bond interactions, resulting to the change in properties of DES [33].

3.1. Viscosity

Viscosity influences solvent application into chemical-based industries. Strong hydrogen bond interactions causes high viscosity, resulting to low molecular mobility and high fluid flow resistance [12]. Thus, better industrial applications require DESs to have low viscosity, that can save energy in manufacturing process and in application [11, 33]. The possible way to synthesise low viscosity DES is to add water to DES formation. A certain amount mole fraction of water was determined not to improve diffusion of ions, but significantly decreased viscosity, enhancing fluidity and mass transfer performance of solution. However, high molar fraction of water can form hydrogen bonds with anions, causing serious changes in DES structure [4, 17]. Thus, effect of water addition to DES formation was investigated at the amounts of 25% and 50%.

Apparent viscosities at different temperatures and molar ratios are demonstrated in Table 1 for DESs, and Table 2 and 3 shows apparent viscosities of aqueous DESs. The viscous flow tests were shown in figure 3 for DESs, and in figure 4 for aqueous DESs.

Table 1. The values of apparent viscosity for the DES without water addition

Molar Ratios Temperature	Apparent Viscosity, cP			Significant, <i>p</i>
	20°C	40°C	60°C	
1:1	1610±20a	530±10a	170±10a	<0.001
1:2	1230±10b	410±10b	130±0b	<0.001
1:3	650±10c	240±10c	80±0c	<0.001
1:4	340±10d	130±10d	50±0d	<0.001
1:5	160±10e	70±0e	30±0e	<0.001
1:6	140±10f	60±0e,f	20±0f	<0.001
1:7	100±0g	50±0f	20±0f	0.100
1:8	60±0h	20±0g	10±0g	0.018
1:9	40±0j	20±0g	10±0g	0.018
Significant, <i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001	

Note: Different letters in the same column show significant difference ($p < 0.05$).

Mean value ± standard error (n=3)

Table 1 and figure 1 show apparent viscosity of DESs. There was a steadily decreasing trend in apparent viscosity as molar ratio and temperature were on rise. The decrease in viscosity can enhance DES transport properties, thus it can retrenchment cost of using this solvent into practice for industrial applications [10]. Molar ratio and temperature significantly influenced apparent viscosity of DESs, $p < 0.05$. Similar finding was reported in previous studies, stating a decrease in viscosity depended on increasing content of HBD [13, 14] and temperature [31, 32]. In addition, forming components have also an essential effect on viscosity [3]. Jablonsky et al. [4] indicated that addition of HBD (Lactic acid) to the mixture containing ChCl, reduced viscosity, and HBD type can influence viscosity of DESs depending on its carbon chain length [15]. A similar phenomenon for HBA concentration was found at a fixed temperature [16].

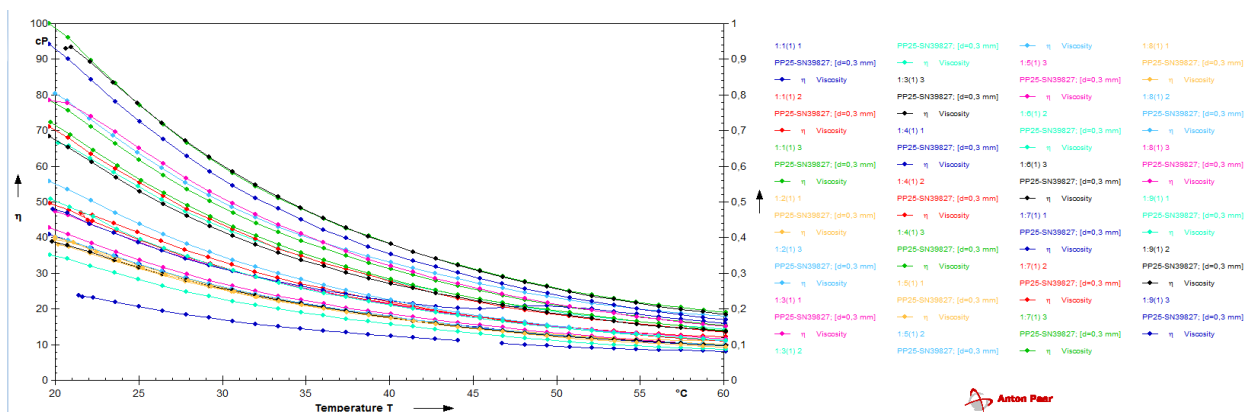


Figure 1. Apparent viscosity of deep eutectic solvents at the temperature ranging from 20°C to 60°C

Table 2 and figure 2 demonstrate apparent viscosity of the DES with cosolvent addition (water-25%) and table 3 is for the DES with cosolvent addition (water-50%). Water addition to DES formation significantly decreased the viscosity at the molar ratio lower than 1:8 under any ambient temperature, meaning even though low water addition does not affect ions diffusion, high amount of water addition forms hydrogen bonds with anions [17]. Similar result was reported by previous studies, stating high amount of water addition in DES formation causes the decrease in its viscosity [4,15,33]. In addition, water addition to DES formation affects H^+ bond interaction between HBA and HBD, thus can influence apparent viscosity [5]. The highest apparent viscosities among water-added DESs were measured at temperature of 20°C and the lowest were measured at temperature of 60°C regardless of molar ratio.

Table 2. The values of apparent viscosity for the DESs with 25% cosolvent addition (water)

Molar Ratios	Apparent Viscosity, cP			Significant, <i>p</i>
	20°C	40°C	60°C	
1:1	60±4a	20±1a	10±0a	0.090
1:2	50±2a	20±1a	10±0a	0.021
1:3	70±2a	30±1a	10±0a	0.003
1:4	50±2a	20±1a	10±0a	0.021
1:5	40±1a	20±1a	10±0a	0.011
1:6	40±1a	20±1a	10±0a	0.011
1:7	60±1a	30±1a	10±0a	<0.001
1:8	60±2a	20±1a	10±0a	0.007
1:9	70±2a	30±1a	10±0a	0.003
Significant, <i>p</i>	0.548	0.649	1.000	

Note: Different letters in the same column show significant difference ($p < 0.05$).

Mean value ± standard error (n=3)

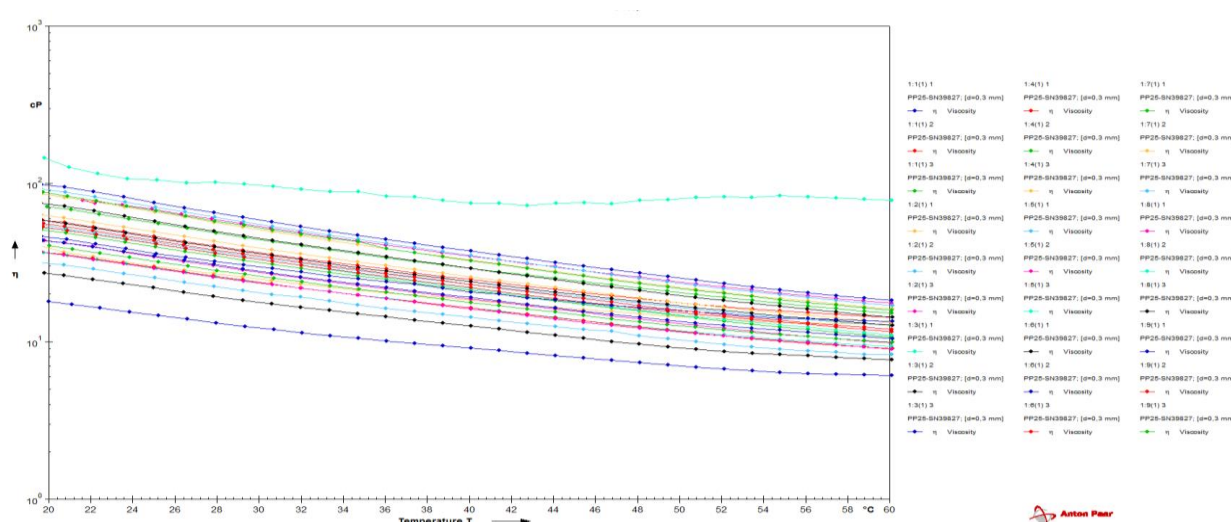


Figure 2. Apparent viscosity of the DESs with water addition (25%)

Temperature significantly changed viscosity of aqueous DESs, except for molar ratio of 1:1. Water can act not only as hydrogen-bond donor but also as acceptor in DES structure [22]. At low molar ratio, DES matrix adsorbed water molecules with forming hydrogen bonds with anions, thus the change in temperature did not influence viscosity [33]. Previous studies reported decrease in viscosity for aqueous DESs as temperature was on increase [18, 19, 20]. High temperature affected interactions between DES molecules, resulting to low viscosity [17]. Low viscosity enhanced solvent solubility and mass transfer, therefore low viscosity is desirable in industrial applications of DESs [21]. Regardless of water addition amount, viscosities of aqueous DESs at 40°C and 60°C didn't show significant difference between each other. However, viscosity of aqueous DESs at 20°C was significantly higher than viscosities of aqueous DESs at 40°C and 60°C at any water addition amount. Similar result was stated by previous studies [21, 22, 31]. Moreover, molar ratio did not affect apparent viscosity of aqueous DESs regardless of addition amount, as stated by a previous study [3].

Table 3. The values of apparent viscosity for the DESs with 50% cosolvent addition (water)

Molar Ratios	Apparent Viscosity, cP			Significant, <i>p</i>
Temperature	20°C	40°C	60°C	
1:1	50±3a	20±1a	10±0a	0.082
1:2	60±2a	30±1a	10±0a	0.009
1:3	70±3a	30±1a	10±0a	0.018
1:4	60±3a	20±1a	10±0a	0.034
1:5	40±1a	20±1a	10±0a	0.011
1:6	40±1a	20±1a	10±0a	0.011
1:7	70±3a	30±1a	10±0a	0.018
1:8	90±6a	40±3a	30±2a	0.110
1:9	60±2a	30±1a	10±0a	0.009
Significant, <i>p</i>	0.251	0.615	1.000	

Note: Different letters in the same column show significant difference ($p < 0.05$).

Mean value ± standard error (n=3)

The amount of water addition did not influence apparent viscosity of DESs at any temperature, $p > 0.05$. Similar result was reported for viscosity of DESs produced from choline chloride [33]. In addition, 7-10% water addition in DES formation can halve viscosity [33]. In this study, higher amount (25 and 50%) than 7-10% water addition were evaluated, and no significant difference in viscosity was detected.

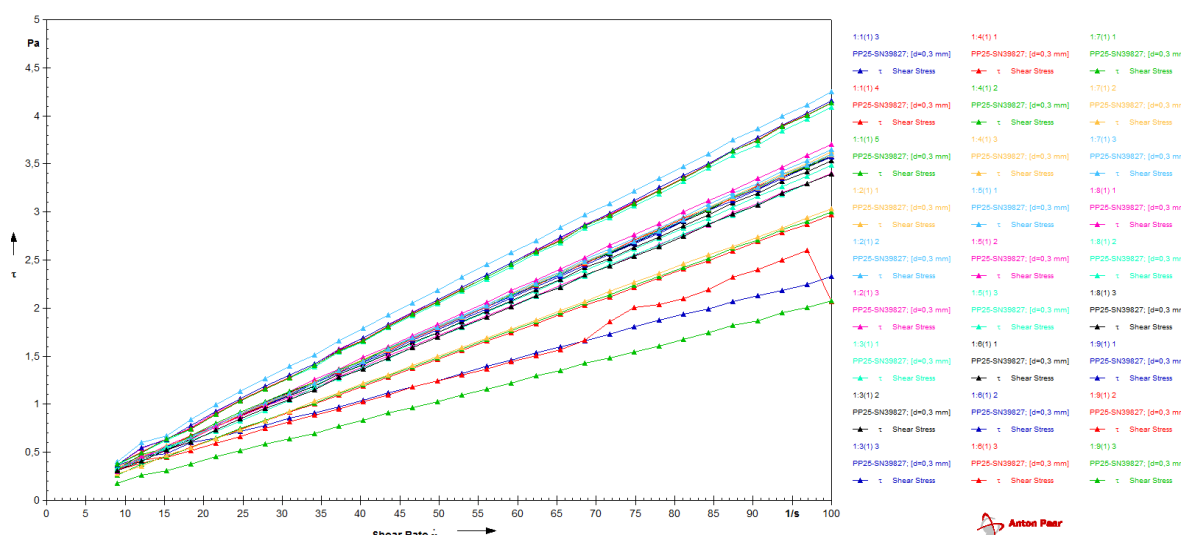


Figure 3. Viscous flow tests of the DESs without water addition

Figure 3 shows viscous flow tests of DESs, and figures 4 demonstrates viscous flow tests of aqueous DESs. Regardless of molar ratio and water addition amount, shear rate increased as shear stress was on rise. This exhibits Arrhenius behavior. However, even though shear rate increased with rise in shear stress for DES with 25% water addition, they showed dilatant fluid. This is due to effect of water addition to strong H^+ bond interaction between HBA and HBD [5, 31]. Similar effect of water addition to DES viscosity behavior was reported by previous studies [24, 33]. In addition, the interactions were stated to weaken with water addition, and they even disappear after 50% water addition (w/w) [33].

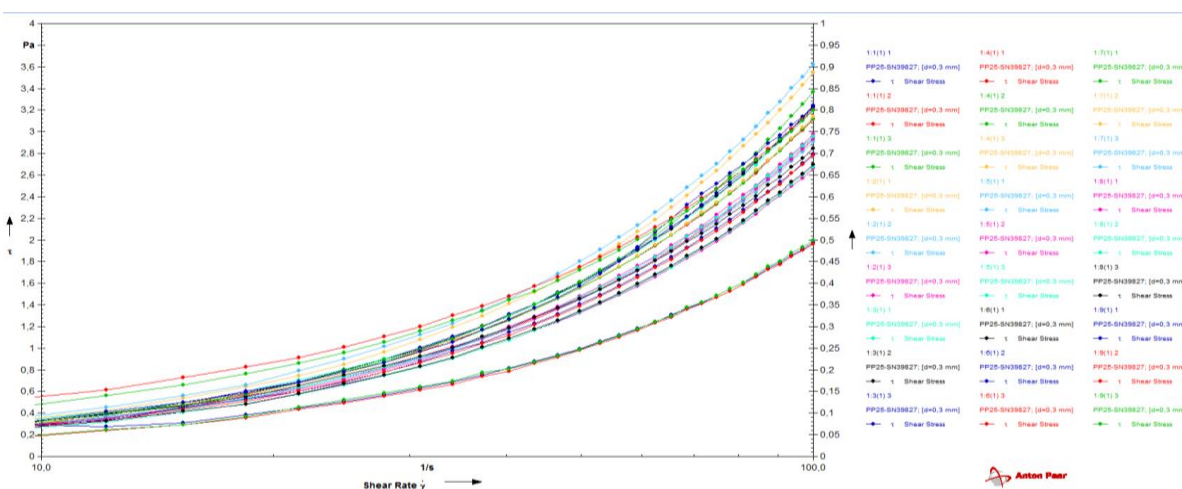


Figure 4. Viscous flow tests of the DESs with 25% water addition

Volume of salt ions and voids directly affects DES viscosity according to Eyring equation, meaning that electrostatic forces are more dominant than van der Waals interactions [15]. The viscosity of all DESs and aqueous DESs mixtures decreased exponentially with increase in temperature, resulting to higher molecular mobility with reduction in DES interactions [12].

3.2. Acidity

Estimation pH of new solvents to comprehend their dissolution, catalytic, biomass delignification and other properties is useful for applications [23]. High acidity enables better delignification, while low acidity reduces the cost of putting food industrial applications of DES into practice due to its inhibitory effect against corrosion [10]. The pHs of all choline chloride/ethylene glycerol mixtures were found to

be in acidic region (1.28 to 5.96) due to acidic hydrogens in ethylene glycerol structure [27]. Table 4 shows pH of DESs, and Table 5 and 6 demonstrate pH of aqueous DESs (25% and 50% water, w/w).

Table 4. The values of pH for DES without water

Molar Ratios Temperature	Acidity, pH			Significant, <i>p</i>
	20°C	40°C	60°C	
1:1	1.28±0.01a	1.70±0.01a	1.84±0.02a	<0.001
1:2	2.64±0.01b	2.86±0.02b	3.22±0.02b	<0.001
1:3	4.63±0.01c	3.95±0.01c	3.97±0.01c	0.123
1:4	4.49±0.00d	4.50±0.01d	4.51±0.01d	0.332
1:5	5.14±0.01e	4.84±0.01e	4.66±0.02e	0.049
1:6	5.24±0.01f	5.02±0.02f	4.76±0.01f	<0.001
1:7	5.47±0.01g	5.09±0.01g	4.98±0.02g	<0.001
1:8	5.84±0.02h	5.48±0.02h	5.35±0.03h	<0.001
1:9	5.96±0.02j	5.68±0.02j	5.58±0.02j	<0.001
Significant, <i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001	

Note: Different letters in the same column show significant difference ($p < 0.05$).

Mean value ± standard error (n=3)

Ions activity in DESs changes with temperature [12, 25]. Thus, pH of DESs significantly changed in proportion to temperature and molar ratio. DESs at 1:1 and 1:2 molar ratio were the most acidic solvent, pH<3. The pH increased as more HBD was added to mixtures. The similar result was stated by other studies [13, 24, 27, 30]. High concentration of anion halide salt (ChCl) doesn't bind to HBD (ethylene glycerol), these free ChCl in mixture decreases pH of DESs [13].

Water addition influences interactions between HBA and HBD [5], resulting to decrease in concentration of compounds (mainly HBD) [24]. There was a significant difference in pH of aqueous DESs at any molar ratio. Previous studies reported similar result, showing the effect of water addition to DES formation on pH [21, 24, 28]. Moreover, the amount of added water didn't significantly influence pH regardless of molar ratio and temperature. Similar finding was reported by previous studies [28, 29].

Table 5. The values of acidity for aqueous DESs with 25% cosolvent addition (water)

Molar Ratios Temperature	Acidity, pH			Significant, <i>p</i>
	20°C	40°C	60°C	
1:1	2.74±0.01a	2.36±0.01a	2.22±0.03a	<0.001
1:2	3.26±0.01b	2.71±0.02b	2.62±0.04b	<0.001
1:3	3.94±0.01c	3.28±0.01c	3.08±0.02c	<0.001
1:4	4.31±0.01d	3.77±0.01d	3.43±0.03d	<0.001
1:5	4.42±0.01f	3.83±0.01e	3.60±0.03e	<0.001
1:6	4.40±0.01e	3.92±0.02f	3.74±0.04f	<0.001
1:7	4.45±0.00g	4.00±0.01g	3.82±0.02g	<0.001
1:8	4.72±0.01h	4.08±0.02h	3.89±0.04h	<0.001
1:9	4.81±0.02j	4.15±0.01j	3.97±0.03j	<0.001
Significant, <i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001	

Note: Different letters in the same column show significant difference ($p < 0.05$).

Mean value ± standard error (n=3).

H⁺ bond interaction between HBA and HBD influences pH of DESs [25]. Regardless of water addition and amount, pH of almost all DESs in this study significantly changed with temperature. Water addition regardless of amount decreased pH for DESs formed at higher molar ratio than 1:2, water addition amount didn't have a significant effect on pH at any temperature, $p > 0.05$. The lowest pHs were measured at 60°C for aqueous DESs while the lowest pHs were found at 20°C for DESs. Similar effect of temperature on pH was reported in previous studies for DESs with or without water addition [26, 27].

Moreover, pH of DESs at 1:3, 1:4 and 1:5 molar ratios didn't significantly change with temperature while pH significantly changed in aqueous DESs at 1:3, 1:4 and 1:5 molar ratios. Previous studies stated similar result for DESs formed from different forming components, namely choline chloride-based DESs [27] and phosphonium-based DESs [32].

Table 6. The values of acidity for the DESs with 50% cosolvent addition (water)

Molar Ratios	Acidity, pH			Significant, <i>p</i>
	20°C	40°C	60°C	
1:1	2.49±0.02a	2.29±0.02a	2.03±0.01a	<0.001
1:2	3.16±0.02b	2.69±0.02b	2.50±0.00b	<0.001
1:3	3.76±0.02c	3.27±0.01c	3.05±0.00c	<0.001
1:4	4.10±0.01d	3.63±0.01d	3.36±0.00d	<0.001
1:5	4.26±0.00e	3.77±0.00e	3.47±0.00e	0.100
1:6	4.31±0.01f	3.81±0.01f	3.43±0.00f	<0.001
1:7	4.35±0.01g	3.90±0.02g	3.70±0.00g	<0.001
1:8	4.67±0.00h	3.98±0.00h	3.78±0.00h	0.018
1:9	4.73±0.00j	4.13±0.00j	3.82±0.00j	0.100
Significant, <i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001	

Note: Different letters in the same column show significant difference ($p < 0.05$).
Mean value $\pm$ standard error ($n=3$).

4. Conclusion and Suggestions

Acidity and viscosity for DESs formed from choline chloride/ethylene glycerol at different molar ratios were evaluated at temperature range of 20-60°C (293.15- 333.15 K) in this study. In addition, change in these physicochemical properties with cosolvent addition was analysed for aqueous solutions (from 25% to 50%).

Apparent viscosity of DESs was on decrease as a function of molar ratio. The highest viscosity was determined for DES with 1:1 HBA: HBD molar ratio regardless of added water amount and temperature. Temperature significantly affected viscosity; the lowest viscosities were measured at 60°C while the highest ones were found at 20°C regardless of molar ratio. Water addition significantly reduced viscosity of DESs. The amount of added water didn't cause any significant difference in viscosity. Molar ratio and temperature had a significant effect on pH of all DESs, and all choline chloride/ethylene glycerol mixtures were found to be in acidic region. The lowest pHs was measured for 1:1 HBA: HBD molar ratio regardless of temperature and water added amount, and pH increased in proportion to molar ratio while pH changed associated with temperature. In addition, amount of water didn't cause any significant difference in pH of DESs.

Overall, temperature and molar ratio have an effect on DES acidity and viscosity. Thus, they should be taken into account before any DES application. Moreover, water addition modified DES properties for favorable manner, resulting to decrease in acidity and viscosity. The changes observed in DES properties can enable comprehension of solvent used for food applications and understanding mechanism of acidic DESs properties.

Acknowledgment

The author acknowledges Munzur University for providing the necessary research environment for the study.

Conflict of Interest

The Author reports no conflict of interest relevant to this article.

Research and Publication Ethics Statement

The author declares that this study complies with research and publication ethic.

References

- [1] Almeida, P.P.V., Shiwaku, I.A., Maximo, G.J. and Batista, E.A.C. (2021). Choline chloride-based deep eutectic solvents as potential solvent for extraction of phenolic compounds from olive leaves: Extraction optimization and solvent characterization, *Food Chemistry*, 352, 129346. 10.1016/j.foodchem.2021.129.
- [2] Wu, L., Chen, Z., Li, S., Wang, L. and Zhang, J. (2021). Eco-friendly and high- efficient extraction of natural antioxidants from *Polygonum aviculare* leaves using tailor-made deep eutectic solvents as extractants, *Separation and Purification Technology*, 262, 118339. 10.1016/j.seppur.2021.118339.
- [3] Jablonsky, M., Jancikova, V., Sima, J. and Jablonsky, J. (2022). Physical and chemical characterization of water containing choline chloride based solvents with lactic acid and dihydric alcohol. *Biointerface research in applied chemistry*. 13(2). 167. 10.33263/BRIAC132.167.
- [4] Tang, B. and Row, K.H. (2013). Recent developments in deep eutectic solvents in chemical sciences. *Monatshefte fur Chemie*. 144(10). 1427-1454. 10.1007/s00706-013-1050-3.
- [5] Leron, R.B. and Li, M.H. (2012). Olar heat capasitis of choline chloride-based deep eutectic solvents and their binary mixtures with water. *Thermochimica Acta*. 530. 52-57. 10.1016/j.tca.2011.11.036.
- [6] Venkatesan, T., Choi, Y. and Kim, Y. (2019). Impact of different extraction solvents on phenolic content and antioxidant potential of *Pinus densiflora* Bark Extract. *BioMed Research International*. 14. 3520675. 10.1155/2019/3520675.
- [7] Hansen, B.B., Spittle, S., Chen, B., Poe, D., Zhang, Y., Klein, J.M., Horton, A., Adhikari, L., Zelovich, T., Doherty, B.W., Gurkan, B., Maginn, E.J., Ragauskas, A., Dadmun, M., Zawodzinski, T.A., Baker, G.A., Tuckerman, M.E., Savinell, R.F. and Sangoro, J.R. (2020). Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications. *Chem Rev*. 121(3). 1232- 1285. 10.1021/acs.chemrev.0c00385.
- [8] Diamante, L.M. and Lan, T. (2014). Absolute viscosities of vegetable oils at different temperatures and shear rate range of 64.5 to 4835 s⁻¹. *Journal of food processing*. 3. 234583. 10.1155/2014/234583.
- [9] Kehili, M., Isci, A., Thieme, N., Kaltschmitt, M., Zetzel, C. and Smirnova, I. (2022). Microwave-assisted deep eutectic solvent extraction of phenolics from defatted date seeds and its effect on solubilization of carbohydrates. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14(6). 10.1007/s13399-022-03027-6.
- [10] Shi, Q., Zhang, X., Zhao, Y., Wu, X., Liu, J., Zhang, Y. and Fang, Z. (2021). Ultrasonic-assisted extraction, calcium alginate encapsulation and storage stability of mulberry pomace phenolics. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 15(14). 10.1007/s11694-021-01021-6.
- [11] Cotroneo-Figueroa, V.P., Gajardo-Parra, N.F., Lopez-Porfiri, P., Leiva, A., Gonzalez-Miquel, M., Garrido, J.M. and Canales, R.I. (2022). Hydrogen bond donor and alcohol chain length effect on the physicochemical properties of choline chloride based deep eutectic solvents mixed with alcohols, *J. Mol. Liq.*, 345, 116986, 10.1016/j.molliq.2021.116986.
- [12] Manurung, R., Simanjuntak, G.C., Raja, N.P., Ardian, S., Alhamdi, M.A., Siregar, H. and Zuhri, R.R.S. (2019). Production of choline chloride based deep eutectic solvent with hydrogen bond donor D- glucose and ethylene glycol. *IOP conference series materials science and engineering*. 505(1). 012134. 10.1088/1757-899X/505/1/012134.
- [13] Zhao, B.Y., Xu, P., Yang, F.X., Wu, H., Zong, M.H. and Lou, W.Y. (2015). Biocompatible deep eutectic solvents based on choline chloride: characterization and application to the extraction of

- rutin from sophora japonica. ACS sustainable chemistry and engineering. 3. 2746- 2755. 10.1021/acssuschemeng.5b00619.
- [14] Mjalli, F.S. and Mousa, H. (2017). Viscosity of aqueous ionic liquids analogues as a function of water content and temperature. Chinese journal of chemical engineering, 25, 1877-1883. 10.1016/j.cjche.2017.09.008.
- [15] Gajardo-Parra, N.F., Cotroneo-Figueroa, V.P., Aravena, P., Vesovic, V. and Canales, R.I. (2020). Viscosity of choline chloride based deep eutectic solvents: experiments and modeling, J. Chem. Eng. Data, 65(11), 5581-5592. 10.1021/acs.jced.0c00715.
- [16] Fan, C., Sebbah, T., Liu, Y. and Cao, X. (2021). Terpenoid-capric acid based natural deep eutectic solvent: Insight into the nature of low viscosity. Cleaner engineering and technology, 3. 100116. 10.1016/j.clet.2021.100116.
- [17] Al-Dawsari, J.N., Jemai, A.B., Wazeer, I., Makraoui, S., AlMansour, M.A. and Kali, M.K.H. (2020). Fitting of experimental viscosity to temperature data for deep eutectic solvents. Journal of molecular liquids. 310. 113127. 10.1016/j.molliq.2020.113127.
- [18] Ghaedi, H., Ayoub, M., Sufian, S., Shariff, A.M. and Lal, B. (2017). The study on temperature dependence of viscosity and surface tension of several phosphonium-based deep eutectic solvents. Journal of molecular liquids. 241. 500-510. 10.1016/j.molliq.2017.06.024.
- [19] Savi, L.K., Carpine, D., Nina, W., Ribani, R.H. and Haminiuk, C.W.I. (2019). Influence of temperature, water content and type of organic acid on the formation, stability and properties of functional natural deep eutectic solvents. Fluid phase equilibria. 488. 40-47. 10.1016/j.fluid.2019.01.025.
- [20] Teng, Z., Wang, L., Huang, B., Yu, Y., Liu, J. and Li, T. (2022). Synthesis of green deep eutectic solvents for pretreatment wheat straw: enhance the solubility of typical lignocellulose. Sustainability. 14(2). 657. 10.3390/su14020657.
- [21] Abdullah, G.H. and Kadhom, M.A. (2016). Studying of two choline chloride's deep eutectic solvents in their aqueous mixtures. International journal of engineering research and development. 12(9). 73-80.
- [22] Jablonsky, M., Majova, V., Ondrigova, K. and Sima, J. (2015). Preparation and characterization of physicochemical properties and application of novel ternary deep eutectic solvents. Cellulose. 5. 3031-3045. 10.1007/s10570-019-02322-2.
- [23] Sirvio, J.A., Haataja, R., Kantola, A.M., Terhi, S. and Henriikki, L. (2022). Insights into the role of molar ratio and added water in the properties of choline chloride and urea-based eutectic mixtures and their cellulose swelling capacity. Physical chemistry chemical physics. 46. 28609-28620. 10.1039/D2CP04119G.
- [24] Jancikova, V., Jablonsky, M., Volekova, K. and Surina, I. (2022). Summarizing the effect of acidity and water content of deep eutectic solvent like mixtures- A review. Energies. 15(24). 9333. 10.3390/en15249333.
- [25] Sekharan, T.R., Chandira, R.M., Rajesh, S.C., Tamilvanan, S., Vijayakumar, C.T. and Venkateswarlu, B.S. (2021). pH, viscosity of hydrophobic based natural deep eutectic solvents and the effect of curcumin solubility in it. Biointerface research in applied chemistry. 11(6). 14620-14633. 10.33263/BRIAC116.1462014633.
- [26] Skulcova, A., Russ, A., Jablonsky, M. and Sima, J. (2018). The pH behavior of seventeen deep eutectic solvents. BioRes. 13(3). 5042-5051. 10.15376/biores.13.3.5042-5051.

- [27] Jablonsky, M., Skulcova, A., Malvis, A. and Sima, J. (2018). Extraction of value-added components from food industry based and agro-forest biowastes by deep eutectic solvents. *J Biotechnol.* 282. 46-66. 10.1016/j.jbiotec.2018.06.349.
- [28] Panic, M., Radovic, M., Bubalo, M.C., Radosevic, K., Coutinho, J.A.P., Redovnikovic, I.R. and Jurinjak, T.A. (2022). Prediction of pH value of aqueous acidic and basic deep eutectic solvent using COSMO-RS profiles molecular descriptors. *Molecules.* 27(14). 4489. 10.3390/molecules27144489.
- [29] Ghaedi, H., Ayoub, M., Sufian, S., Hailegiorgis, S.M., Murshid, G. and Khan, S.N. (2018). Thermal stability analysis, experimental conductivity and pH of phosphonium-based deep eutectic solvents and their prediction by a new empirical equation. *J Chem Therm.* 116. 50-60. 10.1016/j.jct.2017.08.029.
- [30] Khokhar, V., Dhingra, D. and Pandey, S.K. (2022). Effect of temperature and composition on density and dynamic viscosity of (lanthanide metal salts + urea) deep eutectic solvents. *Journal of molecular liquids.* 360(11). 119396. 10.1016/j.molliq.2022.119396.
- [31] Kareem, M.A., Mjalli, F.S., Hashim, M.A. and AlNashef, I.M (2010). Phosphonium-based ionic liquids analogues and their physical properties. *J Chem Eng Data.* 55(11). 4632-4637. 10.1021/je100104v.
- [32] Gabriele, F., Chiarini, M., Germani, R., Tiecco, M. and Spreti, N. (2019). Effect of water addition on choline chloride/ glycol deep eutectic solvents: characterization of their structural and physicochemical properties. *Journal of molecular liquids.* 291. 111301. 10.1016/j.molliq.2019.111301.
- [33] Picchio, M.L., Minudri, D., Mantione, D., Miryam, C.G., Gregorio, G.G., Ruth, S., Muller, A.J. and Tome, L.C. (2022). Minari RJ, Mecerreyes D. Natural deep eutectic solvents based on choline chloride and phenolic compounds as efficient bioadhesives and corrosion protectors, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 10(25), 8135- 8142. 10.1021/acssuschemeng.2c01976.
- [34] Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G.J., Verpoorte, R., Choi, Y.H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta.* 766, 61-68. 10.1016/j.aca.2012.12.019.
- [35] Nowosielski, B., Jamrogiewicz, M., Luczak, J., Tercjak, A., Warminska, D. (2023). Effect of temperature and composition on physical properties of deep eutectic solvents based on 2-(methylamino) ethanol- measurement and prediction. *Journal of Molecular Liquids.* 371, 121069. 10.1016/j.molliq.2022.121069.
- [36] Jancikova, V., Jablonsky, M., Volekova, K., Surina, I. (2022). Summarizing the effect of acidity and water content of deep eutectic solvent-like mixtures- a review. *Energies.* 15(24). 9333. 10.3390/en15249333.
- [37] Aydin, C.M., Guven, A. (2023). Enhanced total phenolic content extraction from cucumis melo L. (Kultik) kernel by deep eutectic solvent (DES). *Middle east journal of science.* 9(1). 31-41. 10.51477/mejs.1236628.
- [38] Gabriele, F., Chiarini, M., Germani, R., Spreti, N. (2023). Understanding the role of temperature in structural changes of choline chloride/glycols deep eutectic solvents. *Journal of molecular liquids.* 385, 122332. 10.1016/j.molliq.2023.122332.

Research Article

Evaluation of Physicochemical and Microbiological Properties of a Traditional Local Cheese: Tire Camur Cheese

Derya Saygılı^{1,*} 

Received: 07.12.2024

Accepted: 28.04.2025

¹Izmir Kavram Vocational School, Culinary Programme, Konak-Izmir, Türkiye;

derya.saygili@kavram.edu.tr

* Corresponding author

Abstract: This study examined the physicochemical and microbiological properties of Tire Camur cheese, a traditional dairy product widely consumed in the Tire district of Izmir, Turkey. Ten samples of Tire Camur cheese, purchased from the local market, were analyzed, and the findings were evaluated to assess food quality, offering recommendations for improvement. Physicochemical parameters including pH, acidity, dry matter, fat, and protein content were determined. Microbiological quality was assessed by counting *Lactobacillus* spp., *Lactococcus* spp., yeast-mold, *S. aureus*, and *E. coli*. The mean values for pH, titratable acidity (%), dry matter (%), fat (%), and protein (%) were found to be 5.56 ± 0.01 , 0.15 ± 0.01 LA, 29.65 ± 0.16 , 10.41 ± 0.16 , and 11.68 ± 0.16 , respectively. The results indicated that the physicochemical properties of Tire Camur cheese lack standardization due to inconsistencies in its production process. Microbiological analysis revealed that stricter attention to hygiene and sanitation practices is necessary. Notably, significant variations in *S. aureus* and *E. coli* counts were observed among samples from the same producer, underscoring the critical need for improved hygiene during post-production packaging, storage, and sales.

Keywords: tire camur cheese, microbiological quality, food safety, local product.

Araştırma Makalesi

Geleneksel Bir Yerel Peynirin Fizikokimyasal ve Mikrobiyolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi: Tire Çamur Peyniri

Özet: Bu çalışmada, İzmir'in Tire ilçesinde yaygın olarak tüketilen geleneksel bir süt ürünü olan Tire Çamur peynirinin fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri araştırılmıştır. Yerel pazardan satın alınan 10 adet Tire Çamur peyniri örneği analiz edilmiş ve bulgular gıda kalitesi açısından iyileştirme önerileri sunmak için değerlendirilmiştir. pH, asitlik, kuru madde, yağ ve protein içeriği gibi fizikokimyasal parametreler belirlenmiştir. Mikrobiyolojik kalite *Lactobacillus* spp., *Lactococcus* spp., maya-küf, *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ve *Escherichia coli* (*E.coli*) sayılarında değerlendirilmiştir. Ortalama pH, titre edilebilir asitlik (LA%), kuru madde (%), yağ (%) ve protein (%) değerleri sırasıyla 5.56 ± 0.01 , 0.15 ± 0.01 %, 29.65 ± 0.16 %, 10.41 ± 0.16 % ve 11.68 ± 0.16 % olarak bulunmuştur. Sonuçlar Tire Çamur peynirinin fizikokimyasal özelliklerinin üretim sürecindeki tutarsızlıklar nedeniyle standardizasyondan yoksun olduğunu göstermektedir. Mikrobiyolojik analizler ise, hijyen ve sanitasyon uygulamalarına daha fazla dikkat edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Aynı üreticiden alınan numuneler arasında *S. aureus* ve *E. coli* sayımlarında önemli farklılıklar gözlenmiş olması, üretim sonrası paketlenme, depolama ve satış sırasında hijyen uygulamalarının iyileştirilmesine yönelik kritik ihtiyacın altını çizmektedir.

Anahtar Kelimeler: tire çamur peyniri, mikrobiyolojik kalite, gıda güvenliği, yöresel ürün.

1. Introduction

Cheese, with its high nutritional value, exhibits great diversity in worldwide due to variations in milk types, starter cultures, processing techniques, and maturation methods. Türkiye, owing to its geographical location, reflects its rich gastronomy culture in cheese production, offering a wide variety of cheese types unique to the region. Moreover, the integration of traditional practices passed down through generations enhances the diversity of these local products. To preserve cultural heritage and ensure the quality and authenticity of these unique production methods, many countries, including Türkiye, have embraced geographical indication (GI) systems.

In Türkiye, 41 traditional cheese types have been granted Geographical Indication (GI) status out of a total of 61 applications submitted to date, with 20 others currently under review [1]. This system plays a crucial role in the preservation and promotion of local gastronomic heritage [2]. Tire Camur cheese is a traditional cheese produced and consumed primarily in the Tire, Ödemiş, and Bayındır regions of Izmir. Its production begins with curd cheese obtained from whey, primarily of cow's milk, though sheep and goat milk are sometimes used. The final product's quality depends on how the curd is processed by local producers and households.

Tire Camur cheese is generally described as a soft, spreadable cheese with unique consumption patterns. It is prepared by combining whey—a by-product of cheese production—with buttermilk, milk, and additional whey to achieve a smooth and homogeneous texture. This mixture is thoroughly kneaded using dough-kneading boilers in commercial production or with wooden spoons or mixers in household settings [3].

Tire Camur cheese, a local delicacy, can be consumed in various ways: it is mixed with olive oil for breakfast, spread on bread, or used as a filling in pastries. A traditional serving method involves pairing it with black mulberry jam, creating a popular regional dessert where the jam is drizzled over the cheese [4,5].

The quality of the final product may vary considerably depending on the specific production methods employed. Several studies in the literature have highlighted potential public health concerns associated with locally produced cheeses [6-10]. Issues such as the lack of standardization, poor hygiene of tools and equipment, insufficient personnel hygiene, and inadequate storage and sales conditions may negatively impact the microbiological quality of traditionally produced cheeses.

Numerous studies have emphasized the distinctive features and production challenges of Tire Camur cheese. Karaalioğlu (2021) identified 29 volatile compounds in the cheese and reported that sensory attributes such as cooked, whey, creamy, fermented, and milky flavors were strongly perceived. The

study also underlined the need for standardization to facilitate industrial-scale production of this traditional product [11]. Similarly, Keskin and Dağ (2020) attributed the limited regional awareness of traditional cheeses, including Tire Camur, to the challenges associated with traditional production methods. Nevertheless, cheeses derived from whey, such as Tire Camur, remain among the most prominent local varieties [12]. Furthermore, Erdoğan (2020) noted that the short shelf life of market-sourced Tire Camur cheese is primarily due to poor hygiene practices during production. The study also suggested that the inclusion of probiotics in the production process could significantly enhance both the safety and shelf life of the final product [13].

This study aims to evaluate the microbiological characteristics of Tire Camur cheese produced by traditional methods, with a particular focus on food safety parameters. In light of previous findings highlighting the short shelf life and hygiene-related concerns associated with this traditional product, the research seeks to generate data that can contribute to quality enhancement and support standardization efforts essential for safe industrial production.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The material of this study consisted of Tire Camur cheese samples offered for sale in local businesses located in the Tire district of İzmir Province, Türkiye. A total of 10 cheese samples were collected from 10 different retail points within the district, representing products from 8 distinct producers. The samples were purchased in their original sales packaging between April 11 and October 17, 2023, under conditions that reflected those available to consumers. Following collection, all samples were stored at +4 °C until further laboratory analysis.

2.2. Methods

The pH value of Tire Camur cheese samples was determined with a pHmeter (Inolab WTW digital Series pH720). Tire Camur cheese samples were analyzed for total solids, protein, and titratable acidity using The Association of Official Analytical Chemists methods [14]. Fat content was analyzed using the Gerber method [15].

In order to determine the microbiological properties of Tire Camur cheese samples, the analyses to be performed were determined by taking into consideration the Food Safety and Production Hygiene criteria specified in the Turkish Food Codex Communiqué on Microbiological Criteria [16]. *S. aureus* and *E. coli* counts as well as *Lactobacillus*, *Lactococcus* and yeast-mould counts were performed in order to ensure hygiene control in cheese samples. For this purpose, Baird-Parker Agar, TBX (Tryptone Bile X-glucuronide) Agar (Oxoid, UK), MRS (de Man, Rogosa, Sharpe) (Merck, Germany), M17 Agar (Merck, Germany) and YGC (Yeast Glucose Chloramphenicol Agar) (Merck, Germany) media were used respectively. For microbiological analyses, 10 g of cheese samples were weighed into sterile stomacher bags, followed by the addition of 90 mL of 0.1% peptone water (Merck, Germany). Then, sample was homogenised in peptone water with stomacher blender.

Baird-Parker Agar containing Egg Yolk Tellurite was inoculated with appropriate dilutions by smear method. The petri dishes were incubated at 37±1°C for 48 hours. At the end of incubation, round, convex, narrow, black-grey shiny colonies with a clear zone around them were defined as *S. aureus* [17].

E. coli counting was performed by surface spread method on the selective medium TBX Agar (Oxoid, UK) and incubated at 37°C for 4 hours under aerobic conditions and then incubated at 44°C for 20 hours. After incubation, green coloured colonies were counted and evaluated as *E. coli* [17].

Yeast and mould counts were performed using YGC Agar smear method and plates were incubated at 25°C. After 5 days of incubation, colonies were counted [18].

MRS Agar and M17 Agar were used to determine the number of Lactobacilli and Lactococci, respectively. For MRS Agar, anaerobic jars (Oxoid, UK) and anaerocult A (Merck, Germany) were used to provide anaerobic environment after sowing. Petri dishes were incubated at 37°C for 48 hours.

All analyses were conducted in duplicate, and results are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

3. Results and Discussion

Within the scope of this research, a total of 10 Tire Camur cheese samples collected from retail outlets in the Tire district were analyzed. The samples, obtained from local sales points reflecting typical consumer profiles, represented products from 8 different producers. The pH values of the samples ranged from 4.81 to 6.21, while titratable acidity, expressed as % lactic acid (LA), ranged between 0.10% and 0.18%. In a study by Karagözlü et al. (2016), which also examined the physicochemical properties of traditional cheeses, the pH and titratable acidity values of Tire Camur cheese were reported as 5.30 and 0.48% LA, respectively. The dry matter content in the current study was found to range between 25.03% and 35.80% [19]. Although this represents a relatively broad distribution, the values are consistent with those reported in previous studies [20,13].

Table 1. Physicochemical analysis results of Tire Camur cheese

			Titratable acidity			Dry Matter		Fat		Protein	
Sample	pH		(% LA)			(%)		(%)		(%)	
1	5.15	± 0.01	0.16	±	0.01	28.09	± 0.01	12.25	± 0.35	10.43	± 0.33
2	6.11	± 0.01	0.18	±	0.00	32.10	± 0.08	9.13	± 0.18	14.52	± 0.40
3	6.04	± 0.00	0.13	±	0.01	35.48	± 0.46	14.00	± 0.00	14.76	± 0.51
4	5.56	± 0.01	0.14	±	0.03	25.42	± 0.54	7.25	± 0.35	11.79	± 0.27
5	4.81	± 0.01	0.16	±	0.01	27.90	± 0.34	8.00	± 0.00	12.27	± 0.30
6	5.44	± 0.00	0.16	±	0.02	27.19	± 0.25	8.50	± 0.00	11.19	± 0.35
7	5.48	± 0.00	0.11	±	0.01	29.20	± 0.22	12.25	± 0.35	9.80	± 0.51
8	6.11	± 0.01	0.14	±	0.00	31.08	± 0.14	13.13	± 0.18	10.41	± 0.47
9	5.34	± 0.03	0.16	±	0.01	31.20	± 0.33	10.50	± 0.00	10.38	± 0.62
10	5.53	± 0.01	0.17	±	0.01	28.91	± 0.30	9.13	± 0.18	11.24	± 0.06
Minimum	4.81		0.11			25.42		7.25		9.80	
Maksimum	6.11		0.18			35.48		14.00		14.76	

Tire Camur cheese, as a traditional product, can be produced using various artisanal methods. Prior to consumption, the final product is typically diluted with the addition of water, buttermilk, or whey to achieve its characteristic spreadable consistency. The use of different production approaches leads to considerable variation in the dry matter content of the final product. This variability is primarily attributed to the differing amounts of buttermilk, water, or whey added after curd formation.

As shown in Table 1, the fat content of Tire Camur cheese ranged from 7.25% to 14.00%, while protein content varied between 9.80% and 14.76%. These values reflect a wide distribution, similar to that observed in dry matter content. Notably, the highest fat value is nearly double the lowest, indicating a substantial inconsistency. Such differences are directly related to the composition of the curd used during production and underscore the lack of standardization in the manufacturing process of Tire Camur cheese. The continued reliance on traditional techniques and the absence of a standardized formulation contribute to the observed variability in key quality parameters.

A study by Karaalioğlu et al. (2021) investigated the physicochemical and sensory properties of Tire Camur cheese. They reported that the total dry matter content of the samples ranged from 22.76% to 40.81%, attributing this broad range to variations in fat content [11]. These findings are consistent with the results obtained in the present study.

Whey, which serves as the primary raw material in curd production, plays a critical role in microbial dynamics due to its low acidity and high water activity. These characteristics make it a favorable medium for microbial growth. Inadequate production conditions and poor personnel hygiene may further facilitate the proliferation of pathogenic microorganisms. Therefore, maintaining strict hygiene practices during all stages of production, packaging, and distribution is essential to ensure consumer safety. The microbiological data obtained from the analysis of Tire Camur cheese samples are presented in Table 2.

Table 2. Microbiological results of Tire Camur cheese (cfu/g)

Sample/Microorganism	<i>Lactobacillus</i> spp.	<i>Lactococcus</i> spp.	Yeast-Mould	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>
1	4.6x10 ⁵	5.7x10 ⁴	2.5x10 ³	3.6x10 ³	<10 ²
2	4.7x10 ⁴	4.8x10 ⁵	3.6x10 ³	2.2x10 ³	<10 ²
3	3.8x10 ⁴	4.3x10 ⁴	3.5x10 ³	<10 ²	3.8x10 ³
4	4.6x10 ³	4.9x10 ³	1.9x10 ⁵	<10 ²	2.6x10 ⁵
5	5.7x10	4.5x10 ³	2.6x10 ⁴	3.6x10 ³	4.4x10 ²
6	3.6x10 ⁶	4.3x10 ⁵	1.5x10 ⁴	2.5x10 ³	<10 ²
7	5.9x10 ³	4.4x10 ⁴	4.9x10 ⁴	4.7x10 ⁵	4.6x10 ³
8	4.6x10 ³	4.6x10 ⁴	1.6x10 ³	4.9x10 ⁴	3.6x10 ⁴
9	5.5x10 ⁴	3.6x10 ⁵	4.3x10 ³	<10 ²	<10 ²
10	3.7x10 ⁴	4.6x10 ³	2.4x10 ⁵	<10 ²	1.9x10 ²
Minimum	4.6x10 ³	4.5x10 ³	1.6x10 ³	<10 ²	<10 ²
Maximum	3.6x10 ⁶	4.8x10 ⁵	2.4x10 ⁵	4.7x10 ⁵	2.6x10 ⁵

Lactic acid bacteria (LAB) are essential microorganisms widely employed as starter or adjunct cultures, particularly in fermented milk products, due to their significant role in the development of cheese-specific flavors [9]. In the analyzed Tire Camur cheese samples, *Lactobacillus* counts ranged from 4.6×10^3 to

3.6×10^6 cfu/g, while *Lactococcus* counts varied between 4.5×10^3 and 4.8×10^5 cfu/g. Yeast and mold counts ranged from 1.6×10^3 to 2.4×10^5 cfu/g.

Yeasts and molds can proliferate over a wide range of temperatures and pH levels, and their presence in dairy products may result in undesirable changes such as bitterness, off-odors, gas formation, and spoilage. The high water activity of Tire Camur cheese provides a favorable environment for their growth, thereby increasing the risk of microbial deterioration.

A study by Sönmez et al., (2019) examined yeast and mold levels in both vacuum-packaged and openly sold curd cheeses in Elazığ province. The average yeast and mold count was reported as 4.14 ± 0.31 log cfu/g in vacuum-packaged samples and 1.86 ± 0.23 log cfu/g in unpackaged samples. The study emphasized that although vacuum packaging offers protection against external contamination, maintaining proper hygienic conditions prior to packaging remains critical [21].

A study investigating the effects of probiotic addition in Tire Camur cheese produced using traditional methods included microbiological analyses of cheese samples collected from the Tire market. The LAB counts in these samples ranged from 3.46 to 5.35 log cfu/g, while yeast and mold counts were reported to be between 3.35 and 3.87 log cfu/g [13]. In comparison, the yeast count in our study was slightly higher but showed consistency with the LAB counts.

The most significant impact of yeast and molds causing spoilage in curd-based and similar dairy products is observed in the sensory properties of the product. Controlling yeast and mold counts is crucial to maintaining the quality of the final product and ensuring sensory acceptability for consumers, making it a key parameter for curd-type cheese varieties [22, 23].

Erdogmus (2020) reported that *S. aureus* and *E. coli* were not detected in Tire Camur cheese samples. However, in our study, *S. aureus* and *E. coli* were found in samples collected from 10 different sales points in the Tire market. Microbiological count results showed that the number of *E. coli* varied between $<10^2$ and 2.6×10^5 cfu/g, and the number of *S. aureus* varied between $<10^2$ and 4.7×10^5 cfu/g [13].

E. coli is classified as a hygiene indicator microorganism under the Turkish Food Codex Production Hygiene Criteria for cheeses produced from heat-treated milk or whey. According to the Turkish Food Codex Communiqué on Microbiological Criteria, if *E. coli* is detected in more than two out of five analyzed samples, corrective actions—such as improving production hygiene and revising raw material selection—must be implemented [16].

S. aureus counts presented in Table 2 indicate that appropriate hygiene practices are not sufficiently observed during the production of Tire Camur cheese. In a study conducted on various cheeses sold in the Aydın province, the *S. aureus* count in curd cheese was reported as 5.09 log cfu/g, which is considered significantly high. *S. aureus* is a critical microorganism primarily transmitted through direct human contact. Although it is a common component of the nasal, throat, and skin flora, it is pathogenic to humans. During food production, preparation, and serving, frequent hand contact facilitates its transfer to food products. Once it reaches a critical concentration, it can exert toxic effects [24,25].

When the *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* levels in the analyzed Tire Camur cheese samples were evaluated, both pathogens were found to be absent in samples obtained from only one sales point.

Notably, despite originating from the same production facility, variations in microbial counts during the sales stage highlight the critical role of hygiene practices related to personnel and equipment during storage, packaging, and distribution.

The detection of these pathogens at the point of consumer access suggests deficiencies in sanitation protocols throughout the production and post-production stages of Tire Camur cheese. These findings indicate that inadequate heat treatment, along with poor hygiene practices during packaging, storage, and sales, may pose considerable risks to consumer health.

4. Conclusion

The implementation of sanitation protocols in food production is of critical importance for safeguarding consumer health. Inadequate hygienic conditions within the production environment, coupled with the failure of personnel to comply with essential hygiene practices, can significantly compromise the quality of the final product and lead to a reduction in its shelf life. The findings of this study on Tire Camur cheese highlight the significance of maintaining both food and personnel hygiene in the production of local products. In this regard, prioritizing hygiene practices during production and storage, as well as emphasizing personnel hygiene, should be key strategies to mitigate risks to consumer health.

Microbiological differences observed in samples collected from three different sales points of the same company were primarily linked to variations in personnel hygiene and packaging practices at the point of sale. Maintaining strict control over packaging and sales processes from a food safety perspective is essential to ensure the delivery of safe products to consumers.

Acknowledgment

The author would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The author declare that there is no conflict of interest in this study. The manuscript has been written with contributions from all authors.

Research and Publication Ethics Statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for this study. The author declares that this study complies with research and publication ethics.

References

- [1] Turkish Patent and Trademark Office (TPTO), "Turkish Patent Database," [Online]. Available: <https://ci.turkpatent.gov.tr/veri-tabani>. [Accessed: May 2, 2024].
- [2] D. Saygili, H. Demirci, and U. Samav, "Gastronomic flavours with geographical indication: Izmir Province," in *Proceedings of the Ganud International Conference on Gastronomy, Nutrition and Dietetics*, Gaziantep, Türkiye, Nov. 22–24, 2019, pp. 105–111. [Online]. Available: <https://www.gastrodiet.org>

- [3] A. Çelikel, M. B. Akin, and S. Gurbuz, "Traditional cheeses of Eastern Anatolia Region in Turkey," in *Traditional Cheeses from Selected Regions in Asia, Europe, and South America*, 1st ed., Bentham Science Publ., United Arab Emirates, 2020, pp. 199–230
- [4] E. Hastaoglu, M. Erdogan, and M. Iskin, "Turkey cheese diversity map within the scope of gastronomy tourism". *Ataturk University Journal of Social Science Institute*, vol. 25, no. 3, pp. 1084–1113, 2021.
- [5] E. Macit, "Türkiye's whey cheeses," *Black Sea Journal of Agriculture*, vol. 6, no. 1, pp. 74–86, 2023.
- [6] F. Durlu-Ozkaya, N. Karabıcak, R. Kayalı, and B. Esen, (2005). "Inhibition of yeasts isolated from traditional Turkish cheeses by *Lactobacillus* spp.," *International Journal of Dairy Technology*, vol. 58, pp. 111–114, 2005.
- [7] G. Oksuztepe, B. Patir, A. Dikici, and O. I. Ilhak, "Microbiological and chemical quality of vacuum packed fresh Kashar cheeses offered for consumption in Elazığ," *Firat University Health Sciences Veterinary Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 89–94, 2009.
- [8] C. Atabey, "Determination of antibiotic resistance of generic *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* strains obtained from commercially available cheeses and their relationship with antibiotics used in mastitis control and treatment programmes," M.Sc. thesis, Inst. of Health Sciences, Adnan Menderes Univ., Aydın, Türkiye, 2011.
- [9] O. Yerlikaya, "A study on some microbiological properties of white cheeses produced and consumed in the Aegean and Marmara regions," *Ege University Journal of Faculty of Agriculture*, vol. 55, no. 4, pp. 499–505, 2018. doi: 10.20289/zfdergi.412173.
- [10] F. Rencber and Ş. Celik, "Some characteristic properties of Mus Tulum cheese matured in different packaging materials," *Journal of Atatürk University Faculty of Agriculture*, vol. 52, no. 1, pp. 1–10, 2021. doi: 10.17097/ataunizfd.712037.
- [11] O. Karaalioglu, E. Gunay, Y. Karagul Yuceer, "Some physicochemical and sensory characteristics of Tire Camur cheese," *GIDA*, vol. 46 no. 4, pp. 914-924, 2021. doi: 10.15237/gida.GD21052.
- [12] E. Keskin and T. Dag, "Identity of cheese: a research on the cheeses of the Aegean Region in Turkey," *Journal of Ethnic Foods*, vol. 7, pp. 1–9, 2020.
- [13] S. Erdogmuş, "Determination of microbiological and physico-chemical quality of Camur cheese produced by traditional method, determination of shelf life and production of functional Camur cheese with probiotic addition," M.Sc. thesis, Dept. of Food Engineering, Tokat Gazi-osmanpaşa Univ., Tokat, Türkiye, 2020.

- [14] Association of Official Analytical Chemists International (AOAC), 2002. Association of Analytical Communities.
- [15] Association of Official Analytical Chemists International (AOAC), 2003. Association of Analytical Communities.
- [16] Anonymous, "Turkish Food Codex Communiqué on Microbiological Criteria," T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, No: 2011/3, 2024. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://www.resmigazete.gov.tr>
- [17] ISO/FDIS, (2021). Microbiology of Food and Animal Feeding Stuffs – Horizontal Method for the Enumeration of Coagulase-Positive Staphylococci (*Staphylococcus aureus* and Other Species) - Part 1: Technique using Baird-Parker Agar Medium. ISO 6888-1.
- [18] International Organization for Standardization (ISO), *Milk and Milk Products Enumeration of Yeast and Moulds - Colony Count Technique at 25 °*, International Standard ISO/DIS 6611, 1992.
- [19] C. Karagozlu, O. Yerlikaya, A. Akpınar, G. Unal, B. Ergönül, G. Ender, and H. R. Uysal, "Cholesterol levels and some nutritional parameters of traditional cheeses in Turkey," *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, vol. 53, no. 2, pp. 161-168, 2016.
- [20] U. Kamber, "Traditional Turkey cheeses and their classification," *Van Veterinary Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 161–171, 2015.
- [21] Sönmez, A., İncili, G. K., & Çalicioğlu, M. (2019). Assessment of chemical properties and microbiological quality of vacuum packaged or unpackaged lor (whey) cheese sold in Elazığ province.
- [22] R. Irkin, "Shelf-life of unsalted and light "lor" whey cheese stored under various packaging conditions: microbiological and sensory attributes," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 35, no. 2, pp. 163-178, 2011.
- [23] T. Bintsis, (2021). "Yeasts in different types of cheese", *AIMS microbiology*, vol. 7, no. 4, pp. 447–462, 2021. doi: 10.3934/microbiol.2021019.
- [24] C. Tükel and H. B. Doğan, "Staphylococcus aureus," in *Food Microbiology and Applications*, Ankara, Türkiye: Sim Printing, 2000, pp. 357–366.
- [25] A. Kucukcetin and S. Milci, "Food poisoning from cheese contaminated with *Staphylococcus aureus*," *Food*, vol. 33, no. 3, pp. 129–135, 2008.

Research Article

Fish Species Classification with Deep Learning and Bayesian Optimization: Effectiveness and Comparative Results

Hüseyin Aydilek^{1,*}  and Mustafa Yasin Erten² 

Received: 11.02.2025

Accepted: 10.05.2025

^{1,*}Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kırıkkale, Türkiye; huseyinaydilek@kku.edu.tr

²Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kırıkkale, Türkiye; mustafaerten@kku.edu.tr

* Corresponding author

Abstract: This study examines the effectiveness of deep learning-based models in the classification and monitoring of fish species. A dataset obtained from the Kaggle platform, containing 31 different fish species, was used to train MobileNetV2, DenseNet121, and VGG19 models. Bayesian optimization was applied to enhance model performance and determine the optimal hyperparameters. The results indicate that models trained with Bayesian optimization achieved significantly higher accuracy compared to those trained with randomly assigned hyperparameters. Additionally, the ensemble learning approach, which combined the outputs of individual models, yielded the best classification performance. This study demonstrates that deep learning techniques serve as a crucial tool for marine ecosystem conservation and sustainable fisheries practices.

Keywords: deep learning; fish species classification; mobilenetv2; VGG19; densenet121; bayesian optimization.

Araştırma Makalesi

Balık Türü Sınıflandırmasında Derin Öğrenme ve Bayes Optimizasyonu: Model Etkinlik ve Karşılaştırmalı Sonuçlar

Özet: Bu çalışma, derin öğrenme tabanlı modellerin balık türlerinin sınıflandırılması ve izlenmesindeki etkinliğini incelemektedir. Kaggle platformundan elde edilen ve 31 farklı balık türünü içeren veri kümesi kullanılarak MobileNetV2, DenseNet121 ve VGG19 modelleri uygulanmıştır. Model performansını artırmak amacıyla Bayes optimizasyonu kullanılmış ve en iyi hiperparametreler belirlenmiştir. Sonuçlar, Bayes optimizasyonu uygulanmış modellerin rastgele hiperparametrelerle eğitilmiş modellere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir. Ayrıca, bireysel modellerin çıktılarının birleştirildiği toplu öğrenme yaklaşımı, en iyi sınıflandırma başarımını sağlamıştır. Bu çalışma, derin öğrenme tekniklerinin deniz ekosistemlerinin korunması ve sürdürülebilir balıkçılık uygulamalarında kritik bir araç olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: derin öğrenme; balık türü sınıflandırma; mobilenetv2; VGG19; densenet121; bayes optimizasyonu.

1. Introduction

In contemporary times, environmental issues exerted an increasingly pronounced impact on the health and sustainability of ecosystems. Human activities increasingly threaten both terrestrial and marine ecosystems. These impacts cause biodiversity loss, habitat degradation, and disruption of ecological balance on a global scale. Particularly, marine ecosystems, recognized for their high biodiversity and ecological significance, continue to face threats from anthropogenic factors. Overfishing, habitat destruction, environmental pollution, and climate change are among the primary drivers of damage to marine ecosystems [1]. In this context, the effective monitoring and conservation of fish populations is critical not only for ensuring the sustainability of marine ecosystems but also for safeguarding food security and economic well-being in human societies. Addressing these challenges requires an understanding of how fish respond to environmental changes, which constitutes a crucial step toward species conservation and the maintenance of ecosystem health [2].

Accurately monitoring and understanding the responses of fish species to environmental factors constitute a fundamental knowledge base for the future of marine ecosystems. Climate change, habitat loss, and overfishing—shaped by human activities—directly influence the distribution, populations, and biodiversity of fish species [3]. For instance, climate change can increase ocean temperatures, potentially altering the reproductive cycles of certain fish species or leading to the loss of their habitats. Such changes can disrupt the balance within marine ecosystems, thereby diminishing the quality of ecosystem services [4]. A deeper understanding of these interconnections between ecosystems is crucial for the conservation of natural habitats and the promotion of sustainable fisheries.

In this context, the accurate classification and monitoring of fish species serve as a critical tool for the conservation of marine ecosystems. Identifying fish species is not only essential for assessing ecosystem health but also plays a vital role in the development of sustainable fisheries practices [5]. Traditional monitoring methods face numerous challenges in fish classification. The visual similarities among fish species, along with morphological and behavioral changes influenced by environmental factors, add complexity to the classification process. Therefore, the adoption of new technologies is essential for accurately distinguishing fish species. In recent years, artificial intelligence and deep learning algorithms have made significant advancements in the analysis of visual data, enabling the precise classification of fish species [6].

Deep learning algorithms, with their ability to process large volumes of data, can serve as an effective tool for the classification of fish species. These algorithms analyze visual features such as shape, color, and texture, enabling the rapid and accurate identification of species. Deep learning, a subset of machine learning, possesses the capacity to learn complex patterns and relationships within data. The classification of fish species is not solely based on visual characteristics but also requires the analysis of environmental changes and behavioral variations in fish populations [7]. Due to their capability to process such complex datasets, deep learning algorithms yield significantly more efficient and accurate results compared to traditional methods.

A review of the literature reveals several studies employing deep learning for fish species classification. Kaya et al. [8] introduced a novel deep learning-based model, IsVoNet8, designed to classify eight fish species commonly consumed in Turkey. The proposed model was compared with ResNet50, ResNet101, and VGG16, achieving the highest accuracy of 98.62%. It was reported that IsVoNet8, due to its lower number of layers and parameters, provided a higher accuracy rate with lower computational cost compared to other models.

In another study, Cui et al. [9] proposed a deep learning-based method for fish detection in turbid seawater using images collected from the Gulf of Mexico. The study incorporated data augmentation, network simplification, and optimization techniques to accelerate the training process, ultimately resulting in a single optimized model. Experimental results demonstrated that the proposed model improved accuracy rates and showed promise for real-time underwater applications.

Chen et al. [10] developed a two-stage deep learning-based system for fish classification. The system first detects and aligns fish to manage variations in pose and scale before classifying them. It then utilizes environmental context information to identify species. The proposed method proved effective in classifying fish under challenging real-world conditions.

Aziz et al. [11] presented a model that optimizes deep learning algorithms for fish species classification using the Chaotic Opposition-Based Whale Optimization Algorithm (CO-WOA). The study compared its performance with deep learning models such as CNN, VGG-19, and ResNet150V2, demonstrating that the proposed method achieved a 100% accuracy rate.

Furthermore, Shammi et al. [12] employed FishNet, a CNN-based model, to classify six different fish species. The study also utilized data augmentation techniques to enhance the model's accuracy. The developed model achieved an accuracy rate of 88.96%, outperforming traditional algorithms.

Kandimalla et al. [13] conducted a performance comparison of deep learning models for classifying fish images collected using DIDSON imaging sonar and optical cameras. The study employed YOLOv3, Mask-RCNN, and Norfair methods to automatically detect, classify, and count fish in passageways. The results demonstrated the potential of this system for real-time monitoring of fish species, even in challenging conditions such as low-light and turbid environments, as well as for tracking species requiring conservation.

In another study, Salman et al. [14] proposed a deep learning-based approach to address challenges in fish classification within underwater environments, such as variations in lighting, turbidity, and background complexity. The results indicated that accuracy rates exceeded 90% across various datasets.

Varalakshmi and Rachel [15] focused on solving the problem of fish category classification and localization. They utilized CNN methods to capture segmentation errors, noise, and environmental variations in images. By training the dataset with different activation functions, they achieved higher classification accuracy. Their results demonstrated 95% accuracy in fish image classification and 99% accuracy in fish localization.

Iqbal et al. [16] employed a simplified version of AlexNet for an automatic fish species classification system, aiming to facilitate fish farming and the understanding of fish habitats. While the proposed model outperformed AlexNet, it did not achieve better results compared to VGGNet. However, it attained competitive accuracy with fewer layers and reduced computational requirements.

Additionally, Deep and Dash [17] proposed a hybrid CNN-based framework for underwater fish species recognition. In this approach, CNN was used for feature extraction, while classification was performed using Support Vector Machines (DeepCNN-SVM) and K-Nearest Neighbors (DeepCNN-KNN). The model was evaluated on the Fish4Knowledge dataset, where DeepCNN-KNN achieved an accuracy of 98.79%, outperforming other compared models.

This study aims to examine the effectiveness of deep learning-based algorithms in the classification and monitoring of fish species. Specifically, investigating how these algorithms are utilized for marine ecosystem conservation and the benefits they provide will make significant contributions to the existing body of knowledge in this field. In an era of rapid technological advancements, the development of more effective methods for marine ecosystem preservation is crucial for achieving future sustainability goals. Therefore, one of the primary focuses of this study is to explore the role of innovative technologies, such as deep learning and artificial intelligence, in the monitoring and conservation of marine ecosystems.

2. Materials and Method

2.1. Dataset

The dataset utilized in this study was sourced from Kaggle and created by Mark Daniel Lampa [18]. It includes images of 31 different fish species found in Marig Fishing Port, located in Cabuyao, Philippines. The dataset comprises 13,304 images in total. Convolutional Neural Network (CNN) architectures such as DenseNet121, VGG19, and MobileNetV2 were applied, along with ensemble learning techniques and hyperparameter optimization. Example images from the dataset are presented in Figure 1.



Figure 1. Sample Images from the Dataset [18]

2.2. DenseNet121

The DenseNet121 model, accepts input images with dimensions of $224 \times 224 \times 3$ and consists of approximately 7 million trainable parameters [19]. This model effectively prevents the gradient vanishing problem, thereby enabling the construction of sufficiently deep networks. Additionally, compared to other deep learning architectures, its lower number of parameters allows for faster computational performance.

One of the key characteristics of DenseNet121 is its feed-forward connectivity, where each layer is directly connected to all subsequent layers. This structure enables a layer to use the feature maps of all preceding layers as input while passing its own feature maps as input to all subsequent layers. Although DenseNet architecture shares similarities with ResNet, it enhances information flow by allowing features extracted from one layer to be utilized as input for all deeper layers, resulting in a more efficient learning process. The structure of the DenseNet architecture is schematically illustrated in Figure 2.

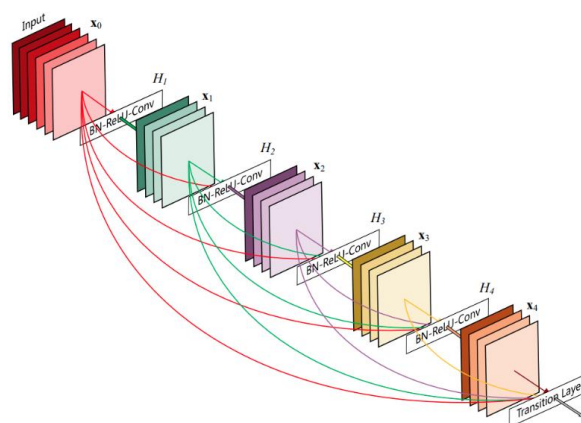


Figure 2. Structure of DenseNet [19]

2.3. VGG19

VGG is a CNN model proposed in 2014 by K. Simonyan and A. Zisserman from the University of Oxford [20]. It achieved successful results in the ILSVRC2014 competition, which utilized the ImageNet dataset large-scale dataset containing over 14 million images across 1,000 classes. The VGG19 model can be broadly described as an improved version of the AlexNet.

The VGG19 architecture consists of 16 convolutional layers and 3 fully connected layers, comprising approximately 143 million parameters. It includes MaxPooling, Fully Connected, ReLU, Dropout, and Softmax layers. Like VGG16, the input layer dimensions are $224 \times 224 \times 3$, while the final layer serves as the classification layer. VGG19 achieved an accuracy of 88% on the ImageNet database, making it a highly effective deep learning algorithm.

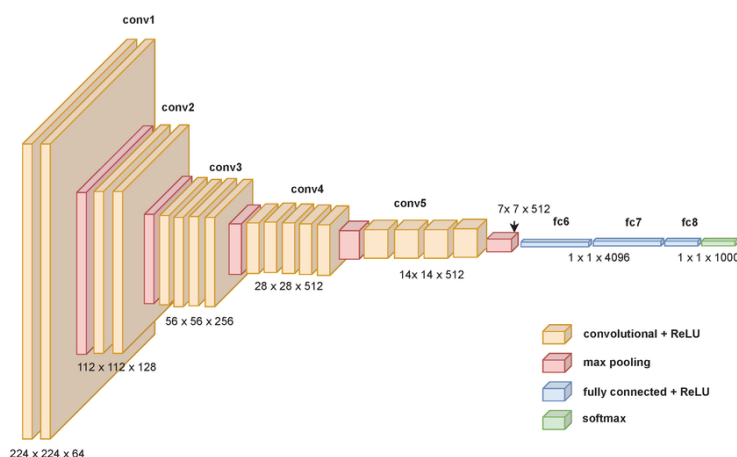


Figure 3. Structure of VGG19 [21]

2.4. MobileNetV2

MobileNet is a CNN model proposed by Howard et al [22]. It is lightweight, fast, and simple architecture designed for compatibility with mobile devices. Instead of standard convolutional blocks, MobileNet employs depthwise separable convolutional blocks. Depthwise separable convolution consists of two operations: depthwise convolution and pointwise convolution.

In depthwise separable convolutions, a filter is applied to each input channel separately, followed by a pointwise convolution, which utilizes 1×1 convolutional filters to create a linear combination of the outputs from the depthwise convolution layers. These depthwise separable convolutional blocks constitute the core of the MobileNet algorithm's performance. For instance, replacing a conventional 3×3 convolutional filter block with a 3×3 depthwise convolutional filter block can reduce computation time by approximately ninefold.

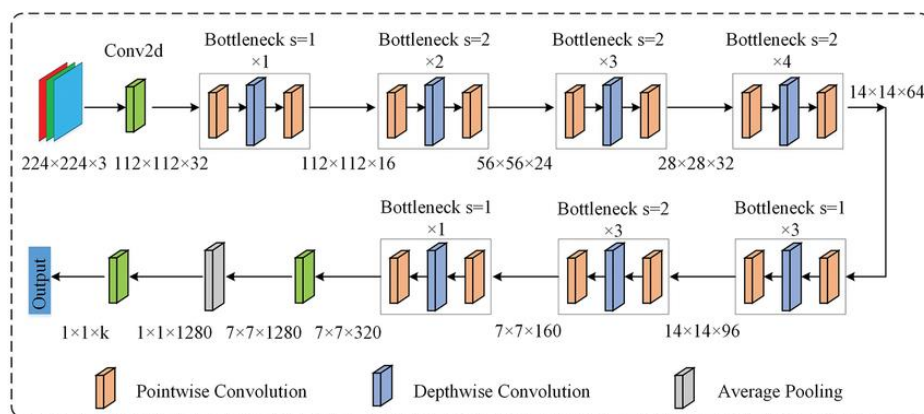


Figure 4. Structure of MobileNetV2 [23]

2.5. Bayesian Search Hyperparameters Optimization

Hyperparameter tuning for machine learning algorithms has traditionally been performed using methods such as grid search, based on cross-validation errors. While grid search is practical, it has the disadvantage of exponentially increasing search space complexity as the number of hyperparameters increases. Recent studies have demonstrated that alternative strategies, such as random search and Bayesian optimization, can be more efficient than grid search for non-trivial search spaces [24].

One of the widely used methods among existing techniques is Bayesian search, which was highlighted in a study published by Snoek in 2012 [25]. The most notable feature of this method is its ability to iteratively refine hyperparameter selection by leveraging the outcomes of previous experiments. This selection process is based on probability calculations using Bayes' theorem. Since finding optimal hyperparameter values for large datasets is computationally expensive, a proposed solution involves partitioning the dataset into smaller subsets and selecting the least costly subset to infer general conclusions about the entire dataset.

Bayesian search is more efficient than grid and random search methods as it requires fewer evaluations to converge to an optimal solution. However, its primary drawback lies in the tendency to become trapped in local optima. During the search for maximum values, the algorithm continuously samples around the highest observed value, making it susceptible to local optima [26].

2.6. Ensemble Learning

The ensemble learning model, frequently employed in machine learning and deep learning, aims to enhance performance by combining multiple predictors [27]. This technique seeks to improve generalization ability and reduce error rates by compensating for the individual weaknesses of different models. The integration of multiple algorithms helps mitigate error diversity, making it an effective strategy for addressing issues such as overfitting and underfitting.

One of the key advantages of ensemble learning methods is their ability to achieve higher accuracy rates. By aggregating the predictive power of multiple models, ensemble learning produces more balanced and generalizable results. However, this process often demands significant computational resources and time. Additionally, running multiple models simultaneously increases system complexity, making it more challenging to manage.

Voting is one of the most commonly used ensemble learning methods, in which the outputs of different classifiers are combined to make a final decision. This approach leverages the strengths of various models and is generally categorized into two subtypes: Soft Voting and Hard Voting.

Soft Voting considers the probability values generated by multiple predictors and assigns weights to them. More reliable models are given higher importance, and the final prediction is based on the highest weighted probability. This method surpasses the accuracy of individual predictions by leveraging a weighted consensus approach.

Hard Voting, on the other hand, treats each model's prediction as a vote and selects the class with the highest number of votes. Its simplicity and compatibility with different algorithms are among its major advantages. However, assuming equal weighting among models may limit its performance in certain cases.

In conclusion, voting methods are among the most widely applied ensemble learning techniques, contributing to both increased accuracy and model robustness.

2.7. Performance Evaluation Metrics

Models are evaluated using accuracy, precision, F1 score, and recall metrics [28]. These metrics are assessed with the help of a confusion matrix. In classification problems, the confusion matrix is highly useful for understanding how well a model predicts the actual classes and identifying the types of errors it makes.

In image classification tasks, the confusion matrix is used to evaluate the model's performance by determining whether each pixel or region has been correctly classified. The calculation of evaluation metrics is based on variables such as true positives (TP), false positives (FP), true negatives (TN), and false negatives (FN). TP refers to cases in which the classifier accurately identifies a positive instance as positive, while TN denotes cases where a negative instance is correctly classified as negative. Conversely, FP occurs when the classifier incorrectly labels a negative instance as positive, and FN represents cases where a positive instance is misclassified as negative. These metrics are fundamental in evaluating the performance of classification models, particularly in applications requiring high precision and recall.

Accuracy measures the proportion of correct predictions out of all instances in the dataset.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}} \quad (2.1)$$

Precision evaluates the proportion of true positives among all predicted positives, indicating how accurate the model is in making positive predictions.

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (2.2)$$

Recall measures the proportion of actual positive instances that were correctly identified by the model.

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (2.3)$$

The F1-score is the harmonic mean of precision and recall, providing a balanced evaluation of a classifier's performance. These metrics ensure a comprehensive assessment of the model's classification capabilities.

$$\text{F1 - Score} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (2.4)$$

3. Results and Discussion

In this study, the performance of MobileNetV2, VGG19, and DenseNet121 models was analyzed using the "Fish" dataset available on the Kaggle platform. During the preprocessing stage, the dataset

was subjected to resizing and normalization techniques. Bayesian search optimization was employed for tuning the hyperparameters of the models. The optimized models were then combined using the Soft Voting technique to develop an ensemble learning approach.

To examine the impact of Bayesian optimization on model performance, two separate ensemble models were constructed: one with the optimization algorithm applied and the other without it. These models were then compared in terms of performance. The dataset was divided into two subsets: 80% for training and 20% for validation. To prevent overfitting, an early stopping mechanism was implemented during training.

Table 1. Parameters of DL Algorithms without Bayesian Search Optimization

Model	MobileNetV2	VGG19	DenseNet121
Epochs	15	15	15
Batch Size	32	32	32
Optimizer	Adam	Adam	Adam
Learning Rate	1,00E-06	3,00E-06	1,00E-06
Dense Layer Size	256	256	256
Dropout	0.3	0.2	0.3
Activation Functions	ReLU (Dense), Softmax (Output)	ReLU (Dense), Softmax (Output)	ReLU (Dense), Softmax (Output)
Loss Function	Categorical Crossentropy	Categorical Crossentropy	Categorical Crossentropy

Model performance was evaluated using metrics such as Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score. Throughout the training process, validation loss and validation accuracy values were recorded, and the results were visualized using graphical representations.

The default parameter values obtained from the models without applying any hyperparameter optimization are presented in Table 1.

The optimized parameter values obtained from the models with applying a hyperparameter optimization are presented in Table 2.

Table 2. Table of the Hyperparameter Generated with Bayesian Search Optimization

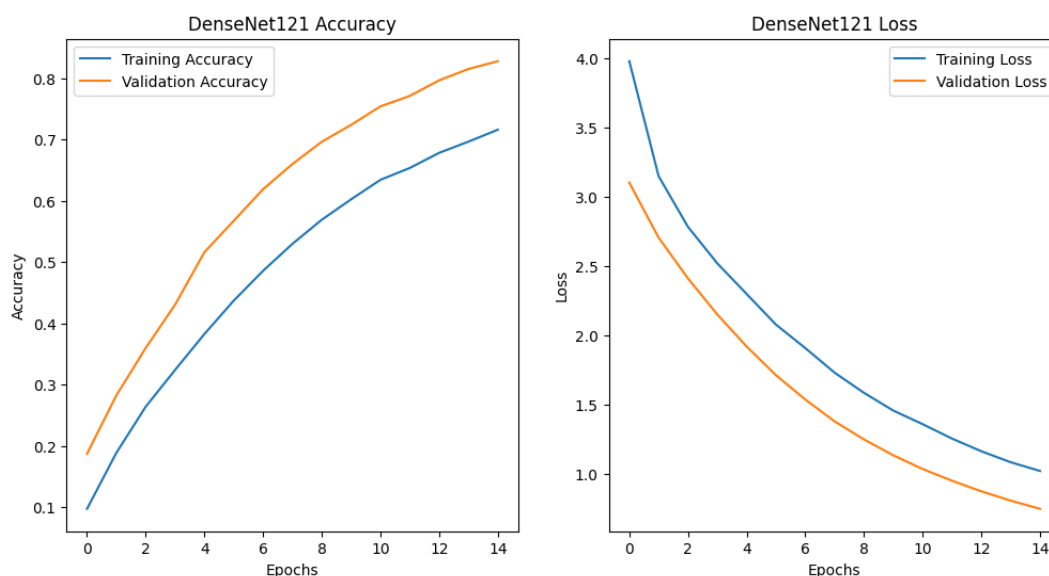
Model	MobileNetV2	DenseNet121	VGG19
Epochs	15	15	15
Batch Size	32	32	32
Optimizer	Adam	Adam	Adam
Learning Rate	1,00E-05	1,31E-02	1,00E-05
Dense Layer Size	180	180	244
Dropout	0.1	0.1	0.1
Activation Function	ReLU (Dense), Softmax (Output)	ReLU (Dense), Softmax (Output)	ReLU (Dense), Softmax (Output)
Loss Function	Categorical Crossentropy	Categorical Crossentropy	Categorical Crossentropy

Table 2. presents the values obtained through Bayesian Search Optimization. The optimal values were determined within the given parameter ranges. These hyperparameter values were identified over five trials, with each trial trained for five epochs. This process was conducted separately for each model. Subsequently, the identified hyperparameter values were utilized in the final models for training.

Table 3. Performance Metrics of the Models without Bayesian Search Optimization

Model	Ensemble Model	VGG19	MobileNetV2	DenseNet121
Accuracy	0.89091	0.68523	0.86534	0.80901
Recall	0.86231	0.61587	0.83662	0.76525
Precision	0.90232	0.75573	0.86360	0.81010
F1 Score	0.88187	0.64104	0.84677	0.77647
Loss	Null	1.39851	0.57380	0.79729

According to the values presented in Table 3, among the individual models trained without Bayesian Search Optimization, MobileNetV2 achieved the highest accuracy, while VGG19 exhibited the lowest accuracy. The ensemble model, which was constructed using models trained with randomly assigned hyperparameters, outperformed all individual models by incorporating their strongest features. As a result, it demonstrated the expected performance with superior accuracy.

**Figure 5.** The Accuracy and Loss Plots for the DenseNet121 Model Obtained Without Bayesian Optimization

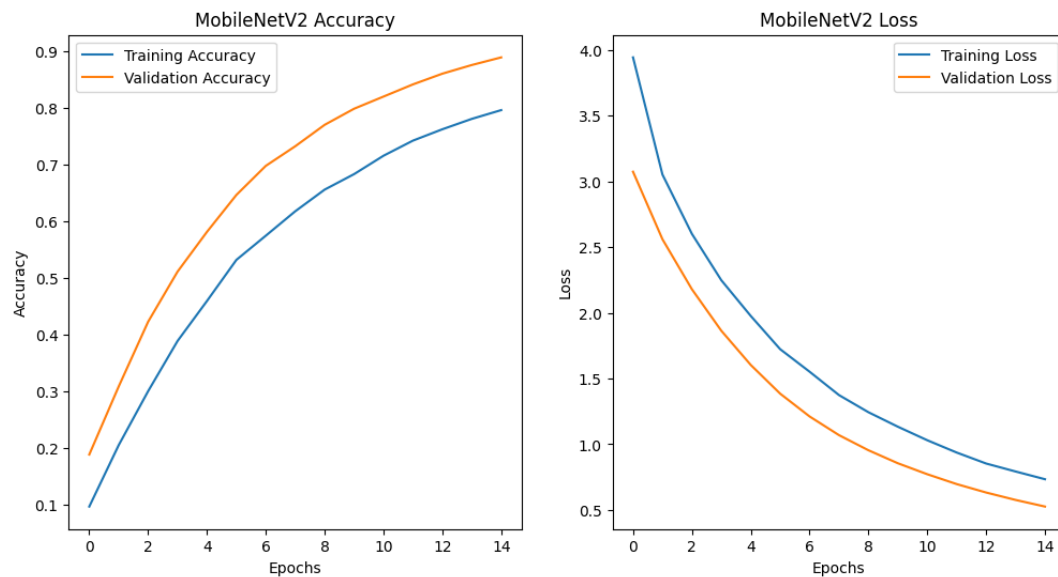


Figure 6. The Accuracy and Loss Plots for the MobileNetV2 Model Obtained Without Bayesian Optimization

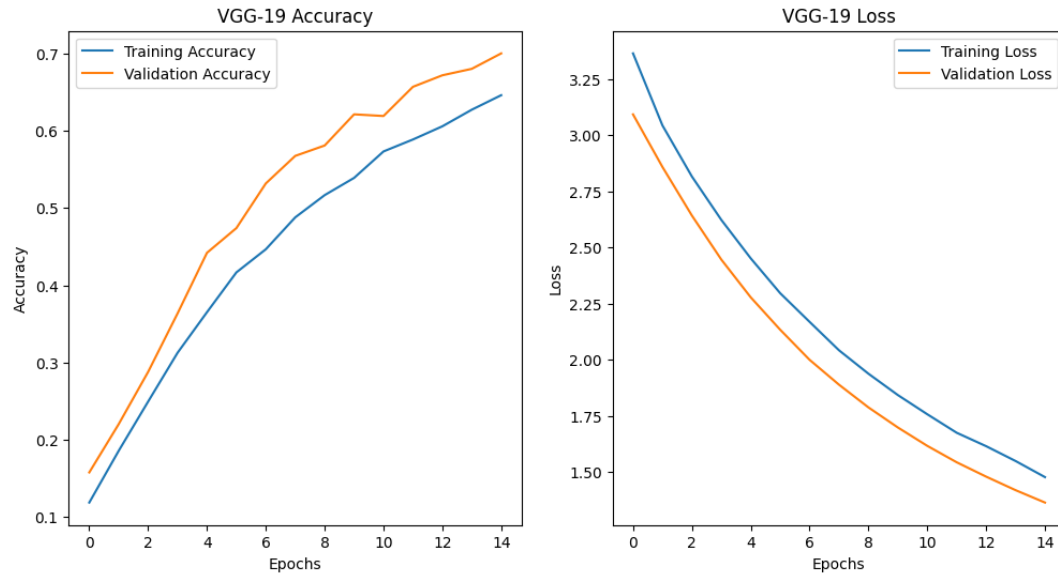


Figure 7. The Accuracy and Loss Plots for the VGG-19 Model Obtained Without Bayesian Optimization

As seen in the Figures 5,6, and 7 without applying Bayesian optimization, a comparative analysis of the accuracy and loss curves of the DenseNet121, MobileNetV2, and VGG19 models reveals notable differences in performance. Among these models, MobileNetV2 achieved the highest accuracy and exhibited a more stable learning process. While DenseNet121 demonstrated a comparable performance, VGG19 obtained the lowest accuracy values. Regarding loss curves, MobileNetV2 exhibited a consistent decrease in loss values. In contrast, VGG19 and DenseNet121 showed greater fluctuations

throughout the training process. These findings indicate that models trained without Bayesian optimization have lower generalization capabilities and experience instability during the learning process.

Table 4. Performance Metrics of The Models with Bayesian Search Optimization

Model	Ensemble Model	VGG19	MobileNetV2	DenseNet121
Accuracy	0.97159	0.87841	0.96818	0.87045
Recall	0.96489	0.85580	0.96060	0.84490
Precision	0.97014	0.89145	0.96546	0.86261
F1 Score	0.96751	0.86900	0.96200	0.84972
Loss	Null	0.63590	0.12411	0.53250

According to the results presented in Table 4, Bayesian Search Optimization clearly outperformed randomly assigned hyperparameters in terms of overall performance. On a model-specific basis, MobileNetV2 once again achieved the highest accuracy. Among the three models, DenseNet121 exhibited the lowest performance, albeit by a very small margin.

For the ensemble model, the version utilizing Bayesian Search Optimization achieved a higher accuracy rate compared to the model without optimization. These findings indicate that Bayesian Search Optimization is highly beneficial in terms of both time efficiency and computational cost. The inefficiencies associated with randomly assigned hyperparameters—such as time loss and cost-effectiveness—highlight the practical advantages of using this optimization technique.

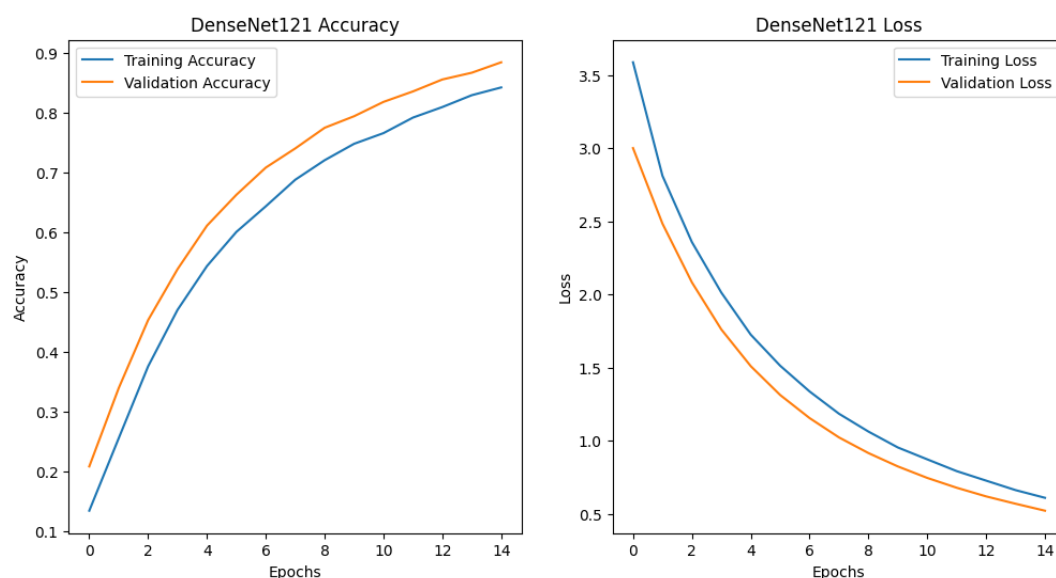


Figure 8. Accuracy and Loss Plots for the DenseNet121 Model Obtained with Bayesian Optimization for Hyperparameters

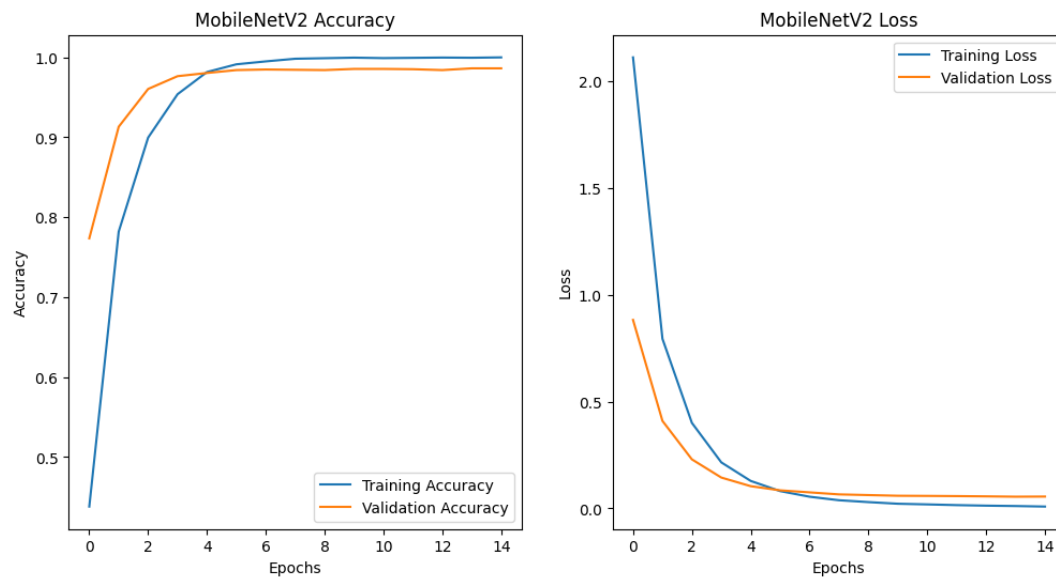


Figure 9. Accuracy and Loss Plots for the MobileNetV2 Model Obtained with Bayesian Optimization for Hyperparameters

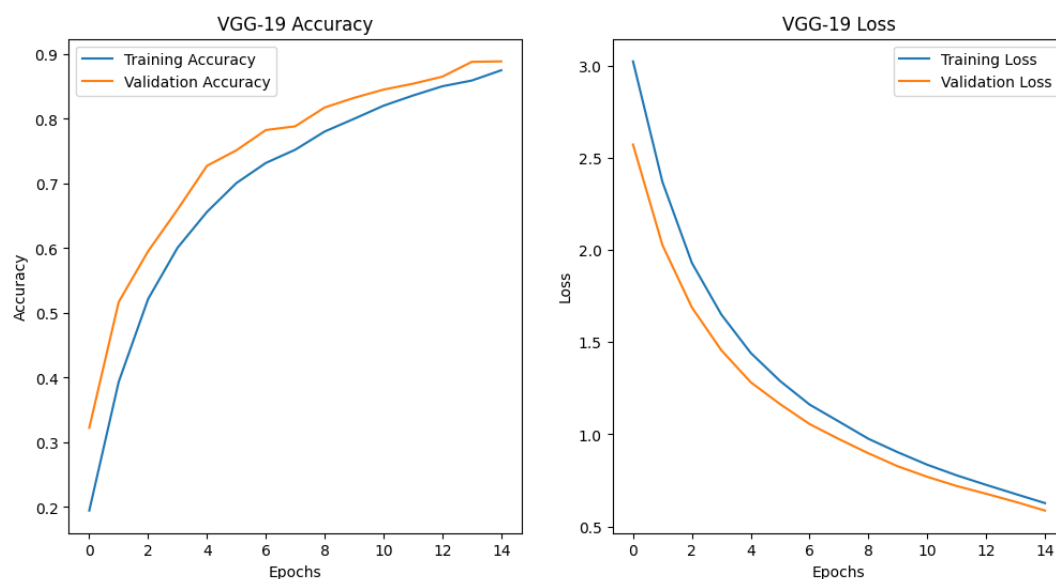


Figure 10. Accuracy and Loss Plots for the VGG-19 Model Obtained with Bayesian Optimization for Hyperparameters

As seen in Figures 8,9, and 10 with the application of Bayesian optimization, a significant increase in the accuracy rates of all models has been observed, along with a notable reduction in loss values. In particular, MobileNetV2 achieved the highest accuracy, emerging as the most successful model. Additionally, both DenseNet121 and VGG19 demonstrated improved accuracy rates and reduced loss values. Furthermore, the ensemble model obtained through the ensemble learning approach outperformed the individual models, achieving the highest classification accuracy. These findings indicate that Bayesian

optimization significantly enhances hyperparameter selection, enabling deep learning models to learn in a more stable and efficient manner.

The comparative analysis of the three deep learning models indicates that MobileNetV2 consistently delivered superior performance under both optimized and non-optimized hyperparameter configurations. Its notable accuracy and robust generalization capability can be primarily attributed to its lightweight and computationally efficient architecture, which employs depth wise separable convolutions to minimize complexity without compromising classification effectiveness. DenseNet121 also demonstrated competitive results, largely due to its densely connected structure, which enhances gradient propagation and enables effective feature reuse across layers. Conversely, VGG19, despite its deep architecture, yielded comparatively lower performance likely a consequence of its high parameter count, which increases the risk of overfitting and slows convergence, particularly when dealing with datasets of limited diversity. The implementation of ensemble learning further elevated the overall classification accuracy by integrating the complementary strengths of individual models and mitigating their respective weaknesses. Additionally, Bayesian optimization significantly improved model stability and generalization, as evidenced by smoother training curves and reduced loss values. Collectively, these results highlight the critical role of model architecture, ensemble strategies, and informed hyperparameter tuning in developing accurate and reliable fish species classification systems for practical applications in ecological monitoring.

4. Conclusion

In this study, deep learning-based classification models were developed for fish species identification using a dataset obtained from the Kaggle platform, which consists of a total of 13,302 images representing 31 different fish species. The study aimed to accurately classify fish species using MobileNetV2, DenseNet121, and VGG19 models.

Accurate classification of fish species is of critical environmental and biological importance, as it facilitates the identification of invasive species, the conservation of endangered species, and the maintenance of ecosystem balance. In this context, Bayesian Search Optimization was applied to enhance the performance of the models. It was observed that hyperparameter optimization significantly improved accuracy and other performance metrics across all three models.

Among the individual models, MobileNetV2 achieved the highest classification accuracy for fish species. However, the ensemble learning approach, which combined multiple models, outperformed the individual models and yielded the best overall results. The ensemble model particularly improved the correct prediction rate and minimized classification errors.

The findings indicate that hyperparameter optimization not only enhances accuracy but also strengthens the generalization capabilities of the models. Additionally, the implementation of an early stopping mechanism during training prevented overfitting, enabling the models to achieve more balanced performance.

This study demonstrates the effectiveness of deep learning techniques in fish species classification and highlights the value of ensemble learning approaches. Moreover, the developed models hold significant real-world application potential. They can be directly integrated into real-time marine monitoring systems, support early detection of invasive fish species, and assist in the automation of aquaculture practices. These capabilities are vital for sustainable fishery management, biodiversity preservation, and the protection of marine ecosystems against anthropogenic threats. Future research can further improve model performance by expanding the dataset, integrating different deep learning architectures, and applying transfer learning techniques. Moreover, the broader application of such models in environmental and biological fields could contribute significantly to ecosystem conservation and sustainability.

Acknowledgment

The authors would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

Research and Publication Ethics Statement

The authors declare that this study complies with research and publication ethics.

References

- [1] Zarco-Perello, S., Enríquez, S. (2019). Remote underwater video reveals higher fish diversity and abundance in seagrass meadows, and habitat differences in trophic interactions. *Sci Rep* 9, 6596. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43037-5>
- [2] Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T., ... & Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological reviews*, 94(3), 849-873.
- [3] Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S., & Poulain, F. (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture. United Nations' Food and Agriculture Organization, 12(4), 628-635.
- [4] Cheung, W. W., Lam, V. W., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R. E. G., Zeller, D., & Pauly, D. (2010). Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global change biology*, 16(1), 24-35.
- [5] Pikitch, E., Boersma, P. D., Boyd, I. L., Conover, D. O., Cury, P., Essington, T., ... & Steneck, R. S. (2012). Little fish, big impact: Managing a crucial link in ocean food webs. *Lenfest Ocean Program*. Washington, DC.
- [6] Liu, S., Li, X., Gao, M., Cai, Y., Nian, R., Li, P., ... & Lendasse, A. (2018, October). Embedded online fish detection and tracking system via YOLOv3 and parallel correlation filter. In *Oceans 2018 Mts/Ieee Charleston* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- [8] Kaya, V., Akgül, İ., & Tanır, Ö. Z. (2023). IsVoNet8: a proposed deep learning model for classification of some fish species. *Journal of Agricultural Sciences*, 29(1), 298-307.
- [9] Cui, S., Zhou, Y., Wang, Y., & Zhai, L. (2020). Fish detection using deep learning. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2020(1), 3738108.
- [10] Chen, G., Sun, P., & Shang, Y. (2017, November). Automatic fish classification system using deep learning. In *2017 IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (IC-TAI)* (pp. 24-29). IEEE.

-
- [11] Aziz, R. M., Mahto, R., Das, A., Ahmed, S. U., Roy, P., Mallik, S., & Li, A. (2023). CO-WOA: novel optimization approach for deep learning classification of fish image. *Chemistry & Biodiversity*, 20(8), e202201123.
- [12] Shammi, S. A., Das, S., Hasan, M., & Noori, S. R. H. (2021, July). FishNet: fish classification using convolutional neural network. In *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [13] Kandimalla, V., Richard, M., Smith, F., Quirion, J., Torgo, L., & Whidden, C. (2022). Automated detection, classification and counting of fish in fish passages with deep learning. *Frontiers in Marine Science*, 8, 823173.
- [14] Salman, A., Jalal, A., Shafait, F., Mian, A., Shortis, M., Seager, J., & Harvey, E. (2016). Fish species classification in unconstrained underwater environments based on deep learning. *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(9), 570-585.
- [15] Varalakshmi, P., & Rachel, J. J. L. (2019, February). Recognition of fish categories using deep learning technique. In *2019 3rd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCCT)* (pp. 168-172). IEEE.
- [16] Iqbal, M. A., Wang, Z., Ali, Z. A., & Riaz, S. (2021). Automatic fish species classification using deep convolutional neural networks. *Wireless Personal Communications*, 116, 1043-1053.
- [17] Deep, B. V., & Dash, R. (2019, March). Underwater fish species recognition using deep learning techniques. In *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)* (pp. 665-669). IEEE.
- [18] Mark Daniel Lampa, Rose Claire Librojo, and Mary Mae Calamba. (2022). Fish Dataset [Data set]. Kaggle. <https://doi.org/10.34740/KAGGLE/DSV/4323384>
- [19] Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4700-4708).
- [20] Simonyan, K. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556.
- [21] Alibabaei, K., Gaspar, P. D., Lima, T. M., Campos, R. M., Girão, I., Monteiro, J., & Lopes, C. M. (2022). A review of the challenges of using deep learning algorithms to support decision-making in agricultural activities. *Remote Sensing*, 14(3), 638.
- [22] Howard, A. G. (2017). Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. arXiv preprint arXiv:1704.04861.

-
- [23] Li, Z., Li, Y., Yan, C., Yan, P., Li, X., Yu, M., ... & Xie, B. (2024). Enhancing Tea Leaf Disease Identification with Lightweight MobileNetV2. *Computers, Materials & Continua*, 80(1).
- [24] Lévesque, J. C., Gagné, C., & Sabourin, R. (2016). Bayesian hyperparameter optimization for ensemble learning. *arXiv preprint arXiv:1605.06394*.
- [25] Snoek, J., Larochelle, H., Adams, R. P. (2012). Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 2951-2959). 2012.
- [26] Tanyıldızı, E., & Demirtaş, F. (2019). Hiper parametre optimizasyonu hyper parameter optimization. In *2019 1st International Informatics and Software Engineering Conference (UBMYK)* (pp. 1-5). IEEE.
- [27] Seni, G., & Elder, J. (2010). *Ensemble methods in data mining: improving accuracy through combining predictions*. Morgan & Claypool Publishers.
- [28] Yacouby, R., & Axman, D. (2020, November). Probabilistic extension of precision, recall, and f1 score for more thorough evaluation of classification models. In *Proceedings of the first workshop on evaluation and comparison of NLP systems* (pp. 79-91).

Araştırma Makalesi

**Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik-Çevresel Sonuçlarının
İncelenmesi ve Tepki Yüzeyi Metodu Tabanlı Modellenmesi****Muhammed Ulucan^{1,*}** Gönderim: 18.01.2025
Kabul: 26.05.2025¹Fırat University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Elazığ, Türkiye;
mulucan@firat.edu.tr
*Corresponding Author

Özet: Bu çalışma sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi perspektifinde atık malzemeler kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mekanik-çevresel sonuçlarının incelenmesine ve tepki yüzeyi metodu kullanılarak modellenmesine odaklanmaktadır. Çevresel çıktıları azaltabilmek ve mekanik özellikleri iyileştirebilmek adına metakaolin ve yüksek fırın cürufu ek çimento esaslı malzeme olarak kullanılmış olup 10 farklı kendiliğinden yerleşen harç serisi tasarlanmıştır. Mekanik özellikler için 90 günlük basınç dayanımı testi ve ultrases geçiş hızı ölçümleri dikkate alınmıştır. Tepki yüzeyi metodu kullanılarak basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızına bağlı olarak matematiksel bir model geliştirilmiş, hesaplanan tüm bağıl hata oranları % 5'in altında kalmıştır. Ardından çevresel etki kategorilerinden enerji tüketimi sonuçları incelenmiş ve ek çimento esaslı malzeme kullanımının önemli azalmalara neden olduğu gözlenmiştir. Atık ve ek çimento esaslı malzeme kullanımının hem mekanik hem de çevresel özellikler üzerinde olumlu etkiler yarattığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kendiliğinden yerleşen harç; sürdürülebilirlik; atık yönetimi; tepki yüzeyi metodu.

Research Article

**Investigation of Mechanical-Environmental Outcomes of Self-Compacting
Mortars and Modelling Based on Response Surface Method**

Abstract: This study focuses on the investigation of the mechanical-environmental outcomes of self-compacting mortars produced using waste materials in the perspective of sustainable development and circular economy and modelling using the response surface method. In order to reduce environmental outputs and improve mechanical properties, metakaolin and blast furnace slag were used as supplementary cementitious materials and 10 different self-compacting mortar series were designed. For mechanical properties, 90-day compressive strength test and ultrasonic pulse velocity measurements were taken into consideration. A mathematical model was developed using the response surface method based on compressive strength and ultrasonic pulse velocity, and all calculated absolute relative deviations remained below 5%. Then, energy consumption results from the environmental impact categories were analyzed and it was observed that the use of supplementary cementitious material caused significant reductions. It was determined that the use of waste and supplementary cementitious materials has positive effects on both mechanical and environmental properties.

Keywords: self-compacting mortar; sustainability; waste management; response Surface method.

1. Giriş

Dünya nüfusunun artmasına paralel olarak inşaat ve endüstri sektöründeki gelişmeler atık üretimine de çok büyük oranda katkı sağlamaktadır [1,2]. Özellikle son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremler sonrası ağır hasar gören ve yıkımı gerçekleştirilen binalardan elde edilen inşaat yıkıntı atıkları çözüm bekleyen önemli çevresel çıktıların başında gelmektedir [3]. Araştırmacılar çok yüksek miktarlara ulaşan bu atıkları değerlendirebilmek için aktif ve yaygın olarak kullanım alanına sahip olan inşaat sektörünü büyük bir alternatif olarak görmüşlerdir [4]. Bu bağlamda inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen agregalar hem doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına hem de bu atık malzemelerin değerlendirilmesine olanak sağlaması nedeniyle büyük önem taşımaktadır [5,6]. Elde edilen bu agregalar iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar: Karışık geri dönüşümlü beton agregaları ve geri dönüşümlü beton agregaları olarak isimlendirilmektedir. Karışık geri dönüşümlü beton agregaları yıkılan bir binadan elde edilen ve içerisinde tüm atıkların bulunduğu agregaları ifade etmektedir. Geri dönüşümlü beton agregaları ise yıkılan bir binadan elde edilen beton kütlelerinin konkasör yardımıyla kırılarak elde edilmesini ifade etmektedir. Karışık geri dönüşümlü beton agregaları içerdiği karmaşık yapısından kaynaklı daha yüksek su emme ve daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olduğundan kullanım alanları sınırlı düzeylerde kalmaktadır [7]. Bu nedenle araştırmacılar geri dönüşümlü beton agregalarını doğal agregaya alternatif olarak literatürde yaygın bir şekilde kullanarak farklı çalışmalar yürütmüşlerdir [8].

Meydana gelen doğal afetler sonrası vatandaşların mağduriyetlerinin giderilmesi adına yeni inşa edilmesi gereken binalarda büyük bir artış yaşanmış ve çok büyük miktarlarda beton tüketimi ortaya çıkmıştır. Yapılan literatür araştırmaları betonun temel bileşenleri olan çimento, su ve agrega dikkate alındığında iki temel çevresel problemin meydana geldiğini göstermiştir [9,10]. Bunlardan birincisi, artan beton tüketimi doğal kaynak tüketiminde büyük bir artışa neden olmakta ve doğal kaynak sorunlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda doğal kaynak tüketimini azaltmak, atık malzemeleri değerlendirmek için geri dönüşümlü beton agregaları büyük bir çözüm kaynağı olarak görülmektedir [11]. İkinci temel problem ise çimento tüketimine bağlı olarak karbon emisyonlarında meydana gelen artıştır [12]. Çimento dünya genelindeki karbon salınımının yaklaşık % 6-8'inden sorumludur [13,14]. Bu bağlamda çimento tüketiminde meydana gelecek küçük azalmaların bile önemli çevresel çıktılar meydana getireceği belirtilmektedir [15–17]. Ek çimento esaslı malzemeler bu noktada büyük bir çözüm kaynağı olarak görülmektedir. Çimento ile yer değiştirilerek kullanılan bu malzemelerin belirli oranlarda kullanımı çevresel çıktılarının azaltılmasının yanısıra mekanik özellikler üzerinde de önemli etkiler yaratmaktadır [18].

Literatürün genel bir incelemesi beton teknolojisindeki ilerlemelerin sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından önemli çevresel ve ekonomik kazanımlara yol açtığını göstermektedir. Kendiliğinden yerleşen beton ve harç teknolojisi inşaat sektörüne çeşitli avantajlar sunduğundan son yıllarda giderek yaygınlaşmakta ve yeni inşa edilen binalarda yaygın şekilde uygulanmaktadır [19]. Kendiliğinden yerleşen beton teknolojisi, inşaat hızını ve kolaylığını büyük ölçüde artırdığı ve elle sıkıştırmaya gerek kalmadan en dar alanları bile doldurma özelliğine sahip olduğu için zaman ve işçilik açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır [20]. Ancak yüksek binalar ve köprüler gibi özel yapıların sayısı giderek artmakta ve yapının ağırlığı büyük önem taşımaktadır [21,22]. Bu nedenle hafif agregaların kullanımı ağırlığı azaltmak için bir alternatif olarak görülmektedir. Genleştirilmiş kil, pomza ve

perlit gibi hafif agregaların kullanımı harcın ağırlığında önemli bir azalmaya yol açmakta ve cazip bir seçenek olarak kullanılmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton ve harç teknolojisindeki gelişmeler araştırmacıları hafif agregaların kullanımını araştırmaya teşvik etmiştir.

Bu çalışma atık ve ek çimento esaslı malzemeler kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mekanik-çevresel özelliklerini incelemeye ve tepki yüzeyi metodu yardımıyla kendiliğinden yerleşen harçların mekanik özelliklerini modellemeye odaklanmaktadır. Bağlı hata oranları dikkate alınarak matematiksel modelin etkinliği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ardından kontrol numune ile aynı nihai yaş basınç dayanımına sahip olan numuneler fonksiyonel birim olarak dikkate alınmış ve enerji tüketimi açısından karşılaştırılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi perspektifinde üretilen harçların kapsamlı bir mekanik-çevresel çıktıları birlikte sunularak literatüre katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi hedefleri kapsamında üretilen tüm kendiliğinden yerleşen harç karışımlarında CEM II-A 42.5 R tipi portland kompoze çimento kullanılmıştır. Çalışmada ek çimento esaslı malzeme olarak tercih edilen metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Agregalar ise geri dönüşümlü agregalar ve pomza kullanılmıştır. Geri dönüşümlü agregalar Abdullahpaşa Mahallesi'nde kontrollü olarak yıkılan bir binadan alınan beton kütlelerinin konkasörde kırılmasıyla elde edilmiştir. Harç üretiminde kullanılan geri dönüşümlü agregalar üzerinde gerçekleştirilen fiziksel deneyler sonrası özgül ağırlık değerinin 2.48 g/cm³, su emme değerinin ise % 9.8 olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde temin edilen pomza üzerinde gerçekleştirilen deneylerde de özgül ağırlık değerinin 1.14 g/cm³, su emme değerinin ise % 47.6 olduğu tespit edilmiştir. DeneySEL çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan malzemelere ait kimyasal ve fiziksel özellikler ise Tablo 1'de sunulmuştur. Taze harcın akışkanlığını artırmak için yüksek performanslı su azaltıcı kimyasal katkı olarak SicaViscocrete Hi-Tech 4508 kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan geri dönüşümlü agregalar Abdullahpaşa mahallesinde yıkılan bir binadan alınan beton kütlelerinin konkasörde kırılmasıyla elde edilirken pomza agregası Nevşehir'den temin edilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelere ait kimyasal ve fiziksel içerikler

Bileşenler	Kimyasal Özellikler								Fiziksel Özellikler
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
CEM II-A	21.2	6.0	4.1	61.5	2.5	3.2	0.7	0.8	3.09
Metakaolin	54.7	43.8	1.5	-	-	-	-	-	2.40
Yüksek Fırın Cürufu	41.4	0.8	0.1	45.7	8.0	1.1	2.6	0.3	2.89

2.1. DeneySEL Tasarımı

Bu çalışmada, kontrol serileri de dahil olmak üzere 10 farklı kendiliğinden yerleşen harç karışımı tasarlanmıştır. Karışım tasarımında kullanılan bileşenler ve miktarları Tablo 2'de sunulmuştur. İkili karışımlarda metakaolin % 5-10-15-20 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılırken öğütülmüş

yüksek fırın cürufu % 10-20-30 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışım tasarımlarında kullanılan ek çimento esaslı malzeme oranları literatürde yapılan benzer çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu bağlamda basınç dayanımlarının belirli bir orana kadar artması ve belirli bir değerden sonra azalması hedeflenmiştir. Üçlü karışımlarda ise metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun toplamı %30 oranında çimento ile yer değiştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Karışım tasarımı yapılırken ek çimento esaslı malzemenin dayanım üzerindeki etkisini net bir şekilde inceleyebilmek adına kimyasal katkı ve su miktarları sabit tutulmuştur. Üretilen harç karışımlarının taze özelliklerini sağlayabilmesi için EFNARC standardı dikkate alınarak mini slump testleri gerçekleştirilmiştir [23]. Tüm harç serileri için elde edilen yayılma değerlerinin 240-260 mm arasında yer aldığı görülmüştür. Karışımlarda nihai yaş basınç dayanımı sonuçlarını incelemek ve ultrases geçiş hızı testlerini uygulayabilmek için 5 cm x 5 cm x 5 cm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde ASTM C597 dikkate alınarak ultrases geçiş hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir [24]. Ardından TS EN 12390-4 dikkate alınarak basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir [25]. Numunelere ait karışım tasarımları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait karışım tasarımı (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento	MK	ÖYFC	GDBA	Pomza	Su	Akışkanlaştırıcı
Kontrol	650	0	0	629.5	194.6	350	7
5MK	617.5	32.5	0	625.0	193.2	350	7
10MK	585	65	0	620.5	191.8	350	7
15MK	552.5	97.5	0	616.0	190.4	350	7
20MK	520	130	0	611.5	189.0	350	7
10ÖYFC	585	0	65	627.2	193.9	350	7
20ÖYFC	520	0	130	624.9	193.2	350	7
30ÖYFC	455	0	195	622.6	192.5	350	7
10MK-20ÖYFC	455	65	130	615.9	190.4	350	7
20MK-10ÖYFC	455	130	65	609.2	188.3	350	7

*MK = Metakaolin, *ÖYFC = Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu, *GDBA=Geri Dönüşümlü Beton Agregası

2.2. Tepki Yüzeyi Metodu

Laboratuvar araştırmalarında verimliliği artırma, veri analizi ve istatistiksel çıktıların yorumlanması için Design Expert yaygın şekilde kullanılan bir paket programdır. Bu çalışmada Design Expert 12. Versiyonu kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tepki yüzeyi metodu, Design Expert paket programında yer alan ve istatistik analizlerde kullanılan bir yöntemdir. Tepki yüzeyi metodu, değişkenler ve yanıt değerleri arasındaki ilişkiyi dikkate alarak model geliştirmek ve bu modellerin etkinliğini değerlendirmek için birçok çalışma alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton teknolojisinin gelişmesi ve beton kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte son yıllarda inşaat alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle laboratuvar çalışmalarında verimliliğin artmasına, zaman tasarrufuna ve ekonomik kazanımlara önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [26]. Yanıt yüzeyi ile modellemenin üç temel aşaması

bulunmaktadır [27]. Birincisi; amaçlanan yanıt değişkeni için gerekli deneysel verilerin toplanması, ikincisi; değişkenlerin belirlenerek bir RSM modeli oluşturulması ve üçüncüsü; yanıt değerlerinin yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesi için değişkenlerin optimize edilmesidir.

Bu çalışmada merkezi kompozit tasarım olarak bilinen standart bir tepki yüzeyi metodu ele alınmaktadır. Bu tasarım sistemi, minimum sayıda test ile süreç parametrelerini etkili bir şekilde optimize ederek parametrelerin analiz sonuçlarını değerlendirir. Matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin bir karışımı olan bu yöntem, ampirik modeli oluşturmak, süreç parametrelerini iyileştirmek, optimize etmek ve parametrelerin çoklu etkileşimlerini elde etmek için kullanılabilir. Model tasarımı, dikkate alınan parametrelerin -1 ve +1 aralığındaki değerlerini tanımlar. Burada -1, geliştirilen modelde dikkate alınan parametrelerin en düşük değerine, 0 en düşük ve en yüksek değerin aritmetik ortalamasına, +1 ise en yüksek değere karşılık gelmektedir. Parametre seçimi yapılırken yanıt değeri (çıktı değeri) üzerindeki etkisi araştırılarak belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında 90 günlük basınç dayanımı değerleri yanıt değeri olarak, ultrases geçiş hızı değerleri ise değişken olarak ele alınmış ve bir matematiksel model geliştirilmiştir.

2.3. Yaşam Döngüsü Analizi

Yaşam döngüsü analizi üretilen farklı kendiliğinden yerleşen harç serilerinin çevresel çıktılarının ayrıntılı bir karşılaştırmasını sağlamak için uygulanmıştır. Yaşam döngüsü analizi temel olarak dört bölümden oluşur ve bu bölümler EN ISO 14040'da detaylandırılmıştır [28, 29]. Bu bölümde amaç ve kapsam, yaşam döngüsü envanteri ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi incelenecektir. Yorumlama bölümü, etki kategorilerinin sonuçlarını değerlendirmek için sonuç ve tartışma bölümünde ayrıntılı olarak sunulacaktır.

2.3.1. Amaç ve Kapsam

Yaşam döngüsü değerlendirmesinin temel amacı üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerinin çevresel çıktılarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bu kapsamda ek çimento esaslı malzemeler ile çimento yer değiştirilerek kullanılmış olup çimento kaynaklı çevresel çıktılar incelenmiştir. Yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilirken fonksiyonel birim seçimi büyük önem taşımaktadır. Yapılan detaylı literatür araştırmaları fonksiyonel birim seçiminde seriler arasında benzer mekanik ve durabilite özelliklerinin olması gerektiğini göstermiştir. Mekanik ve durabilite özellikleri dikkate alınmaksızın çevresel etki değerlendirmelerinin gerçekleştirilmesinin tutarlı sonuçlar meydana getirmediği düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında fonksiyonel birim olarak kontrol numune ile aynı nihai yaş basınç dayanımına sahip 1 m³ harç karışımı seçilmiştir.

2.3.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Yaşam döngüsü envanter analizi, çalışmanın ana hedefi açıkça tanımlandıktan sonra yaşam döngüsü analizi için gerekli tüm verilerin kapsamlı bir şekilde toplandığı bölümü ifade eder. Toplanan tüm veriler yaşam döngüsü analizi için dikkate alınan fonksiyonel birimle ilişkili olmalıdır. Yaşam döngüsü envanter analizi iki farklı sistem olarak çalışır. Bu veriler hem arka plan hem de ön plan sistemlerini içerir. Arka plan verileri, enerji ve malzemeler gibi ön plan sistemlerini üretmek için gereken tüm kaynakları içerir. Yaşam döngüsü analizi için gerekli veriler önceki literatür çalışmalarından alınmıştır ve Tablo

3'de sunulmuştur [30, 31]. Ön plan verileri, karışım tasarımında kullanılan ve dikkate alınan malzemeleri içerir. Çevresel hesaplamalar için belirlenen sistem sınırları, dikkate alınan bu malzemelerin temini ve üretim aşamalarını içermektedir. Çevresel etki puanları hesaplanırken çimento, metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, geri dönüşümlü agrega, pomza ve beton üretiminden elde edilen değerler dikkate alınmıştır. Ancak bu hesaplamalar sırasında bazı varsayımlar yapılmıştır. Üretilen beton serileri için inşaat aşamalarının, taşıma parametrelerinin ve eleman yıkımının aynı olduğu dikkate alınmıştır. Bu nedenle nakliyeden kaynaklanan farklılıklar dikkate alınmamıştır.

Tablo 3. Yaşam döngüsü analizinde kullanılan envanter analizi

Etki Kategorisi	Çimento (kg)	MK (kg)	ÖYFC (kg)	Doğal Agrega (kg)	GDBA (kg)	Beton Üretimi (1m ³)
Enerji Tüketimi (MJ)	2.97	0.446	0.602	0.073	0.032	24.272

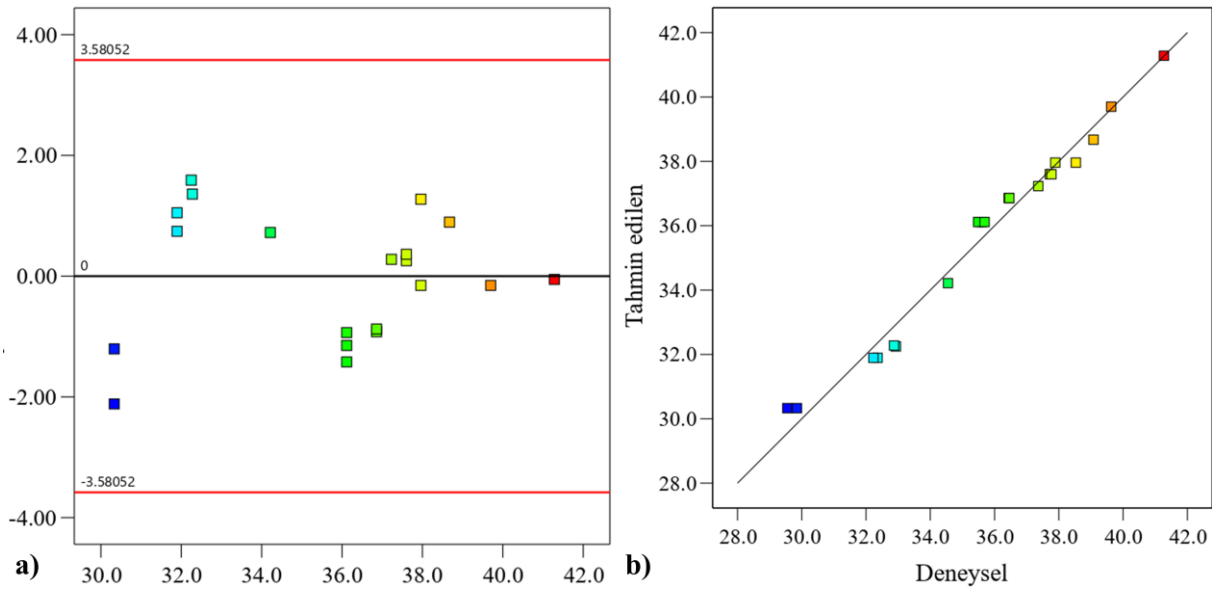
2.3.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

Bu bölüm, yaşam döngüsü analizinde dikkate alınan etki kategorilerinin seçimine ve sonuçta ortaya çıkan etki puanlarının değerlendirilmesine ilişkin ayrıntılı bir sunum içermektedir. Yaşam döngüsü analizinde etki kategorilerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma ek çimento esaslı malzeme kullanımının önemli çevresel kazanımlarını sunmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda çimentonun önemli çevresel çıktıları sağladığı enerji tüketimi etki kategorisi olarak dikkate alınmıştır. Artan çimento kullanımına alternatif bir çözüm sunmak amacıyla ek çimento esaslı malzemelerin kullanımına bağlı olarak enerji tüketimi üzerindeki etkiler incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Matematiksel Modelin Geliştirilmesi

Bu bölüm üretilen kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait nihai yaş basınç dayanımı değerleri ile ultrases geçiş hızı test sonuçlarına dayalı geliştirilen matematiksel modeli içermektedir. Tepki yüzeyi metodu ile model geliştirme aşamasında 20 test verisi kullanılmıştır. Merkezi kompozit tasarım üzerinde analizler gerçekleştirilerek kuadratik bir model geliştirilmiştir. Modele ait veri seti uyumu için Cook uzaklık verileri ile deneysel ve model tahmin sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1.a'nın genel değerlendirilmesi Cook uzaklıklarının -2 ile +2 aralığında genel bir dağılıma sahip olduğunu ve veri setini bozan farklı bir çıktının olmadığını göstermektedir. Şekil 1.b ise deneysel sonuçlar ile model tahmin sonuçlarının çıktılarını sunmaktadır. Burada tahmin sonuçları ile deneysel sonuçların neredeyse çakıştığı görülmektedir. Bu durum geliştirilen modele ait tahmin sonuçlarının doğruluk düzeyinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Modele ait belirlilik katsayısının (R^2) = 0.97 olması da bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 1. Geliştirilen modele ait: a) Cook uzaklığı, b) Tahmin doğruluğu.4. Sonuç ve Tartışma

Tablo 4 geliştirilen modele ait deneysel ve tahmin sonuçlarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Tablonun genel incelemesi belirli oranlarda metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanımının dayanım üzerinde önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle % 15 metakaolin ve % 20 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren serilerde bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun birlikte kullanıldığı serilerde de elde edilen sonuçlar kontrol serisine göre daha yüksek çıkmıştır. Bu serilere ait sonuçları tahmin edebilmek için matematiksel bir model geliştirilerek modele ait bağıl hata oranları hesaplanmıştır (Tablo 4). Bağıl hata oranları (BHO) hesaplanırken Denklem 1 dikkate alınmıştır [27]. Bağıl hata oranlarına ait değerlerin genel değerlendirilmesi tüm numunelere ait sonuçların % 5'in altında olduğunu göstermektedir. Hatta bazı kendiliğinden yerleşen harç serileri için bu değer %1'in altında kaldığı ve tahmin sonuçlarının yüksek doğrulukla gerçekleştiğini sunmaktadır.

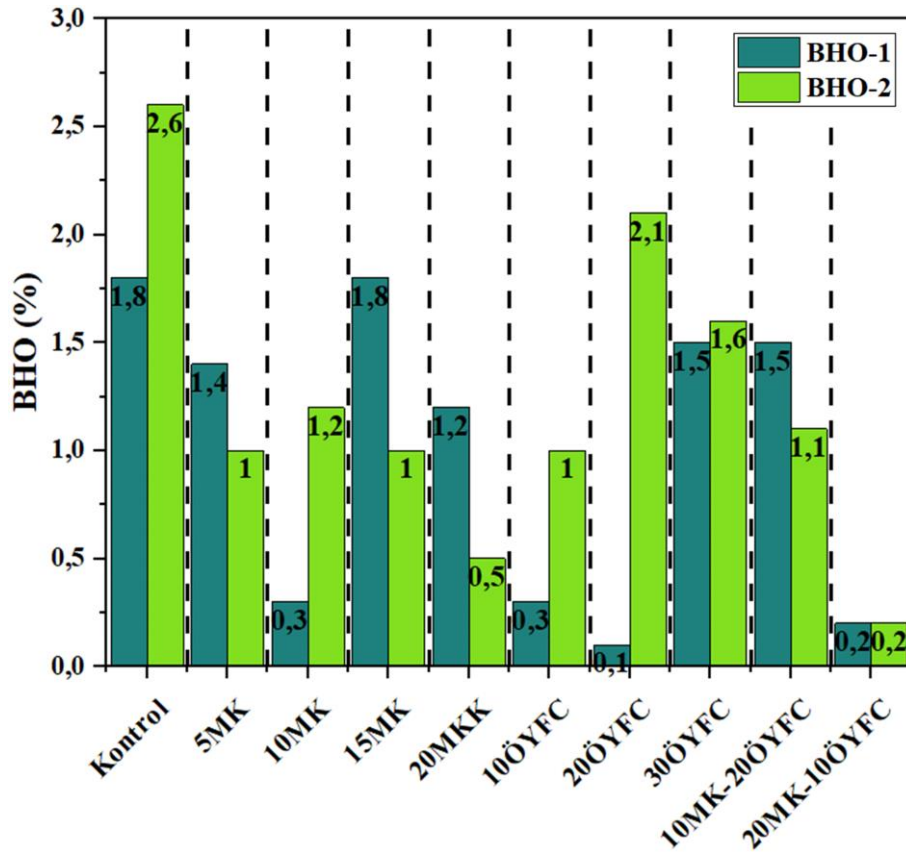
$$BHO = \frac{Deneyisel - Tahmin}{Deneyisel} \times 100 \quad (3.1)$$

Tablo 4. Modele ait bağıl hata oranları.

Karışım kodu	Deneyisel	Tahmin	Deneyisel	Tahmin	BHO	BHO
Kontrol	32.9	32.3	29.6	30.3	1.8	2.6
5MK	32.4	31.9	34.6	34.2	1.4	1.0
10MK	37.4	37.2	35.7	36.1	0.3	1.2
15MK	35.5	36.1	39.1	38.7	1.8	1.0
20MK	36.4	36.9	37.8	37.6	1.2	0.5
10ÖYFC	37.7	37.6	32.2	31.9	0.3	1.0
20ÖYFC	41.3	41.3	32.9	32.3	0.1	2.1
30ÖYFC	35.6	36.1	29.9	30.3	1.5	1.6
10MK-20ÖYFC	38.5	38.0	36.5	36.9	1.5	1.1

20MK-10ÖYFC	39.6	39.7	37.9	38.0	0.2	0.2

Modellere ait sonuçların daha iyi bir şekilde açıklanabilmesi için elde edilen sonuçlar Şekil 2’de kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. En yüksek bağıl hata oranları kontrol serisinde görülmesine rağmen bu değer % 2.6 olarak belirlenmiştir. Geri kalan tüm seriler için bu değer neredeyse % 1’in altında gözlenmiştir. 20MK-10ÖYFC serisi dikkate alındığında iki numune içinde bağıl hata oranlarının % 0.2 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu seri ve genel inceleme özelinde elde edilen sonuçlar geliştirilen modelin etkin bir tahmin yapabilme yeteneğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Geliştirilen modele ait bağıl hata oranları.

3.2. Çevresel sonuçların incelenmesi

Bu bölüm etki kategorilerinden dikkate alınan enerji tüketimi değerlerinin sonuçlarını incelemeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda Tablo 2’de verilen karışım tasarımı dikkate alınarak enerji tüketimi değerleri hesaplanmış olup, dikkate alınan malzemelerin enerji tüketimi üzerindeki etkinliği kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait enerji tüketimi değerleri Tablo 5’de kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Tablo 5’in kapsamlı incelenmesi ek çimento esaslı malzeme kullanımına bağlı olarak Enerji Tüketimi değerlerinde önemli azalmalar meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle 20MK-10ÖYFC serisi ile kontrol serisinin karşılaştırılması Enerji Tüketimi değerlerinin sırasıyla 1506-1989.1 MJ olduğunu göstermektedir. Bu durum Enerji Tüketimi değerlerinde yaklaşık % 24.3’lük bir azalmaya karşılık gelmektedir. Yapılan literatür araştırmalarının kapsamlı değerlendirmesi

de benzer mekanik özelliklere sahip olan ek çimento esaslı malzeme içeren serilerin daha düşük Enerji Tüketimi değerleri sunduğunu göstermektedir [32, 33].

Tablo 5. Kendiliğinden yerleşen harç serilerine ait Enerji Tüketimi sonuçları.

Karışım Kodu	Çimento	MK	ÖYFC	GDBA	Pomza	Beton Üretimi	Toplam (MJ)
Kontrol	1930.5	0.0	0.0	20.1	14.2	24.3	1989.1
5MK	1834.0	14.5	0.0	20.0	14.1	24.3	1906.8
10MK	1737.5	29.0	0.0	19.9	14.0	24.3	1824.6
15MK	1640.9	43.5	0.0	19.7	13.9	24.3	1742.3
20MK	1544.4	58.0	0.0	19.6	13.8	24.3	1660.0
10ÖYFC	1737.5	0.0	39.1	20.1	14.2	24.3	1835.1
20ÖYFC	1544.4	0.0	78.3	20.0	14.1	24.3	1681.0
30ÖYFC	1351.4	0.0	117.4	19.9	14.1	24.3	1527.0
10MK-20ÖYFC	1351.4	29.0	78.3	19.7	13.9	24.3	1516.5
20MK-10ÖYFC	1351.4	58.0	39.1	19.5	13.7	24.3	1506.0

4. Sonuçlar

Bu çalışma atık ve ek çimento esaslı malzemeler kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mekanik- çevresel özelliklerini incelemeye ve geliştirilen matematiksel model yardımıyla mekanik özellikleri tahmin etmeye odaklanmaktadır. Çalışmaya ait bazı sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Mekanik özellikleri tahmin etmek için geliştirilen matematiksel modelin etkinliği bağıl hata oranları dikkate alınarak incelenmiştir. Bağıl hata oranlarının tamamının %5'in altında olduğu, hatta bazı serilerde bu değerin %1'in altına düştüğü görülmüştür. Buradan geliştirilen modelin tahmin sonuçlarının tatmin edici düzeylerde olduğu açıkça görülmektedir. Belirlilik katsayısının 0.97 olması da modelin etkin bir kullanıma sahip olduğunu desteklemektedir.
- 2- Enerji Tüketimi değerlerinin ek çimento esaslı malzeme kullanımına bağlı olarak önemli ölçüde azaldığı açıkça görülmektedir. %30 oranında ek çimento esaslı malzeme içeren serilerde yaklaşık olarak %20-25 aralığında bir azalma meydana gelmektedir. Özellikle deprem sonrası beton tüketiminin yüksek olduğu bölgelerde çevre kirliliğini azaltmak ve mekanik özellikleri iyileştirmek adına ek çimento esaslı malzemeler önemli katkılar sunmaktadır.
- 3- Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi hedefleri kapsamında atık malzemelerin kullanımı kapsamlı şekilde incelenmiştir. Ek çimento esaslı malzeme kullanımı ile atık malzemelerin olumsuz yönleri mekanik anlamda dengelenmiştir. Böylece atık malzemelerin kullanımına olanak sağlanarak doğal kaynak tüketimi azaltılmış ve atık yönetimine önemli katkılar sunulmuştur.
- 4- Geri dönüşümlü agregaların geniş karakteristiklere sahip olması çalışmanın temel sınırlamalarından biri olmasına rağmen atık malzemelerin değerlendirilmesine olanak sağlaması sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda büyük önem arz etmektedir.

- 5- Özellikle Türkiye gibi deprem riski yüksek olan yerleşim bölgelerinde olası yıkıcı depremler meydana gelmeden önce inşaat ve yıkıntı atıkları için bir atık yönetim sistemi oluşturulmalıdır. Böylece önemli teknik, çevresel ve ekonomik kazanımların elde edilmesi sağlanabilir.

Teşekkür

Yazar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Ulucan, M. (2024). From waste to sustainable production: Experimental design and optimization of sustainable concrete using response surface methodology and life cycle assessment. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 42, 101770. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101770>.
- [2] Yön, M. Ş., Yön, B., Karataş, M., & Benli, A. (2024). Sustainable use of boron waste and volcanic scoria in slag-based self-compacting alkali-activated mortars: Fresh, mechanical and durability properties. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 41, 101664. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101664>.
- [3] Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2022). A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental. *Waste Management*, 146, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>.
- [4] Chen, L., Huang, Z., Pan, W., Su, R. K. L., Zhong, Y., & Zhang, Y. (2024). Low carbon concrete for prefabricated modular construction in circular economy: An integrated approach towards sustainability, durability, cost, and mechanical performances. *Journal of Building Engineering*, 90, 109368. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109368>.
- [5] Li, T., Nogueira, R., Pereira, M. F. C., de Brito, J., & Liu, J. (2024). Effect of the incorporation ratio of recycled concrete aggregate on the properties of self-compacting mortar. *Cement and Concrete Composites*, 147, 105429. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105429>.
- [6] Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30, 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [7] Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>.
- [8] Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2023). An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: Example of the Elysium. *Structural Concrete*, 24, 3329–3350. <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.

- [9] Ulucan, M., Yildirim, G., Alatas, B., & Alyamac, K. E. (2023). A new intelligent sunflower optimization based explainable artificial intelligence approach for early-age concrete compressive strength classification and mixture design of RAC. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202300138>.
- [10] Ulucan, M., Tas, Y., & Alyamac, K. E. (2023). Multi-objective optimization and assessment of recycled concrete aggregates for sustainable development: Example of the Kömürhan bridge. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202201018>.
- [11] Ulucan, M., Gunduzalp, E., Yildirim, G., Alatas, B., & Alyamac, K. E. (2024). Optimizing sustainable concrete compressive strength prediction: A new particle swarm optimization-based metaheuristic approach to neural network modeling for circular economy and disaster resilience. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202400070>.
- [12] Dener, M., Karataş, M., & Mohabbi, M. (2021). High temperature resistance of self-compacting alkali-activated slag/Portland cement composite using lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, 290, 123250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123250>.
- [13] Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2023). A comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of green concretes produced using recycled concrete aggregates and supplementary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 97765–97785. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29197-y>.
- [14] Türk, E., Karataş, M., & Dener, M. (2022). Rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing basalt powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 356, 129229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129229>.
- [15] de Brito, J., & Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>.
- [16] Galusnyak, S. C., Petrescu, L., & Cormos, C.-C. (2022). Environmental impact assessment of post-combustion CO₂ capture technologies applied to cement production plants. *Journal of Environmental Management*, 320, 115908. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115908>.
- [17] Jiang, X., Xiao, R., Bai, Y., Huang, B., & Ma, Y. (2022). Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130778. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130778>.
- [18] Ulucan, M., Yildirim, G., Alatas, B., & Alyamac, K. E. (2024). Modelling and evaluation of mechanical performance and environmental impacts of sustainable concretes using a multi-objective optimization based innovative interpretable artificial intelligence method. *Journal of Environmental Management*, 372, 123364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123364>.
- [19] Culcu, M. B., & Esen, H. (2024). Investigation of mechanical, durability, and thermal properties of sustainable self-compacting mortars containing construction demolition waste and supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 95, 110361. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110361>.
- [20] Ulas, M. A., Culcu, M. B., & Ulucan, M. (2024). Valorization of recycled aggregates to eco-

- efficient lightweight self-compacting mortars: Studies on microstructure, mechanical, durability, environmental, and economic properties. *Construction and Building Materials*, 419, 135436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135436>.
- [21] Erkek, H., & Yetkin, M. (2023). Assessment of the performance of a historic minaret during the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 105620. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105620>.
- [22] Dedeoğlu, İ. Ö., Yetkin, M., Calayır, Y., & Erkek, H. (2024). January 24, 2020 Sivrice-Elazığ (Türkiye) earthquake: The seismic assessment of the earthquake territory, geotechnical findings and performance of masonry buildings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48, 2393–2412. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01318-0>.
- [23] EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use*. [European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems]. UK: EFNARC..
- [24] ASTM International. (2022). *Standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete* (ASTM C597-22). West Conshohocken, PA: ASTM International
- [25] European Committee for Standardization. (2019). *Compressive strength – Specification for testing machines* (EN 12390-4:2019). Brussels, Belgium: CEN.
- [26] Özdemir, A. M. (2025). Experimental evaluation and 3D finite element simulation of creep behaviour of SBS modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 460, 139821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139821>.
- [27] Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, 144, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>.
- [28] International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management: Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14044)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [29] International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040)*. Geneva, Switzerland: ISO..
- [30] Xing, W., Tam, V. W. Y., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2023). Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 193, 106947. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106947>.
- [31] Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., & Stanić, M. (2015). Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 87, 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>
- [32] Wijayasundara, M., Crawford, R. H., & Mendis, P. (2017). Comparative assessment of embodied energy of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 152, 406–419.
- [33] Shrestha, J. K. (2021). Assessment of energy demand and greenhouse gas emissions in low-rise building systems: Case study of five building systems built after the Gorkha Earthquake in Nepal. *Journal of Building Engineering*, 34, 101831. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101831>.

Araştırma Makalesi

Tunceli’de Yetişen Kuşburnu (*Rosa canina*) ve Alıç (*Crataegus orientalis*) Yabani Meyvelerinin Toplam Fenolik Madde Miktarı, Fenolik Kompozisyonu, Antioksidan Kapasitesi ile Bazı Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

Şenay Kasun¹ , Emrah Karakavuk² , Zeynep Eroğlu^{3,*}  ve
Fulya Benzer⁴ 

Gönderim: 01.11.2024

Kabul: 28.05.2025

¹Tunceli İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, Tunceli, Türkiye; senaykasun@hotmail.com

^{2,3}Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Tunceli, Türkiye; ²ekarakavuk@munzur.edu.tr; ^{3,*} zeroglu@munzur.edu.tr

⁴Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Ebelik Bölümü, Tunceli, Türkiye; fbenzer@munzur.edu.tr

*Sorumlu Yazar

Özet: Günlük yaşamda ve çevremizdeki çeşitli etkenler nedeniyle oluşan serbest radikallerin organizmalara zarar veren etkilerini azaltmak için doğal antioksidanların rolü giderek daha fazla önem taşımaktadır. Bu açıdan antioksidan ve fenolik madde miktarları yüksek olan alıç ve kuşburnu meyveleri dikkat çekmektedir. Bu çalışmada Tunceli ilinde doğal olarak yetişen kuşburnu (*Rosa canina*) ve alıç (*Crataegus orientalis*) meyvelerinin bazı fizikokimyasal özellikleri, antioksidan aktiviteleri, toplam fenolik madde miktarları (TFMM) ve fenolik bileşik kompozisyonları incelenmiştir. Tunceli’de yetişen kuşburnu meyvelerinde TFMM 1265.02-1344.68 ve alıç meyvelerinde 318.18-370.85 mg GAE kg⁻¹ yaş ağırlık olarak, antioksidan aktivitesi kuşburnu meyvesinde 4.83-5.26, alıç meyvesinde 1.85-2.36 µmol AAE g⁻¹ yaş ağırlık olarak belirlenmiştir. Kuşburnu ve alıç yabani meyveleri arasında antioksidan aktivitesi ve TFMM bakımından istatistiksel olarak fark belirlenmiş ve her iki parametre açısından da kuşburnu meyvesinin alıç meyvesine oranla daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Alıç meyvesi kuşburnu meyvesine oranla epigallocateşin, protokateşuik asit ve kuersetin-3-glukozit fenolik bileşenlerini daha yüksek miktarda içerdiği ve iki meyve içeriği arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: alıç; antioksidan; kuşburnu; fenolik bileşik; toplam fenolik madde; Tunceli.

Research Article

Determination of Total Phenolic Content, Phenolic Composition, Antioxidant Capacities and Some Physicochemical Features of Rosehip (*Rosa canina*) and Hawthorn (*Crataegus Orientalis*) Wild Fruits Growing in Tunceli

Abstract: The role of natural antioxidants is increasingly important in reducing the damaging effects of free radicals formed in daily life and due to various factors in our environment. In this respect, hawthorn and rosehip fruits, which have high amounts of antioxidants and phenolic substances, attract attention. In this study, some physicochemical properties, antioxidant activities, total phenolic substance amounts (TFMM)

and phenolic compound compositions of rosehip (*Rosa canina*) and hawthorn (*Crataegus orientalis*) fruits growing naturally in Tunceli province were investigated. TFMM was determined as 1265.02-1344.68 in rosehip fruits grown in Tunceli and 318.18-370.85 mg GAE kg⁻¹ fresh weight in hawthorn fruits, antioxidant activity was determined as 4.83-5.26 in rosehip fruits and 1.85-2.36 μ mol AAE g⁻¹ fresh weight in hawthorn fruits. A statistical difference was determined between rosehip and hawthorn wild fruits in terms of antioxidant activity and TFMM, and it was observed that rosehip fruit had higher values than hawthorn fruit in terms of both parameters. It was determined that hawthorn fruit contained higher amounts of epigallocatechin, protocatechuic acid and quercetin-3-glucoside phenolic compounds than rosehip fruit and the difference between the two fruit contents was statistically significant.

Keywords: rosehip; hawthorn; antioxidant; total phenolic substance; phenolic compound; Tunceli.

1. Giriş

Günümüz insanı; gündelik yaşantısında gittikçe artan çevre ve hava kirliliği, hızlı gelişen teknoloji ve sanayileşmenin yarattığı olumsuzluklar, ultraviyole (UV) ışınlar, radyasyon, sağlıksız ve düzensiz beslenme, katkı maddeli gıdalar, zirai ilaçlar, işsizlik ve ekonomik problemler, sigara ve alkol gibi kötü alışkanlıklar ve bunun gibi birçok zararlı etmenle karşı karşıya kalmaktadır. Tüm bu fiziksel, sosyal, psikolojik ve çevresel etkiler insanlarda stres düzeyinin artmasıyla birlikte hücrelerde serbest radikal oluşumuna neden olan ekzojen faktörler olarak sıralanabilir. Mitokondriyal elektron taşıma sistemi, araşidonik asit metabolizması, enzimlerin katalitik döngüsü ve fagositoz gibi normal metabolik olayların işleyişi sırasında da endojen kaynaklı olarak serbest radikaller oluşabilmektedir [1-2].

İnsan vücudu, serbest radikallerin zararlı etkilerini azaltmak için sürekli olarak süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve glutatyon peroksidaz (GSH-Px) gibi endojen enzimler üretmektedir. Buna ek olarak tükettiğimiz gıdaların antioksidan içerikleri de vücudumuzun antioksidan savunma sistemine önemli katkılar yapmaktadır [3]. Bu bakımdan serbest radikallerin etkilerini engellemek veya yavaşlatmak amacıyla ilaçlardan öte antioksidan içerikli sağlıklı besinlerin tüketilmesi önem kazanmaktadır. Özellikle bitkisel kaynaklı olarak tüketilen pek çok gıdada bulunan antioksidanların bazı hastalık risklerini ortadan kaldırdığı bilinmektedir [4].

İnsan sağlığı üzerinde önemli etkileri bulunan yüksek antioksidan kapasitesine sahip meyveler ve bu meyvelerden üretilen gıdalara yönelik ilgi her geçen gün artış göstermektedir. Yabancı meyvelerin doğal ortamlarında zorlu şartlarda daha zengin içeriğe sahip oldukları belirtilmiştir. Farklı lokasyonlarda yetişen aynı tür meyveler çevresel koşullar nedeniyle ticari çeşitlerine göre daha fazla antioksidan ve flavonoid kapasitesine sahip olduğunu belirtilmiştir [5]. Yabancı meyveler çoğunlukla doğal floralarında yetişmekte olup daha çok taze olarak tüketilmekte ve yöresel pazarlarda yer bulmaktadır. Bu meyvelerden kuşburnu, kızılıçık, alıç ve yaban mersininden (murt) reçel, marmelat ve meyve suyu gibi ürünler üretilmekte ayrıca çay olarak tüketilmektedir. Son yıllarda bu meyvelerin kurutulup tozları üretilerek farklı ürünlerde de kullanılmaktadır. Bu yabancı meyveler doğadan toplanarak elde edikleri için daha az bulunmakta ayrıca sağlık açısından önemli görevleri olması yabancı meyvelerin önemini arttırmaktadır [6].

Ülkemizin her bölgesinde yayılış gösterebilen alıç ve kuşburnu gülgiller (Rosaceae) familyasına ait çok yıllık bitkilerdir. Kuşburnu ve alıç meyveleri geçmişten günümüze yabancı olarak üretilmektedir. Kuşburnu meyvesi direk tüketildiği gibi marmelat, çay ve meyve suyu yapımında da kullanılmaktadır. Alıç meyvesi ise direk meyve olarak tüketiminin yanında marmelat, reçel ve sirke yapılarak da tüketilmektedir [7]. Ayrıca alıç meyvesi bazı Avrupa ülkelerinde ilaç yapımında kullanılmaktadır [8]. Alıç meyvesinin bulundurduğu fenolik bileşenler, flavonoidler, proantosiyanidinler, tanen ve organik asitler ile insan sağlığı açısından oldukça faydalı olduğu bildirilmektedir [9].

Kuşburnu meyvesi fitokimyasal bileşikler açısından zengin bir meyve olup meyvenin askorbik asit miktarı pek çok meyveden daha yüksek oranda bulunmaktadır [10]. Kuşburnu meyvesi yapısında karo-tenoid bileşikler, hidroksinamik asit, kateşin, kuersetin, gallik asit ve kamferol gibi fenolik maddeler bulundurmaktadır. Kuşburnu gıda sanayisinin yanı sıra ilaç sanayinde askorbik asit ve proantosiyenin kaynağı olarak kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmada, Tunceli ili ve ilçelerinde doğal olarak yetişen, dört farklı bölgeden toplanan kuşburnu (*Rosa canina*) ve alıç (*Crataegus orientalis*) meyvelerinin çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri, anti-oksidan kapasitesi, toplam fenolik madde içeriği ve fenolik bileşik kompozisyonu belirlenmiştir. Ayrıca, kuşburnu ve alıç meyveleri arasındaki farklılıklar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen bulguların, bitkisel kaynaklı ilaçların geliştirilmesi için yol gösterici olabileceği değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metod

Kuşburnu (*Rosa canina*) ve alıç (*Crataegus orientalis*) yabani meyveleri; Tunceli merkez köyleri (Yolkonak, Kopuzlar, Böğürtlen, Çimenli, Burmageçit, Dilek, Dedeğaç), Pertek (Kacarlar, Pınarlar, Mercimek, Günboğazı, Yeniköy, Tozkoparan, Merkez), Mazgirt (İsmailli, Aslanyurdu, Aşağı Tarlacık, Kızılcık, Koçsuyu, Kuşçu, Göktepe), Hozat (Çığırılı, Altınçevre, Yenimahalle, Balkaynar, Karaca, Dervişcemal, Buzlupınar) olarak, Tunceli il merkezi ve 3 farklı ilçenin 7 farklı noktasından 2016 yılında toplandı. Meyvelerin toplandığı noktalar harita üzerinde Şekil 1’de görülmektedir. Meyveler çekirdeklerinden ayrılıp pulp haline getirilerek örneklerde su aktivitesi, pH, renk, kuru madde miktarı ve kül miktarı analizleri yapılmıştır. Ekstrakte edilen örneklerde toplam fenolik madde miktarı, antioksidan kapasite, fenolik bileşik kompozisyonu dağılımı belirlenmiştir.



Şekil 1. Alıç ve kuşburnu meyvelerinin toplandığı noktalar

Alıç ve kuşburnu meyvelerinin, su aktiviteleri; Novasina su aktivitesi ölçüm cihazı ile [12], pH değerleri, 5 g meyve 25 mL saf su ile homojen hale getirilip 20 °C de pH metre ile (Thermo Scientific, Orion3Star, Singapur) ölçülmüş, renk Hunter (L^* , a^* , b^*) renk ölçüm sisteminde (Konica Minolta, CR-400, Japan) renk ölçer ile belirlenmiş, toplam kurumadde miktarı vakumlu etüvde 70 °C’ de (200 mmHg) kurutularak ağırlık kaybı % olarak belirlenmiştir [13]. Toplam kül miktarı örneklerde ön yakma işlemi yapılarak 550°C’de kül fırınında siyah nokta kalmayınca kadar yakılıp % olarak hesaplanmıştır [13].

Kuşburnu ve alıç meyvelerinin ekstraksiyonu için 5 g örnek tartılıp 25 mL metanol-su (v/v 50:50) eklenmiş ve 10 dk ultrasonik su banyosunda ultrases uygulanmıştır. Mekanik bir çalkalayıcı ile 15 dk karıştırıldıktan sonra soğutmalı santrifüjde (Centurion Scientific K3 Series) 4°C’de 8500 devir/dk hızda 20 dk santrifüj edilip üstte kalan berrak kısım analizler için kullanılmıştır [14].

Yabani meyvelerin toplam antioksidan kapasitesi, 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH[•]) antioksidan aktivite yöntemine göre yapılmıştır. 0.1 mL ekstrakt alınmış 3.9 mL DPPH çözeltisi (6x10⁻⁵ M) eklen-
dikten 30 dk sonra 515 nm dalga boyunda UV-GB spektrometresinde (UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan) absorbans değerleri okunmuş, antioksidan aktivite değeri μmol askorbik asit eşdeğeri (AAE) g⁻¹ yaş ağırlık olarak verilmiştir [14-15].

Toplam Fenolik Madde miktarı analizi Folin-Ciocalteu reaktifi ile [16] metoduna modifikasyonlar yapılarak belirlendi. Örneklerden 1 mL ekstrakt alınıp üzerine 45 mL saf su, 1 mL Folin-Ciocalteu reaktifi ve 3 dk sonra %3'lik 3mL Na₂CO₃ çözeltisi ilave edilip 2 sa sonra 720 nm'de absorbans ölçülmüş ve sonuçlar mg gallik asit eşdeğeri (GAE) g⁻¹ yaş ağırlık olarak hesaplanmıştır.

Fenolik bileşik kompozisyonu belirlemek için yabani meyvelerden 5 g tartılıp 25 mL metanol ile homojenize edildikten sonra 5000 rpm 15 dk santrifüj edilmiştir. Süpernatant kısmı 0.45µm'lik filtreler ile süzülerek HPLC cihazı (Shimadzu, Japonya) analiz edilmiştir. 25°C kolon sıcaklığında, C18 (250x4mm) kolonu kullanılarak 1 mL dk⁻¹ akış hızında, asetik asit/su (95:5, v/v) ve metanol mobil fazı kullanılarak yapılmıştır. [17]

Kuşburnu ve alıç örneklerinin istatistiksel analizi SPSS-18 paket programı ile yapılmıştır. Su aktivitesi, pH, renk, kuru madde miktarı ve kül miktarı analiz sonuçları ve antioksidan kapasite analizi için tek yönlü MANOVA testi kullanılarak (gruplar arasındaki farklılıkları belirlemek için Duncan testi kullanılmıştır) il merkezi ve ilçelere ait değerler karşılaştırılmıştır [18]. Antioksidan kapasite analizi değerlerinin meyveler arasında karşılaştırılması amacıyla bağımsız iki örnek T testi kullanılırken, toplam fenolik madde miktarı ve fenolik bileşik kompozisyonu dağılımı arasındaki farkın anlamlı olup olmadığını araştırmak için ise parametrik olmayan Mann Whitney U (nonparametrik) istatistik testi kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Tunceli ve farklı ilçelerinden toplanan kuşburnu meyvelerine ait belirlenen özellikler Tablo 1'de görülmektedir. Su aktivitesi, pH, kuru madde miktarı, kül miktarı analizi sonuçlarına göre istatistiksel açıdan değerler arasında fark bulunmamıştır ($p>0.05$). Renk parametrelerinden olan aydınlık değeri L* kuşburnu örneklerinde Tunceli'de Pertek'e göre düşük olmakla birlikte Hozat ve Mazgirt ile benzerlik göstermektedir. Pertek'ten toplanan kuşburnu örneklerinin L* değeri Tunceli'ye göre yüksek bulunmuştur ($p<0.05$). Pertek, Mazgirt ve Hozat ilçelerinden alınan örneklerin a* değerleri il merkezine göre düşük olmakla birlikte birbirleri ile istatistiksel olarak benzerlik göstermektedir. Mazgirt'e ait b* değeri Pertek göre düşüktür. Pertek'e ait b* değeri ise Mazgirt'e göre yüksek olup, Tunceli ve Hozat ilçelerine ait b* değerleri bütün ilçeler ile benzerdir.

Kuşburnu örneklerinin DPPH' radikalini giderme aktivitesine ait değerlerin il merkezi ve ilçelere göre değişiminin istatistiksel olarak arasındaki fark önemli bulunmuştur ($p<0.05$). Tunceli merkez ilçesi, istatistiksel olarak diğer üç ilçeye göre daha yüksek olarak bulunmuş, ilçeler arasında istatistiksel açıdan bir fark görülmemiştir. Kuşburnu örneklerine ait fenolik bileşik kompozisyonu Tablo 3'de görülmektedir. Kuşburnu (Rosa canina) meyvesinde kateşin gallat, kateşin, klorojenik asit, gallik asit, prosiyanidin B2, protokateşuik asit, kuersetin-3-glukozit ve rutin gibi fenolik bileşiklerin varlığı tespit edilmiştir. Bu bileşikler arasında prosiyanidin B2 (19.844–40.103 mg kg⁻¹) ve kateşin (11.551–19.24 mg kg⁻¹) miktarlarıyla öne çıkarak, kuşburnu meyvesinin temel fenolik bileşenleri olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Kuşburnu örneklerine ait analiz sonuçları

Analizler	Kuşburnu Örnekleri			
	Tunceli	Pertek	Mazgirt	Hozat
Su Aktivitesi	0.716±0.012 a	0.698±0.008 a	0.709±0.009 a	0.692±0.014 a
pH	3.58±0.01 a	3.59±0.02 a	3.61±0.01 a	3.56±0.01 a
L*	28.97±0.58 a	30.37±0.18 b	29.45±0.16 ab	30.01±0.24 ab
Renk a*	18.38±0.46 b	16.42±0.49 a	16.98±0.13 a	17.12±0.43 a
b*	12.50±0.40 ab	12.83±0.26 b	11.90±0.13 a	12.32±0.24 ab
Kuru Madde Miktarı (%)	51.67±2.30 a	44.74±1.17 a	48.41±2.06 a	47.61±2.91 a
Kül Miktarı (%)	2.79±0.11 a	2.61±0.08 a	3.13±0.37 a	3.03±0.09 a
TFMM (mg GAE kg⁻¹ yaş ağırlık)	1344.68±59.04	1265.02±53.88	1265.35±50.64	1286.52±4.21

Antioksidan Kapasite ($\mu\text{mol askorbik}$ **asit eşdeğeri g^{-1})**5.26 $\pm$ 0.04 b4.97 $\pm$ 0.06 a4.86 $\pm$ 0.08 a4.83 $\pm$ 0.10 a*Aynı satırda farklı harfle belirtilen özelliklere ait ortalamalar istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0.05$)

Genel olarak taze meyve ve sebzeler için ortalama su aktivitesi (a_w) değerleri ile 0.970-0.996 karşılaştırıldığında; 4 farklı ilçeden toplanan kuşburnu örneklerinin ortalama a_w değerleri (0.692 $\pm$ 0.014 - 0.716 $\pm$ 0.012) gibi düşük değerlerde bulunmuştur. Tekirdağ'da satışa sunulan kuşburnu örneklerinde su aktivitesi değerlerini 0.53-0.76 arasında belirlenmiş olup ortalama su aktivitesi değerinin 0.64 olduğu belirtilmiştir [19]. Sırbistan'da yapılan diğer çalışmada ise taze kuşburnu örneklerinin su aktivitesi değeri 0.91, kurutulmuş kuşburnu örneklerinde 0.42 olarak belirlemişler[20]. Kuşburnu marmelatlarının bazı fizikokimyasal özelliklerinin araştırıldığı çalışmada ise marmelatlarda su aktivitesi değeri 0.804-0.904 arasında saptanmıştır [21]. Çalışmamızda bulunan değerler Tekirdağ'da satışa sunulan kuşburnu örnekleri ile benzerlik göstermektedir. Diğer çalışmalardaki farklılıklar yöresel farklılıklardan kaynaklanabilmektedir.

Çalışmamızda elde edilen kuşburnu meyvesine ait pH değerleri (3.56 $\pm$ 0.01-3.61 $\pm$ 0.01) birçok kuşburnu meyvesine ait araştırma sonucu ile Güneş [22] 3.24-3.97, Adıgüzel [23] 3.79-4.10 ve Yolcu [24] 3.61-3.79 uyumluluk göstermektedir. Çalışmamızda belirlenen kuşburnu pH değerleri Demir ve Özcan [11] 4.34-5.12 tarafından bildirilen kuşburnu pH değerlerinden düşük; Aksu ve ark. [25] 3.28-3.42 tarafından belirtilen kuşburnu pH değerlerinden ise yüksektir.

Ercişli'nin [26] Erzurum bölgesinde gerçekleştirdiği çalışmada, kuşburnu meyvelerinin L^* değeri 48.06 ile 52.02 arasında tespit etmiş, Egea ve arkadaşları [27] ise bu değeri 38.02 olarak belirlemişlerdir. Yolcu [24] çalışmasında L^* değerlerini meyvede 13.91 $\pm$ 3.27, Altan [28] tarafından yapılan çalışmada ise L^* değerlerini kuşburnu meyvesinde 25.38 olarak saptamıştır. Araştırmamız kapsamında renk analizi sırasında pulp haline getirilen kuşburnu meyvesine ait L^* değeri (28.97 $\pm$ 0.58-30.37 $\pm$ 0.18), Ercişli [26] ve Egea ve ark. [27] tarafından tespit edilen değerlere göre düşük, diğerleri ile çok yakın bulunmuştur. Yine Özbey ve ark. [21] tarafından Tokat ili ve çevresinde üretilen 30 farklı kuşburnu marmelatında L^* değeri 26.41-36.18 olarak tespit edilmiştir.

Ercişli [26] Erzurum ilinde yetişen kuşburnu meyvelerinde a^* değerini 40.69-43.31, Egea ve ark. [27] tarafından 34.72, Altan [28] kuşburnu meyvesinde a^* değerini 18.07-26.21 olarak bulmuştur. Araştırmamızdaki bulgular (16.42 $\pm$ 0.49-18.38 $\pm$ 0.46) karşılaştırıldığında Tunceli il merkezi ve ilçelerinde yetişen kuşburnu örneklerinin a^* değerlerinin daha düşük seviyede bulunmuştur. Özbey ve ark. [21] kuşburnu marmelatında a^* değerini 5.81-17.20 arasında bildirilmişlerdir. a^* değerleri arasındaki farkın meyvelerin toplanma zamanlarındaki olgunlaşma derecelerindeki farklılık ve ait oldukları türlerin farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Yolcu [24] kuşburnu meyvesinin pulp haline getirilmesi aşamasında b^* değerlerinin 6.39'dan 12.69'a arttığını belirlemiştir. Altan [28] kuşburnu meyvelerinin b^* değeri 11.04, Erzurum'da yetişen kuşburnu meyvelerinde b^* değerini 39.39-47.73, Egea ve ark. [27] ise 23.69 olarak bildirmişlerdir. Çalışmamızda kuşburnu meyvesi b^* değerleri (11.90 $\pm$ 0.13-12.83 $\pm$ 0.26) Ercişli [26] ve Egea ve ark. [27] belirlediği değerlere göre düşük, diğer araştırma sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. Özbey ve ark. [21] kuşburnu marmelatının b^* değerini 8.43-24.01 arasında belirlemişlerdir.

Kuşburnu meyvesinde toplam kuru madde; Yıldız ve Nergiz [29] %41.00-70.08, Şen ve Güneş [30] %33.50-67.97, Güneş ve Şen [31] %33.98-68.57, Kazankaya ve ark. [32] %29.66-58.88 ve Doğan ve ark. [33] %46.22-50.27 olarak tespit etmişlerdir. Çalışmamızdaki bulgular (%44.74 $\pm$ 1.17 - %51.67 $\pm$ 2.30) ile genel olarak bir paralellik gösterdiği görülmektedir. Ancak; Keleş ve Kökosmanoğlu [34] % 26.28-28.20, Akyüz ve ark. [35] %31.61, Güneş [22] %34-40, Demir ve Özcan [11] %20.50-23.47, Ugla ve ark. [36] %23-28.70, Ercişli ve Eşitken [37] %34.82-40.05, Ercişli [26] %33.85-40.15 ve Altan [28] %39.42 tarafından bildirilen değerlere göre daha yüksek olarak saptanmıştır. Kuru madde içeriği meyvelerin türü ve çeşidi dışında yetiştiği bölge ve iklim şartları, hasat zamanı ve olgunlaşma derecesinden etkilenmesinden dolayı çalışmalarda farklılıklar görülebilmektedir.

Kül miktarı meyvenin bulundurduğu inorganik madde miktarının göstergesi olup, meyvelerin yetiştiği toprağın bulundurduğu mineral maddeler ve doğal yetiştirme koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Çalışmamızda kuşburnu örneklerinin toplam kül miktarı değerleri (%2.61±0.08-%3.13±0.37) Akyüz ve ark. [35] %1.33-2.49 ve Güleriyüz ve Ercişli [38] %3.40 tarafından kaydedilen bulgularla yakın, Adıgüzel [23] %1.88, Altan [28] %1.210-2.821 ve Fan ve ark. [39] %1.18 bildirdikleri değerlere göre ise yüksek bulunmuştur.

Tablo 2. Kuşburnu örneklerinin fenolik bileşik kompozisyonları

FENOLİK BİLEŞİKLER (mg kg ⁻¹)	KUŞBURNU ÖRNEKLERİ			
	Tunceli	Pertek	Mazgirt	Hozat
(-)-Kateşin gallat	5.07±0.001	5.69±0.001	3.87±0.001	1.34±0.002
(-)-Kateşin	11.55±0.002	13.89±0.001	16.32±0.001	19.24±0.330
(-)-Epigallokateşin gallat	TE	TE	TE	TE
(-)-Epigallokateşin	TE	TE	TE	TE
(-)-Gallokateşin gallat	TE	TE	TE	TE
Klorojenik asit	1.42±0.001	1.38±0.000	1.42±0.001	1.78±0.002
Epikateşin	TE	TE	TE	TE
Gallik asit	2.59±0.001	0.62±0.001	0.51±0.001	TE
Kaempferol	TE	TE	TE	TE
Kerasiyanin klorit	TE	TE	TE	TE
Prosiyanidin B ₂	40.10±0.001	29.64±0.001	19.84±0.001	28.92±0.001
Protokateşuik asit	TE	0.07±0.001	0.13±0.001	0.64±0.000
Kuersetin-3glukozit	1.04±0.000	1.53±0.001	0.98±0.001	0.71±0.000

Fattahi ve ark. [40] metanol ile ekstraksiyon yapılmış kuşburnu meyvelerinde TFMM 176.48-225.65 mg GAE 100 g⁻¹, Altan [28] etanol su karışımı ile ekstrakte edilen kuşburnu meyvesini TFMM 6147.5 mg kg⁻¹ olarak tespit etmişlerdir. Yolcu [24] tarafından kuşburnunun sulu ekstraktında TFMM 15226.32 mg GAE kg⁻¹ ve metanol ekstraktında 17080.61 mg GAE kg⁻¹, Wenzig ve ark. [41] tarafından su ve metil alkol çözücülerıyla hazırlanan ekstraktlarda TFMM sırasıyla 2.7 µg GAE mg⁻¹ ve 82.2 µg GAE mg⁻¹, Dölek [42] farklı hasat zamanlarına göre *Rosa canina* türüne ait TFMM 2010 yılı için 299.99-479.49 mg GAE 100 g⁻¹, 2011 yılında 516.21-817.49 mg GAE 100 g⁻¹ olarak bildirilmiştir. Su ve ark. [43] 2.59-5.09 mg GAE g⁻¹, Gao ve ark. [44] 76.26 mg GAE g⁻¹, Yi ve ark [45] 6974-12201 mg L⁻¹, Yoo ve ark. [46] 815.5 mg GAE 100 g⁻¹, Jablonska-Rys ve ark. [47] 3217.28 mg GAE 100 g⁻¹ taze meyve, Ghazghazi ve ark. [48] 5.42-8.21 mg GAE mL⁻¹, Egea ve ark. [28] 609.19 mg GAE 100 g⁻¹, Káhkönen ve ark. [49] kuşburnunda TFMM 12.5 mg GAE g⁻¹ (kuru madde), Araştırmamız sonucunda elde edilen bulgular 1265.02±53.88-1344.68±59.04 mg GAE kg⁻¹ (yaş ağırlık) literatürdeki değerler ile uyumlu olsa da genel olarak toplam fenolik madde miktarı düşük bulunmuştur. Araştırma sonuçlarımızın diğer çalışmalarda bildirilen yabani kuşburnu meyvelerinin içerdiği TFMM'na göre düşük olması, sonucumuzun yaş ağırlık üzerinden ifade edilmesinden kaynaklanmaktadır. Kuşburnu meyvesine ait kuru madde miktarının göz önünde bulundurularak TFMM'nın değerlendirildiğinde, araştırmamızda elde edilen değerlerin bildirilen bazı araştırma sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. TFMM bitkinin yetiştiği çevreye, olgunlaşma derecesine, meyveye uygulanan kültürel işlemlere, depolama süresindeki çeşitliliğe, ekstraksiyon yöntemine bağlı, biyotik ve abiyotik stres faktörlerinin etkisi fenolik bileşik miktarını değiştirmektedir. Farklı araştırmalarda meyvelerin renk özelliklerine göre hasat evrelerinde fenolik bileşiklerin olgunlaşmaya bağlı olarak koyu turuncu, kırmızı, koyu kırmızı renge sahip oldukları periyotlarda daha yüksek tespit edildiği ortaya konmuştur. Diğer meyvelerle ilgili yürütülen araştırmalar

koyu renkli meyvelerin toplam fenolik madde içeriğinin daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır [50-51].

Kuşburnu meyvesinde antioksidan bileşiklerin DPPH' radikalini giderme aktivitesi; Fattahi ve ark. [40] metanolle ekstrakte edilen kuşburnu meyvelerinde %79.16-87.78, Orhan ve ark. [52] Türkiye'de aktarlarda satılan kuşburnu meyvelerinde % 62.6-93.4, Yolcu [22] kuşburnunun pulpa işlenmesi sırasında hammaddelerin sulu ekstraktında % 41.52 ve metil alkol ekstraktlarında %42.63, Nadpal ve ark [53] *Rosa canina* kuşburnu türünden hazırlanan sulu ekstraktında 32.7 µg mL⁻¹ ve metanol ekstraktında 21.7 µg mL⁻¹ belirtmişlerdir. Çalışmamızda kuşburnu meyvesinin DPPH' radikalini giderme aktivitesi 4.83±0.10-5.26±0.04 µmol AAE g⁻¹ yaş ağırlık olarak belirlenmiştir.

Meyvelerde antioksidan aktivite kazandıran en önemli fitokimyasallar arasında fenolik bileşikler yer almaktadır [37,54]. Gao ve ark. [44] kuşburnu meyvesinde temel olarak bulunan fenolik bileşiklerin hidrokisisinamik asit, kateşin, kuersetin ve kamferol olduğunu belirtmişlerdir. Hvattum [55] kuşburnu meyvelerindeki fenolik bileşikleri; siyanidin-3-O-glikozit, çeşitli kuersetin glikozitleri; aglikonlar olarak kateşin ve kuersetin olarak belirlemiştir. Nadpal ve ark. [53] *Rosa canina* türüne ait kuşburnu meyvesinin su ekstresinde; kuersitrin 40.4 mg kg⁻¹, gallik asit 11.3 mg kg⁻¹, protokateşuik asit 9.79 mg kg⁻¹, kateşin 7.83 mg kg⁻¹, kuersetin-3-glukozit 2.54 mg kg⁻¹, epikateşin 2.35 mg kg⁻¹ olarak, metanol ekstresinde ise; kuersitrin 95.2 mg kg⁻¹, kuersetin-3-glukozit 9.40 mg kg⁻¹, protokateşuik asit 8.04 mg kg⁻¹, kateşin 4.23 mg kg⁻¹ ve epikateşin 2.92 mg kg⁻¹ olarak tespit etmişlerdir. Çalışmamızda elde edilen Tablo'de görülen sonuçlara göre; kuşburnu yabani meyvesinde kateşin gallat, kateşin, klorojenik asit, gallik asit, prosiyanidin B2, protokateşuik asit, kuersetin-3-glukozit ve rutin fenolik bileşiklerinin mevcut olduğu ve prosiyanidin B2 (19.844-40.103 mg kg⁻¹) ve kateşin (13.891-11.551 mg kg⁻¹) fenoliklerinin kuşburnu meyvesinin temel fenolik bileşenleri olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular ile Nadpal ve ark. [53] tarafından bildirilen veriler karşılaştırıldığında; kateşin fenolik bileşeninin hem su hem de metanol ekstresi için belirtilen değere göre daha yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Aynı araştırmada, çalışmamızda bir diğer temel fenolik olarak belirtilen prosiyanidin B2 tespit edilememişken, gallik asit, rutin, protokateşuik asit ve kuersetin-3-glukozit bileşenlerinin miktarı bizim çalışmamıza oranla daha yüksek olarak bildirilmiştir.

Tablo 3. Alıç örneklerine ait analiz sonuçları

Analizler		Alıç Örnekleri			
		Tunceli	Pertek	Mazgirt	Hozat
Su aktivitesi		0.722±0.015 a	0.776±0.021 b	0.824±0.016 c	0.715±0.004 a
pH		3.58±0.01 a	3.54±0.02 a	3.57±0.01 a	3.58±0.02 a
Renk	<i>L</i> *	33.68±0.68 a	38.41±0.65 c	34.68±0.69 ab	35.85±0.59 b
	<i>a</i> *	7.38±0.28 b	5.26±0.31 a	7.09±0.29 b	8.34±0.25 c
	<i>b</i> *	13.72±0.50 a	16.37±0.45 c	14.06±0.37 ab	14.99±0.29 b
Kuru Madde Miktarı (%)		28.74±0.29 a	28.07±0.65 a	31.62±3.66 a	28.67±0.82 a
Kül Miktarı (%)		1.17±0.14 a	0.75±0.13 a	0.79±0.08 a	1.23±0.38 a
Toplam Fenolik Madde miktarı(mg GAE kg ⁻¹ yaş ağırlık)		351.68±12.87	370.85±5.35	320.02±4.88	320.02±4.88
Antioksidan Kapasite (µmol askorbik asit eşdeğeri g-1)		2.36±0.05 bc	2.39±0.09 c	2.19±0.04 b	1.85±0.03 a

*Aynı satırda farklı harfle belirtilen özelliklere ait ortalamalar istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p<0.05)

Renk ölçüm değerlerine göre alıç meyvelerinin L* değerleri Tunceli, Pertek ve Hozat'a göre daha düşük olup, Mazgirt ile benzerdir. Mazgirt L* değeri il merkezi ve Hozat değerleri ile benzer olup, Pertek L* değerine göre daha düşük seviyede belirlenmiştir. Pertek L* değeri diğer üç ilçeye göre daha yüksek bulunmuştur. Pertek a* değeri il merkezi ve diğer iki ilçeye göre daha düşük olarak kaydedilmiştir. Tunceli ve Mazgirt a* değerleri Pertek'e göre daha yüksek, Hozat'a göre ise daha düşük miktarda iken birbirine benzer bulunmuştur. Hozat a* değeri ise daha yüksek miktarda tespit edilmiştir. Tunceli b* değeri Pertek ve Hozat'a göre daha düşükken Mazgirt ile benzerlik göstermektedir. Pertek b* değeri Tunceli ve diğer ilçelere göre daha yüksek bulunmuştur.

Alıç örneklerinin toplandığı yerlere göre antioksidan kapasitesi Tablo 3'de görüldüğü gibi yaş ağırlık üzerinden $\mu\text{mol askorbik asit eşdeğeri g}^{-1}$ şeklinde Hozat istatistiksel olarak diğer üç ilçeye göre daha düşük düzeyde saptanmıştır. Pertek ile Tunceli benzer, Mazgirt ve Hozat'a göre daha yüksek düzeyde belirlenmiştir. Tunceli ile Mazgirt istatistiksel olarak birbirine benzer bulunmuştur.

Yapılan çalışmalarda alıç meyvelerinin pH değerleri incelendiğinde Özcan ve ark., [56] 3.38, Emrem'in [57] *Crataegus oxyacantha* türü alıç meyvesinde pH değeri 4.22 olarak belirlemişlerdir. Gazioğlu, [58] Van yöresinde yabani olarak yetişen alıç meyvelerinde pH 3.38 ile 3.72 bulunmuş iken, çalışmamızda kullanılan *Crataegus orientalis* türüne ait değer en düşük olarak (3.38) bildirilmiştir. Van yöresinde yapılan diğer bir çalışmada 14 farklı genotipe ait alıç meyvelerinin pH 3.47- 4.45 arasında bulunmuştur [59]. Araştırmamız neticesinde Tunceli il ve ilçelerinde yetişen *Crataegus orientalis* türünde belirlenen pH değerlerinin (3.54 ± 0.02 - 3.58 ± 0.02) bu değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Sorkun [60] çalışmasında 8 farklı genotipteki alıç meyvelerinin L* değerlerini; maun-siyah renkli örneklerde 20.09-21.00, kırmızı renkli 28.67 ve sarı renkli örneklerde ise 67.80-68.50 değerinde belirlemiştir. Emrem [57] alıç meyvesinin L* değerlerinin 24.66-26.45 arasında değiştiğini belirlemiştir. Balta ve ark. [61] Çorum ilinde yabani olarak yetişen alıç meyvesinin 51 farklı genotipinde L* değerlerini 40.00-72.20 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Literatürdeki bulgular ile çalışmamızdaki sonuçlarımız (33.68 ± 0.68 - 38.41 ± 0.65) karşılaştırıldığında L* değeri Sorkun [59] ve Emrem [57] belirlediği sonuçlara göre yüksek, Balta ve ark. [67] belirlediği değerlere göre ise düşük olduğu saptanmıştır.

Emrem [57] alıç meyvesinde a* değerlerini 14.06-22.92, Konya'nın Beyşehir ilçesinden toplanan *Crataegus orientalis* türü alıç meyvelerinde yapılan diğer bir çalışmada a* değerleri 4.05-11.26 arasında saptamışlardır [62]. Sorkun [60] 8 farklı genotipteki alıç meyvesinde a* değerlerini -3.60-31.95 olarak belirlemiştir. Balta ve ark. [61] 51 farklı alıç genotipi için a* değerlerini 0.46-35.22 Çorum ilinde yetişen alıç meyvelerinde saptamışlardır. Tüm bu bulgular ışığında çalışmamızda kullanılan *Crataegus orientalis* türü alıç meyvesine ait değerlerinin (5.26 ± 0.31 - 8.34 ± 0.25) Çoklar ve Akbulut [62], Balta ve ark. [61] ve Sorkun'un [60] bildirdiği sonuçlarla uyumluluk gösterirken Emrem [57] belirlediği değerlere göre düşük olduğu görülmektedir.

Sorkun'un [60] 8 farklı genotipteki alıç meyvelerinde b* değerlerini 2.87-35.99 belirlemiştir. Emrem [57] farklı alıç türlerinde b* değerini -2.67-2.09 olarak saptamışlardır. Konya'nın Beyşehir ilçesinden toplanan *Crataegus orientalis* türü alıç meyvelerinde b* değerlerini 42.36-55.71 olarak belirlemişlerdir [62]. Balta ve ark. [61] Çorum ilinde 51 farklı alıç genotipinde meyvelerinin b* değerleri 20.84-42.09 bildirilmişlerdir. Araştırmamız kapsamında alıç meyvesi b* değerleri (13.72 ± 0.50 - 16.37 ± 0.45) Sorkun [60] ve Emrem'in [57] bildirdiği değerler ile benzerlik göstermekte, Çoklar ve Akbulut [62] ve Balta ve ark. [61] belirlediği değerlere göre düşük olduğu görülmüştür.

Özcan ve ark., [56] alıç meyvesi türlerinde kuru madde (KM) oranını %35, Emrem [57] ise (*Crataegus oxyacantha*) %45.33 belirlemişlerdir. Gazioğlu [58] Van yöresinde yetişen farklı tür alıç meyvelerinin KM oranını %23.24-%35.37 belirlemiş, Novruzov [63] Azerbaycan'da toplanan *Crataegus orientalis* türü alıç meyvelerinde KM oranını %31.30 olarak belirtmiş, çalışmamızda kullanılan *Crataegus orientalis* türü kuru madde oranına benzer (%28.073-31.624) bulunmuştur. Doğu Akdeniz Bölgesi'nde farklı bölgelerinden toplanan alıç meyvelerinin toplam KM oranları %24.97-25.93 belirlenmiş [64], belirlenen bu oranların çalışmamızdaki bulgulara göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Çalışmamızda ilçe bazında belirlenen alıç meyvesine ait kül miktarı (0.75 ± 0.13 -% 1.23 ± 0.38) Emrem [57] tarafından kaydedilen sonuçlara daha yakın iken Özcan ve ark. [54] tarafından saptanan bulgulara göre daha düşük olarak bulunmuştur.

Çalışmamızda alıç meyvesinin TFMM 318.18 ± 13.68 - 370.85 ± 5.35 mg GAE/kg yaş ağırlık olarak bulunmuştur. Alıç meyvesinin kuru madde miktarı göz önünde bulundurularak TFMM'nin diğer çalışmalarla karşılaştırılması sonucunda, araştırmamızda elde edilen değerlerin bildirilen birçok araştırma

sonucu ile uyumlu olduğu görülmüştür. TFMM alıçların ait olduğu türe, çeşide, olgunlaşma düzeyine, ekstraksiyonda kullanılan çözümlere ve yöntemle ilgili olarak farklılık göstermektedir.

Araştırmamızda kullanılan alıç meyvesinin DPPH[•] radikalini giderme aktivitesi $1.85 \pm 0.03 - 2.39 \pm 0.09$ $\mu\text{mol AAE/g}$ yaş ağırlık olarak belirlenmiştir. Vatansever [65] DPPH[•] radikalini giderme aktivitesini *Monogyna* türü alıç meyvesinde, (500 $\mu\text{g/mL}$) %98,12 olarak belirlemiştir. Keser [64] alıç meyvesinin DPPH[•] radikalini giderme aktivitesini su ile hazırlanan ekstresinde %87.22, etanol ekstresinde %88.22 olarak hesaplamıştır. *Crataegus orientalis* türü alıçta DPPH[•] serbest radikali giderme aktivitesini başka bir çalışmada, metanol-su karışımında 4.06 mmol troloks eşdeğeri 100 g⁻¹ kuru ağırlık, su ekstraksiyonunda ise 0.66 mmol troloks eşdeğeri 100 g⁻¹ kuru ağırlık olarak bildirilmiştir [35]. Araştırmamızda kullanılan alıç meyvesinin DPPH[•] radikalini giderme aktivitesi $1.85 \pm 0.03 - 2.39 \pm 0.09$ $\mu\text{mol AAE g}^{-1}$ yaş ağırlık olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Alıç örneklerinin fenolik bileşik kompozisyonları

FENOLİK BİLEŞİKLER (mg kg ⁻¹)	ALİÇ ÖRNEKLERİ			
	Tunceli	Pertek	Mazgirt	Hozat
(-)-Kateşin gallat	2.19±0.000	1.79±0.003	1.62±0.001	1.90±0.001
(-)-Kateşin	154.75±0.002	124.80±0.001	117,1±0.001	128.89±0.001
(-)-Epigallokateşin gallat	TE	TE	TE	TE
(-)-Epigallokateşin	35.98±0.001	34.15±0.001	28.09±0.002	34.26±0.002
(-)-Gallokateşin gallat	TE	TE	TE	TE
Klorojenik asit	1.81±0.001	1.65±0.001	1.76±0.001	1.68±0.002
Epikateşin	TE	TE	TE	TE
Gallik asit	0.97±0.001	0.80±0.000	0.88±0.002	0.95±0.001
Kaempferol	TE	TE	TE	TE
Kerasiyanin klorit	TE	TE	TE	TE
Prosiyanidin B ₂	12.27±0.001	11.01±0.004	30.94±0.004	19.07±0.004
Protokateşuik asit	1.15±0.001	0.98±0.000	0.93±0.001	0.64±0.002
Kuersetin-3glukozit	11.25±0.001	9.02±0.000	10.24±0.002	6.01±0.001
Rutin	2.43±0.001	1.75±0.002	16.74±0.002	0.99±0.001

TE: Tespit edilemedi.

Vatansever [65] *Monogyna* türü alıç meyvesinin yapısında; epikateşin 2247.87 $\mu\text{g g}^{-1}$, gallik asit 7.67 $\mu\text{g g}^{-1}$, klorojenik asit 126.92 $\mu\text{g g}^{-1}$, kafeik asit 60.48 $\mu\text{g g}^{-1}$, p-kumarik asit 2.13 $\mu\text{g g}^{-1}$ ve kuersetin 14.48 $\mu\text{g g}^{-1}$ fenolik bileşenleri belirlemişlerdir. Çoklar ve Akbulut [62] tarafından *Crataegus orientalis* türü alıçta farklı çözümler kullanılarak belirlenen fenolik bileşik kompozisyonu sonucunda su, metanol ve metanol-su ekstraksiyonlarında sırasıyla prosiyanidin B₂ 55.90 mg kg⁻¹, 335.50 mg kg⁻¹, 1026.90 mg kg⁻¹, epikateşin 218 mg kg⁻¹, 630.80 mg kg⁻¹, 890 mg kg⁻¹, rutin 271.80 mg kg⁻¹, 383.80 mg kg⁻¹, 497.20 mg kg⁻¹, klorojenik asit 88.10 mg kg⁻¹, 157.40 mg kg⁻¹, 273.40 mg kg⁻¹, epigallokateşingallat 51.30 mg kg⁻¹, 175.80 mg kg⁻¹, 358.10 mg kg⁻¹ olarak bildirilmiştir. Yapılan farklı çalışmalarda luteolin, kuersetin, apigenin, kaempferol, klorojenik asit, hiperosit, prosiyanidin B₂, B₅ gibi farklı fenolik bileşenlerinde tespit edildiği görülmüştür [67-68-69-70]. Alıç meyvesinin fenolik bileşen kompozisyonları ile ilgili yapılan çalışmalarda; Emrem [57] fenolik bileşik kompozisyonunda kateşin, epikateşin ve rutin fenolik bileşenlerini belirlemiştir. Kateşin fenolik bileşen miktarı alıç meyvesinde, 0.23 mg g⁻¹, epikateşin miktarı 8.66 mg g⁻¹, rutin ise 0.12 mg g⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Emrem [57] tanımlanan bileşikler içinde epikateşinin en yüksek miktar ile alıç meyvesine ait temel fenolik bileşen olduğunu belirtmiştir. Tablo 4’de verilen araştırma bulgularımızda alıç meyvesinin fenolik bileşen analizine göre yapısında kateşin

gallat, kateşin, epigallokateşin, klorojenik asit, gallik asit, prosiyanidin B₂, protokateşuik asit, kuersetin-3-glukozit ve rutin fenoliklerine rastlanılmış olup, kateşin (117.13-154.750 mg kg⁻¹) ve epigallokateşin (28.09- 35.980 mg kg⁻¹) fenolik bileşiklerinin alıç meyvesinin temel fenolik bileşikler olduğu saptanmıştır. Alıç ve kuşburnu meyvelerinin TFMM ve antioksidan aktivitelerinin karşılaştırılmasında meyvelerin TFMM ve DPPH[•] radikalini giderme aktiviteleri mukayesesinde kuşburnu meyvesinin alıca oranla daha yüksek değerlere sahip olduğu ve dolayısıyla antioksidan özellikler bakımından daha yararlı bir meyve olduğu sonucu ortaya konmuştur. Her iki meyve türünün ihtiva ettiği TFMM yaş ağırlık üzerinden hesaplandığından dolayı diğer çalışmalara oranla genel olarak düşük seviyede bulunmuştur. Ancak meyvelerin içerdiği TFMM kuru madde miktarları göz önünde bulundurularak değerlendirildiğinde, araştırmamızda elde edilen değerlerin bildirilen bazı araştırma sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Kuşburnu ve alıç meyvesinin TFMM ve DPPH[•] karşılaştırılmasında, kuşburnu daha yüksek değerlere sahiptir. Her iki meyvede yaş bazlı değerler düşük görünmekte, ancak kuru madde içeriğine göre değerlendirildiğinde uygunluk göstermektedir.

Tablo 5. Kuşburnu ve alıç meyvelerinin fenolik bileşik kompozisyonlarının karşılaştırılması

FENOLİK BİLEŞİKLER	KUŞBURNU Ör- neklerin Medyan Değerleri	ALİÇ Örneklerin Medyan Değerleri	Asymp. Sig (2 tailed)
(-)-Kateşin gallat	5.50	3.50	0.248
(-)-Kateşin	2.50	6.50	0.021
(-)-Epigallokateşin gallat	4.00	5.00	0.317
(-)-Epigallokateşin	2.50	6.50	0.014
(-)-Gallokateşin gallat	4.50	4.50	1.000
Klorojenik asit	3.25	5.75	0.149
Epikateşin	4.50	4.50	1.000
Gallik asit	3.50	5.50	0.248
Kaempferol	4.50	4.50	1.000
Kerasiyanin klorit	4.50	4.50	1.000
Prosiyanidin B ₂	5.75	3.25	0.149
Protokateşuik asit	2.75	6.25	0.043
Kuersetin-3glukozit	2.50	6.50	0.021
Rutin	3.00	6.00	0.083

*Asymp. Sig (2 tailed) <0.05 olan parametreler için gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık vardır ($p<0.05$)

Kuşburnu meyvesinde kateşin gallat, kateşin, klorojenik asit, gallik asit, prosiyanidin B₂, protokateşuik asit, kuersetin-3-glukozit ve rutin fenolik bileşiklerinin varlığının yanı sıra prosiyanidin B₂ ve kateşinin meyvedeki temel fenolikler olduğu ortaya konmuştur. Gerek kuşburnu meyvesinde yapılan diğer çalışmalar gerekse farklı cinsteki diğer kırmızı meyveler ile karşılaştırıldığında kateşin ve prosiyanidin B₂ fenolik bileşik miktarının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Alıç meyvesinin fenolik profili incelendiğinde yapısında kateşin gallat, kateşin, epigallokateşin, klorojenik asit, gallik asit, prosiyanidin B₂, protokateşuik asit, kuersetin-3-glukozit ve rutin fenolik bileşenlerinin varlığına rastlanılmıştır. Tablo 5'te görüldüğü gibi alıç ve kuşburnu örnekleri karşılaştırıldığında kateşin, epigallokateşin, protokateşuik asit, kuersetin-3 glukozit ve rutin fenolik bileşenleri açısından farklılık görülürken diğer

bileşenler arasında benzerlik olduğu görülmüştür. Alıç meyvesi kuşburnu meyvesine göre daha yüksek kateşin, epigallokateşin, protokateşuik asit ve kuersetin-3-glukozit fenolik bileşiklerince de daha zengin olduğu sonucuna varılmıştır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma Tunceli yöresindeki kuşburnu ve alıç meyvelerinin özelliklerini ortaya koyarak literatüre katkı sağlamıştır. Çalışmada Tunceli ve Pertek, Mazgirt, Hozat ilçelerinden toplanan yabani kuşburnu ve alıç meyvelerinde bazı fizikokimyasal özellikleri, TFMM, antioksidan aktiviteleri ve fenolik bileşik kompozisyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kuşburnu meyvesi alıç meyvesine göre daha yüksek miktarlarda TFMM'na sahip olduğu görülmektedir. Antioksidan madde miktarı askorbik asit eşdeğeri olarak kuşburnu meyvesinde daha yüksek olduğu görülmüştür. Fenolik bileşen kompozisyonu açısından değerlendirildiğinde kuşburnu ile alıç meyveleri arasında istatistiksel olarak kateşin, epigallokateşin, kuersetin-3-glukozit, rutin, protokateşik asit miktarları arasında önemli bir fark olduğu belirlenmiştir. Kateşin miktarı açısından incelendiğinde alıç meyvesinin (154.75-117.1 mg kg⁻¹), kuşburnu meyvesine göre (11.55-19.24 mg kg⁻¹) daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tüm bu sonuçların ışığında antioksidan özellikleri açısından son derece ümitvar olarak değerlendirilen her iki yabani meyvenin de kültürel üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve verimlerinin artırılması kaydıyla fonksiyonel niteliği oldukça yüksek meyveler arasına girebilecekleri ve çeşitli yeni gıda ürünlerine işlenerek tüketiminin artabileceği düşünülmektedir. Ülkemizin hemen hemen her bölgesinde kendiliğinden yetişebilen bu meyvelerin, gıda sanayi ve ülke ekonomisine büyük katkılar sağlayabileceği fikrine varılmıştır. Tüketiminin artırılması ile birlikte insan sağlığına etkili ve faydalı olabilecek olan bu meyvelerin değerlendirilme alanlarının genişletilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu makale birinci yazarın yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Bu çalışma Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje no. YLTUB016-02

Çıkar Çatışması

Yazar(lar) bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazar(lar) bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Referanslar

- [1] Ames, B.N., Shigenaga, M.K., Hagen, M.T. (1993). Oxidants, antioxidants and the degenerative diseases of aging. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 90, 7915-22.
- [2] Kadiiska, M.B., Gladen, B.C., Baird, D., Graham, L., Parker, C. and Ames, B. (2005). Biomarkers of oxidative stress study III. Effects of the nonsteroidal antiinflammatory agents indomethacin and meclofenamic acid on measurements of oxidative products of lipids in CCl₄ poisoning. *Free Rad. Bio. Med.*, 38:711-718.
- [3] Pellegrini, N., Miglio, C., Del Rio, D. (2009). Effect of domestic cooking methods on the total antioxidant capacity of vegetables. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 60 (Suppl 2):12-22.
- [4] El, S.N. ve Karakaya, S. (2003). Bazı Bitkisel Gıdaların Antioksidan Aktivitelerinin Saptanması. *3. Gıda Mühendisliği Kongresi*, Ankara, 2-4 Ekim.

- [5] Li Y., Zhang JJ., Xu DP., Zhou T., Zhou Y., Li S., Li HB. (2016). Bioactivities and health benefits of wild fruits. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(8), 1258.
- [6] Kökosmanlı, M., Keleş, F. (2000). Erzurum’da yetiştirilen kıvılcık meyvesinin marmelat ve pulpa işlenerek değerlendirilmesi. *Gıda* 25(4), 289-298.
- [7] Çalışkan, O., Gündüz, K., & Bayazıt, S. (2018). Sarı Alıç (*Crataegus azarolus* L.) Genotipinin Morfolojik, Biyolojik ve Meyve Kalite Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 35(Ek Sayı), 69-74. <https://doi.org/10.13002/jafag4504>
- [8] Chang, Q. (2005). Comparison of the Pharmacokinetics of Hawthorn Phenolics In Extract versus individual pure compound. *Journal Clinical Pharmacol*, Jan; 45(1),106-12. doi: 10.1177/0091270004270500.
- [9] Bruneton, J. (1999) *Pharmacognosy, Phytochemistry, Medicinal Plants*. Lavoisier Technique & Documentation, Paris. (In French)
- [10] Demir, F. and Özcan, M. (2001). Chemical and technological properties of rose (*Rosa canina* L.) fruits grown wild in Turkey. *Journal of Food Engineering*, 47 (4): 333-336.
- [11] Karasakal, A. (2007). Kuşburnu bitkisinde spektrofotometrik yöntemle askorbik asit tayini. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, İstanbul, 81 s.
- [12] AOAC. (1990). Official Method 979.23: Saccharides (major) in corn syrup.
- [13] Cemeroğlu, B. (2010). Gıda analizleri. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, 657.
- [14] Akbulut M., Coklar H. (2015). Effect of Concentration by Boiling at Atmospheric Pressure on Mineral Content of White and Red Grape Juices. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*,
- [15] Sanchez-Moreno, C., Larrauri, J.A., Saura-Calixto, F. (1998). A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(2),270-276.
- [16] Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299,152-178.
- [17] Bayrambaş, K. (2016). Çeşitli gıda sistemlerinin enkapsüle edilmiş karayemiş polifenoller ile zenginleştirilmesi. Tunceli ve Atatürk Üniversitesi, Ortak Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [18] Çimen, M. (2015). Fen ve sağlık bilimleri alanında SPSS uygulamalı veri analizi. Palme Yayıncılık, Tunceli, 314s.
- [19] Can, N., Duraklı-Velioğlu, S., (2017). Tekirdağ’da Satışa Sunulan İhlamur (*Tilia* Spp.) Ve Kuşburnu (*Rosa Canina*) Örneklerinde Aflatoksin Varlığının Araştırılması. *Gıda The Journal of Food* E-Issn 1309-6273, Issn 1300-3070 42 (3): 287-296 doi: 10.15237/gida.GD16087
- [20] Paunović, D., Kalušević, A., Petrović, T., Urošević T., Djinić, D., Nedović, V., Popović-Djordjević J., (2019). Assessment of Chemical and Antioxidant Properties of Fresh and Dried Rosehip (*Rosa canina* L.). *Not Bot Horti Agrobo*, 47(1):108-113. doi:47.15835/nbha47111221
- [21] Özbey, A., Öncül, N., Tokatlı, K., Yıldırım, M., Yıldırım, Z. (2017). Kuşburnu marmelatlarının bazı fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerinin belirlenmesi. *Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4):358-365.

- [22] Güneş, M. (1997). Tokat yöresinde doğal olarak yetişen kuşburnuların (*Rosa spp.*) seleksiyon yoluyla ıslahı ve çelikle çoğaltma imkanları üzerinde bir araştırma. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Van.
- [23] Adıgüzel, S. (2006). Kuşburnu meyvesinin pulpa işlenmesi sırasında bazı bileşim öğelerinin değişimi. O.M.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 46s.
- [24] Yolcu, H. (2010). Kuşburnu pulpu üretiminde antioksidan özelliklerin değişimi. O.M.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 64s.
- [25] Aksu, M., Özdemir, F., Nas, S., (1997). Ön ısıtma uygulanarak elde edilen kuşburnu pulplarından farklı pulp/şeker oranlarında üretilen marmelatların kalite özellikleri. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(1), 243-248.
- [26] Ercişli, S. (2007). Chemical composition of fruits in some rose (*Rosa spp.*) species. Food Chemistry, 104, 1379-1384.
- [27] Egea, I., Sánchez-Bel, P., Romojaro, F., Pretel, M.T. (2010). Six edible wild fruits as potential antioxidant additives or nutritional supplements. Plant Foods Hum Nutr., 65, 121-129.
- [28] Altan, D.D. (2014). Kuşburnu meyvesinin geleneksel yöntemle meyve suyuna işlenmesi aşamalarında antioksidan kapasite değişiminin incelenmesi. N.K.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, 71s.
- [29] Yıldız, H., Nergiz, C., 1996. Bir gıda maddesi olarak kuşburnu. *Kuşburnu Sempozyumu (Bildiriler Kitabı)*, Gümüşhane, 5-6 Eylül, s 309-318.
- [30] Şen, M., Güneş, M. (1996). Tokat yöresinde doğal olarak yetişen kuşburnuların (*rosa spp.*) bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde bir araştırma. *Kuşburnu Sempozyumu*
- [31] Güneş, M., Şen, S.M. (2001). Tokat yöresinde doğal olarak yetişen kuşburnuların (*Rosa Ssp.*) seleksiyon yoluyla ıslahı üzerinde bir araştırma. Bahçe, 30(1-2), 9-16.
- [32] Kazankaya, A., Yılmaz, H., Yılmaz, M. (2001). Adilcevaz yöresinde doğal olarak yetişen kuşburnuların (*rosa spp.*) seleksiyonu. Y.Y.Ü., Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, 11, 29-34.
- [33] Doğan, A., Kazankaya, A., Çelik, F., Uyak, C. (2006). Kuşburnunun halk hekimliğindeki yeri ve bünyesindeki bileşenler açısından yararları. II. *Ulusal Üzümsü Meyveler Sempozyumu*, 14- 16 Eylül, s 47-53.
- [34] Keleş, F., Kökosmanlı, M. (1996). Kuşburnu ve kuşburnu çayında C vitamini. *Kuşburnu Sempozyumu (Bildiriler Kitabı)*, Gümüşhane, 5-6 Eylül, s 245-252.
- [35] Akyüz, N., Coşkun, H., Bakırcı, İ. (1996). Kuşburnu besin değeri ve kullanım alanları. *Kuşburnu Sempozyumu (Bildiriler Kitabı)*, Gümüşhane, 5-6 Eylül, s 271-279.
- [36] Uggl, M., Gao, X., Werlemark, G. (2003). Variation among and within dogrose taxa (*Rosa sect. caninae*) in fruit weight, percentages of fruit flesh and dry matter, and vitamin C content. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Plant Soil Science, 53(3):147-155.
- [37] Ercişli, S., Eşitken A. (2004). Fruit characteristics of native rose hip (*rosa spp.*) selections from the erzurum province of turkey. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 32: 51-53.
- [38] Güleryüz, M., Ercişli, S. (1996). Gümüşhane ilinde yetiştirilen bazı yabani meyve türlerinin besin içeriği bakımından karşılaştırılması. *Kuşburnu Sempozyumu (Bildiriler Kitabı)*, Gümüşhane, 5-6 Eylül, s 301-307.

- [39] Fan, C., Pacier, C., Martirosyan, D.M. (2014). Rose hip (*Rosa canina* L): a functional food perspective. *Functional Foods in Health and Disease*, 4(11):493-509.
- [40] Fattahi, S., Jamei, R., Sarghein, S.H. (2012). Antioxidant and antiradical activities of *Rosa canina* and *Rosa pimpinellifolia* fruits from West Azerbaijan. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 2, 523-529. [49]
- [41] Wenzig, E.M., Widowitz, U., Kunert, O., Chrubasik, S., Bucar, F., Knauder, E., Bauer, R. (2008). Phytochemical composition and in vitro pharmacological activity of two rose hip (*Rosa canina* L.) preparations. *Phytomedicine*, 15, 826-835.
- [42] Dölek, Ü. (2013). Bazı kuşburnu (*rosa* sp.) türlerinde optimal hasat zamanının ve fitokimyasal değişimlerinin belirlenmesi. G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Tokat, 113s.
- [43] Su, L., Yin, J., Charles, D., Zhou, K., Moore, J., Yu, L. (2007). Total phenolic contents, chelating capacities, and radical-scavenging properties of black peppercorn, nutmeg, rosehip, cinnamon and oregano leaf. *Food Chemistry*, 100, 990-997.
- [44] Gao, X., Björk, L., Trajkovski, V., Ugglä, M. (2000). Evaluation of antioxidant activities of rosehip ethanol extracts in different test systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 2021-2027.
- [45] Yi, O., Jovel, E.M., Towers, G.H.N., Wahbe, T.R., Cho, D. (2007). Antioxidant and antimicrobial activities of native *Rosa* sp. from British Columbia, Canada. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 58(3), 178-189.
- [46] Yoo, K.M., Lee, C.H., Lee, H., Moon, B., Lee, C.Y. (2008). Relative antioxidant and cytoprotective activities of common herbs. *Food Chemistry*, 106(3), 929-936.
- [47] Jabłońska-Ryś, E., Zalewska-Korona, M., Kalbarczyk, J. (2009). Antioxidant capacity, ascorbic acid and phenolics content in wild edible fruits. *Journal of Fruit And Ornamental Plant Research*, 17(2), 115-120.
- [48] Ghazghazi, H., G. Miguel, M., Hasnaoui, B., Sebei, H., Ksontini, M., Figueiredo, A.C., Pedro, L.G., Barroso, J.G. (2010). Phenols, essential oils and carotenoids of *Rosa canina* from Tunisia and their antioxidant activities. *African Journal of Biotechnology*, 9(18), 2709-2716.
- [49] Kähkönen, M.P., Hopia, A.I., Vuorela, H.J. Rauha, J.P., Pihlaja, K., Kujala, T.S., Heinonen, M. (1999). Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.*, 47: 3954-3962.
- [50] Özgen, M., Scheerens, J.C. (2006). Bazı kırmızı ve siyah ahududu çeşitlerinin antioksidan kapasitelerinin modifiye edilmiş TEAC yöntemi ile saptanması ve antikanser özelliklerinin tartışılması. II. Üzümsü Meyveler Sempozyumu, Tokat.
- [51] Özgen, M., Serçe, S., Kaya, K. (2009). Phytochemical and antioxidant properties of anthocyanin-rich *Morus Nigra* and *Morus Rubra* fruits. *Scientia horticulturae*, Volume:119, Issue:3, 3 February.
- [52] Orhan, D.D., Özlük, Ö., Coşkun, S.H. (2012). Antioxidant capacities, ascorbic acid and total phenol contents of the plants sold as rosehip in Turkey. *FABAD J. Pharm. Sci*, 37:161-167.
- [53] Nadpal, J.D., Lesjak, M.M., Šibul, F.S., Anackov, G.T., Cetojevic-Simin, D.D., Neda M. Mimica-Dukic, N.M., Beara, I.N. (2016). Comparative study of biological activities and phytochemical

- composition of two rose hips and their preserves: *Rosa canina* L. and *Rosa arvensis* Huds. Food Chemistry, 192: 907–914.
- [54] Ercişli, S., Yanar, M., Şengül, M., Yıldız, H., Topdas, E.F., Taskin, T., Zengin, Y., Yılmaz, K.U. (2015). Physico-chemical and biological activity of hawthorn (*Crataegus* spp. L.) fruits in Turkey. *Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus*, 14(1), 83-93. 63
- [55] Hvattum, E. (2002). Determination of phenolic compounds in rosehip (*Rosa canina*) using liquid chromatography coupled to electrospray ionisation tandem mass spectrometry and diode-array detection. *Rapid Commun. Mass Spectrom*, 16, 655-662.
- [56] Özcan, M., Haciseferogulları, H., Marakoglu, T., Arslan, D. (2005). Hawthorn (*Crataegus* spp.) fruit: some physical and chemical properties. *Journal of Food Engineering*, 69, 409- 415.
- [57] Emrem, Ö. (2008). Alıç meyvesinden (*Crataegus oxyacantha*) pekmez ve marmelat üretimi. Afyon Kocatepe Üni., Fen Bilimleri Enst., Gıda Müh. A.B.D, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- [58] Gazioğlu, R.İ. (2000). Van yöresinde yetişen alıçlar., Y.Y.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van, 68s.
- [59] Karadeniz, T., Kalkısım, Ö. (1996). Edremit ve Gevaş ilçelerinde yetişen Alıç (*Crataegus azarolus* L.) tiplerinin meyve özellikleri ve ümitvar tiplerin seçimi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 6 (1), 27–33.
- [60] Sorkun, E. (2012). Farklı renkteki alıç meyvelerinin pomolojik ve fitokimyasal özelliklerinin belirlenmesi. G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tokat, 47s.
- [61] Balta, M.F., Karakaya, O., Kaptan-Ekici, G. (2015). Çorum’da yetişen alıçların (*Crataegus* spp.) fiziksel özellikleri. *Ordu Üni. Bil. Tek. Derg.*, 5(2):35-41.
- [62] Çoklar, H., Akbulut, M. (2016). Olgunlaşma ile alıç (*Crataegus orientalis*) meyvesinin antioksidan aktivite, toplam fenolik madde ve fenolik profilindeki değişim. *Meyve bilimi/Fruit Science*, 3(2): 30-37
- [63] Novruzov, E.N. (1988). Chemical composition of fruit and berries of plants growing wild in Azerbaijan. *Hort. Abst.*, 58(7): 4028.
- [64] Çalışkan, O., Gündüz, K., Serçe, S., Toplu, C., Kamiloğlu, Ö., Şengül, M., Ercişli, S. (2012). Phytochemical characterization of several hawthorn (*Crataegus* spp.) species sampled from the Eastern Mediterranean region of Turkey. *Pharmacognosy Magazine*, 8(29), 1-16.
- [65] Vatansever, H. (2016). Alıç (*Crataegus tanacetifolia*, *Crataegus monogyna*) meyvesi çeşitlerinden üretilen marmelat ve reçellerin bazı özelliklerinin belirlenmesi. A.K.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon, 106s.
- [66] Keser, S. (2012). Civanperçemi (*Achillea millefolium*), alıç (*Crataegus monogyna*) ve böğürtlen (*Rubus discolor*)’in toplam antioksidan aktivitelerinin belirlenmesi ve oksidatif stres oluşturulmuş ratlarda bazı biyokimyasal parametreler üzerine etkilerinin incelenmesi. x F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 211s.
- [67] Chang, Q., Zhu, M., Zuo, Z., Chow, M., Ho, W.K.K. (2001). High-performance liquid chromatographic method for simultaneous determination of Hawthorn active components in rat plasma. *Journal of Chromatography B.*, 760, 227-235.

-
- [68] Zhang, Z., Chang, Q., Zhu, M., Huang, Y., H.O. W.K.K., Chen, Z.Y. (2001). Characterization of antioxidants present in hawthorn fruits. *J. Nutr. Biochem.*, 12, 144-152.
- [69] Zuo, Z., Zhang, L., Zhou, L., Chang, Q. (2006). Intestinal absorption of hawthorn flavonoids—in vitro, in situ and in vivo correlations. *Life Sciences* 79, 2455-2462.
- [70] Bilia, A.R., Eterno, F., Bergonzi, M.C., Mazzi, G., Vincieri, F.F. (2007). Evaluation of the content and stability of the constituents of mother tinctures and tinctures: The case of *Crataegus oxyacantha* L. and *Hieracium pilosella* L. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 44, 70-78.

Araştırma Makalesi

Geri Dönüştürülmüş Yer Tutucu Kullanımıyla Sürdürülebilir Titanyum Köpük Üretimi Süreci

Betül Demir¹  ve Aysun Ayday^{2,*} 

Gönderim: 17.04.2025

Kabul: 03.06.2025

¹Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye;
demirbt146@gmail.com

²Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye;
aayday@sakarya.edu.tr

*Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışmada, seramik parlatma atığı (SPA) yer tutucu olarak kullanılarak elektrik akım destekli sinterleme (ECAS) yöntemiyle titanyum köpükler üretilmiştir. Endüstriyel kaynaklı SPA, Seramik Fabrikası'ndan temin edilmiş ve toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça %2, %5, %8 ve %10 oranlarında Ti tozlarına ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, bilyalı değirmende homojenize edildikten sonra preslenerek ECAS yöntemiyle yaklaşık 1300 °C'de sinterlenmiştir. Mikro yapısal analizler, artan SPA içeriği ile birlikte gözenek morfolojisinin daha homojen hale geldiğini, açık gözeneklilik oranının arttığını ve köpük yapının kontrollü şekilde şekillendirilebildiğini ortaya koymuştur. Özellikle, SPA içeriğinde bulunan SiC'in oksidatif bozunmasıyla açığa çıkan gazların, gözenek oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. %10 SPA katkısı ile elde edilen %34,4 porozite, hedeflenen düşük yoğunluklu yapıların üretiminde etkili sonuçlar sunmuştur. Bu kapsamda, SPA'nın hem fonksiyonel köpük üretiminde hem de atık yönetimi açısından sürdürülebilir bir yer tutucu alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: titanyum köpük, seramik parlatma atığı, sinterleme, porozite.

Research Article

Sustainable Production of Titanium Foams Using Recycled Space Holder Materials

Abstract: In this study, titanium foams were produced using ceramic polishing waste (CPW) as a space holder through the Electric Current Assisted Sintering (ECAS) method. Industrially sourced CPW was obtained from Ceramic Factory and added to titanium powders at weight ratios of 2%, 5%, 8%, and 10% via conventional powder metallurgy techniques. The prepared mixtures were homogenized in a ball mill, pressed, and sintered at approximately 1300 °C using the ECAS process. Microstructural analyses revealed that increasing CPW content led to more homogeneous pore morphology, a higher open porosity ratio, and a more controlled foam structure. In particular, the oxidative decomposition of SiC within the CPW was found to promote pore formation through the release of CO and CO₂ gases. A porosity of 34.4% was achieved with 10% CPW addition, demonstrating effective results for the production of low-density structures. Consequently, CPW was concluded to be a sustainable space holder alternative in terms of both functional foam production and waste management.

Keywords: titanium foam, ceramic polishing waste, sintering, porosity.

1. Giriş

Mühendislik malzemeleri, teknik, ekonomik, çevresel ve görsel gereksinimler doğrultusunda zaman zaman yetersiz kalmakta; bu durum ise yeni nesil üretim yöntemleri ile yeni nesil malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [1,2]. Bu bağlamda, metal köpükler gelişime son derece açık, önemli malzeme gruplarından biri olarak öne çıkmaktadır. Metal köpük, büyük bir gaz dolu gözenek fraksiyonu içeren katı bir metalden oluşan gözenekli bir yapı olarak tanımlanabilir. Tipik olarak, toplam hacmin %40-95'i boşluklardan veya gözeneklerden oluşmaktadır. Bu gözenekler kapalı veya açık (birbirine bağlı bir ağ) hücreli olmak üzere iki farklı şekilde olabilir. İlk olarak, 1940'lı yıllarda Benjamin Sosnick, alüminyum köpükleştirme denemesi ile literatüre girmiştir. 1950'lerde popüler olan bu araştırmalar da, sonra ki senelerde kısa bir durgunluk dönemi yaşanmıştır [3–6]. Günümüzde ise bu malzemelere olan ilgi yeniden artış göstermiştir. Bu yeniden yükselişin nedeni, o zamana kadar sonsuz gibi görünen enerji kaynaklarının aslında sınırlı olduğunun anlaşılmasıydı. Çünkü kara taşımacılığı, deniz taşımacılığı ve hava taşımacılığı sektörlerinde, araçların giderek daha kapsamlı ve büyük hale gelmesi, enerji verimliliği ve ağırlık sorunlarını ön plana çıkarmaya başladı. Metal köpükleri, özellikle hafiflik, dayanıklılık ve termal iletkenlik gibi olumlu özellikleri onları birçok alanda cazip hale getirmektedir [1,7,8].

Alüminyum ve çelik köpükler yaygın kullanılan metal köpük türleri olsa da, nikel, magnezyum, bakır ve titanyum son zamanlar önemli bir yer almıştır [2,8–16]. Bu çalışmada toz metalürjisi (TM) yöntemi kullanılarak titanyum esaslı köpük üretimi sürecine değinilecektir. Tablo 1'de Ti köpüklerin çeşitli kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 1. *Ti köpük uygulama alanları ve Fonksiyonları* [2,7,16–21]

Uygulama Alanı	Fonksiyonel Açıklama
Biyomedikal İmplantlar	Gözenekli yapısı sayesinde kemiklerle iyi entegrasyon sağlar, vücut tarafından biyouyumlu şekilde kabul edilebilir.
Ortopedik Protezler	Düşük yoğunluğu ve biyouyumluluğu sayesinde, uzun süreli kullanım için idealdir.
Isı Eşanjörleri	Yüksek yüzey alanı sayesinde ısı transferini artırır ve verimli ısı değişimi sağlar.
Filtreleme Sistemleri	Gözenekli yapısı, gaz ve sıvı filtrasyonunda yüksek verimlilik sunar.
Otomotiv Sektörü	Enerji emici özelliği sayesinde çarpışma anında darbe sönümleyici olarak görev yapar.
Havacılık ve Uzay Endüstrisi	Hafiflik ve yüksek mukavemeti sayesinde yakıt verimliliğini artırır.
Ses ve Titreşim Sönümleme	Gözenekli yapı sayesinde ses yalıtımı ve titreşim sönümleme sağlar.
Pil ve Yakıt Hücresi Elektrotları	Yüksek yüzey alanı, reaksiyon alanını artırarak elektrokimyasal performansı iyileştirir.
Dekoratif ve Mimari Uygulamalar	Estetik görünüm ve korozyon direnci sayesinde iç ve dış mekân tasarımlarında kullanılabilirliğini artırır.

Toz metalurjisi ile metalik köpük üretimi arasında bazı küçük farklılıklar bulunsa da, genel süreç benzerdir. Bu süreç; metal tozlarına köpürtücü madde veya yer tutucu ilave edilerek, bu karışımın homojen bir şekilde karıştırılması, ardından oda sıcaklığında hidrolik presle kompakt hale getirilmesi ve köpükleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilir [4,22–24].

Kullanılan yer tutucular, düşük sıcaklıklarda sistemden uzaklaştırılabilen ve minimal kirlilik yaratan katı malzemelerdir. Bu yöntemde, yer tutucu ile titanyum tozu karıştırılır, karışım preslenir ve ısıtılma işlemi uygulanarak yer tutucu öncelikle sistemden uzaklaştırılır. Ardından sinterleme işlemi ile titanyum köpüğü elde edilir [1,3,6,16,17,25–27]. Bu metodun en büyük zorluğu, parçalar üzerindeki organik veya inorganik yer tutucu malzemenin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasıdır. İstenilen gözenek boyutu, kullanılan yer tutucu taneciklerinin boyutuna göre ayarlanabilmektedir. Genellikle yer tutucu olarak, 200 °C’de uzaklaştırılabilen üre veya amonyum hidrojen karbonat (AHK) gibi organik maddeler, seramik bazlı yer tutucular, polistiren gibi ya da daha düşük sıcaklıklarda uzaklaştırılabilen magnezyum gibi malzemeler tercih edilmektedir. Yer tutucuların tam olarak sistemden uzaklaştırılamaması, titanyum veya diğer malzemelerde istenmeyen kirliliğe yol açabilir [16,22,23,27–31]. Bu, özellikle biyomedikal veya yüksek performanslı malzemeler için sorun teşkil edebilir. Farklı uygulamalarda örneğin, biyomedikal ile havacılık da kullanılan malzemeler arasında büyük farklılıklar bulunabilir, bu da seçilecek yer tutucunun tipini ve özelliklerini kısıtlar. Yer tutucuların düzgün bir şekilde dağılması veya bazı bölgelere yeterince yerleşmemesi, son üründe heterojen bir yapıya yol açabilir. O sebeple köpük üretiminde yer tutucular oldukça önemli bir rol oynarlar [32–34]. Bu çalışmada, kullanılan yer tutucu tozlar olarak seramik parlatma atığı (SPA) materyali kullanılarak, titanyum köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda kullanılacak olan seramik atık toz Kütahya Seranit Fabrikasından temin edilmiştir. Seramik parlatma atık (SPA) materyallerin yer tutucu olarak kullanımı ile geri kazanımı çevresel sürdürülebilirliği artırmayı da hedeflemektedir.

Sinterleme işlemi, bu çalışmada geleneksel yöntemlerden farklı Elektrik Akım Destekli Sinterleme (ECAS), yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem malzeme üretiminde daha hızlı ve verimli sinterleme sağlamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Elektrik akımının doğrudan malzeme üzerine uygulanması, ısının hızlı ve homojen bir şekilde yayılmasına olanak sağlar. Titanyum köpük üretimi için, bu teknik, titanyum tozu veya parçacıklarının belirli bir sıcaklık ve basınç altında sinterlenmesiyle üretilir. ECAS yöntemi, geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla çeşitli önemli avantajlar sunar. Elektrik akımı, tozlar arasındaki serbest elektronların hareketini teşvik ederek Joule ısısı oluşturur; bu da ısının tüm malzeme boyunca homojen biçimde dağılmasına neden olur. Böylece malzeme çok daha kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşabilir. Böylece, sinterleme süresi önemli ölçüde kısalmış ve daha düşük enerji tüketimi sağlanır [20,35–37].

2. Deneysel Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, piyasadan temin edilen Ticari Ti tozu ve Kütahya Seranit Fabrikasından temin edilmiş seramik parlatma atık tozu kullanılmıştır. Ti tozunun genel özellikleri Tablo 2’de sıralanmıştır. Tozlarından geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanmış ve elektrik akımı destekli sinterleme yöntemi ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. Yer tutucu ağırlıkça %2, %5, %8 ve %10 parlatma atığı katkılı

tozlar, homojen karışım eldesi için bilyalı değirmene 1:20 oranında (ağırlıkça toz/bilye) besleme yapılarak kuru ortamda 250 RPM hızla 2 saat süre ile karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan toz karışımları, 15 mm çelik kalıp içerisine yerleştirilip 50 MPa basınç altında hidrolik pesle preslenerek pelet haline getirilmiştir. ECAS yöntemiyle gerçekleştirilen üretim sürecinde, numuneler 900 ± 50 A akım değerlerinde, kalıp sıcaklığı 1300°C 'de sabitlenecek şekilde açık atmosferde sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her bir üretim için sinterleme süresi 15 dakika olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Ticari Ti Tozunun genel özellikleri

Atomik Özellikler		Fiziksel Özellikler	
<i>Atom Numarası</i>	22	<i>Yoğunluk (g/cm³) 20°C</i>	4.5
<i>Atom Çapı [nm]</i>	0,147		
<i>Kristal yapı</i>	HSP	<i>Ergime Sıcaklığı (°C)</i>	1660

Üretilen numuneler metalografik olarak hazırlanarak yüzey karakterizasyonları gerçekleştirilecektir. Bakalite alınan numuneler, standart numune hazırlama yöntemlerine uygun olarak sırasıyla 60, 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik SiC zımpara ile zımpara kademelerinden geçirilmiştir ve vakumlu etüvde kurutma için 24 saat bekletilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen Ti köpük numunelerinin morfolojilerinin incelenmesinde JOEL JSM-6600 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analiz test cihazları ile incelenmiştir. Rigaku marka X-Işını difraktometresi faz analizleri için kullanılmıştır. Cihaz 25 kV güç değerlerinde ve numune yüzeyinin $0,2^\circ$ 'lik artışlarla $0-90^\circ$ arasında taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. Cu K α tüpü kullanılmıştır.

Elde edilen Ti köpük (%10), 0,001 mg hassasiyetine sahip Radwag marka hassas terazi kullanılarak tartımları yapılmıştır. Öncelikle, numunelerin etüvde beklettikten sonra ki kuru ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra, numunenin açık gözeneklerinin su ile tamamen dolmasını sağlamak amacıyla, numune belirli bir süre saf su içerisinde bekletilerek doyurulmuştur. Bu işlem sonrasında yüzeyde biriken fazla su dikkatlice silinmiş ve numunenin doymuş ağırlığı ölçülmüştür. Ardından, numune tamamen suya batırılarak suda ki ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen bu üç ölçüm değeri kullanılarak numunenin hacmi ve buna bağlı olarak hacimsel yoğunluğu hesaplanmıştır. Numunelerin yoğunlukları, Arşimet Prensibi esas alınarak denklem 2.1 'de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır [38].

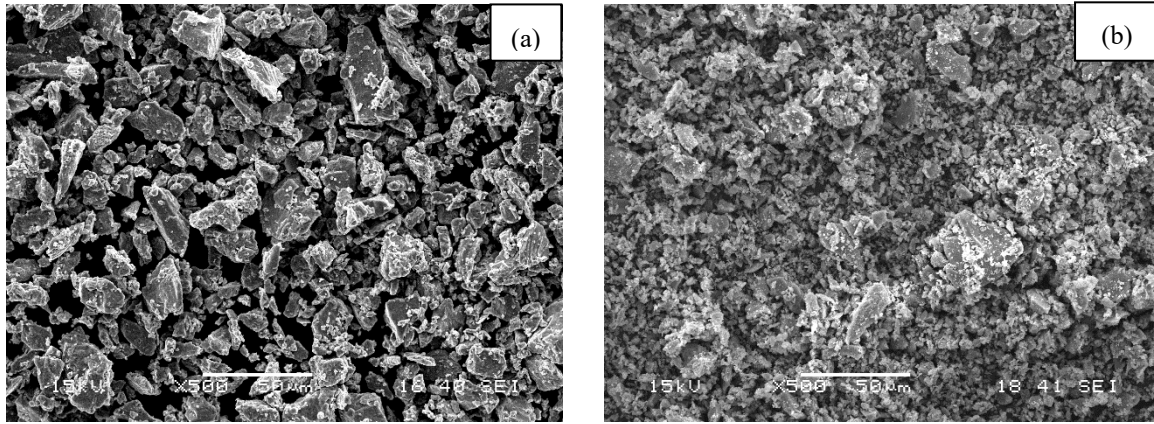
$$\rho = \frac{m^*}{m' - m_a} \times \rho_{su} \quad (2.1)$$

Burada:

- ρ : Köpüğün yoğunluğu (g/cm³)
- m^* : Köpüğün havadaki kuru ağırlığı (g)
- m' : Köpüğün suya doymuş ağırlığı (g)
- m_a : Köpüğün su içerisindeki askıdaki ağırlığı (g)
- ρ_{su} : Saf suyun yoğunluğu (~ 1 g/cm³)

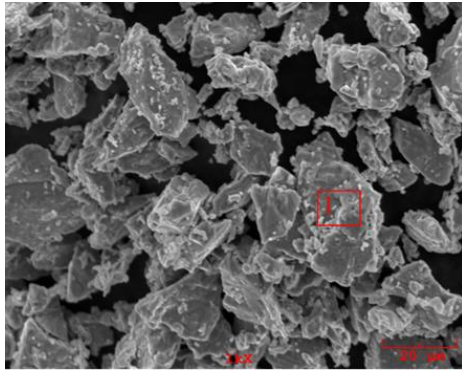
3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışmalar

Şekil 1’de SEM görüntüleri verilen toz malzemeler, metal köpük üretiminde kullanılan metalik tozu ve yer tutucu tozu temsil etmektedir. Titanyum (Ti) metal tozu, keskin kenarlı, düzensiz ve açısallık morfolojisiyle yüksek gözeneklilik sağlamak amacıyla metal matrisi oluşturan ana fazı bileşenidir. Seramik parlatma atığı tozuna ait toz ise, daha ince, yuvarlak ve yoğun bir yapıya sahiptir. Bu toz, üretim sürecinde yer tutucu olarak kullanılarak köpük yapının gözenekli formunun elde edilmesini ve köpükleştirici görevi görecektir. Her iki tozun morfolojik özellikleri, üretilecek metal köpüğün gözenek yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [19,33]. Tozların morfolojik özellikleri, sinterleme sürecinde yoğunlaşma ve gözenek yapısının oluşumu üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Keskin kenarlı ve düzensiz şekilli Ti tozları, sinterleme sırasında daha düşük akışkanlığa sahip olmalarına rağmen, parçacıklar arası temas noktalarının fazla olması nedeniyle boyun oluşumu ve difüzyon mekanizmaları daha etkin şekilde gerçekleşebilir. Bu durum, sinterleme sonrası mekanik dayanımı artırabilir. Öte yandan, seramik parlatma atığı gibi daha ince ve yuvarlak morfolojili tozlar, daha homojen bir şekilde dağılarak yer tutucu görevini etkili şekilde yerine getirerek ve sinterleme sırasında bu partiküllerin uzaklaştırılmasıyla gözenek oluşumu sağlanır. Bu nedenle, her iki tozun morfolojik özellikleri sinterleme sonrası elde edilen metal köpüğün gözenek boyutu, dağılımı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.



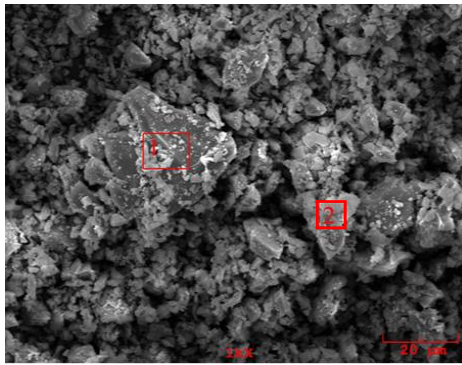
Şekil 1. Tozların SEM Görüntüleri (a) Ti Tozu (b) Seramik Parlatma Atık Tozu

Şekil 2’ de saf Ti tozu ve SPA için EDS analizleri verilmiştir. Ti içinde herhangi bir katkı olmadığı sadece Ti elementinden oluştuğu görülürken, EDS analizi sonucunda, seramik parlatma atığının bileşimini değerlendirmek amacıyla yapılan incelemede, elementel olarak alüminyum (Al), silisyum (Si), karbon (C), oksijen (O) ve sodyum (Na) tespit edilmiştir.



(a)

Elt.	Rady.	Şiddet (c/s)	Toplam	Birim	
Ti	Ka	902.45	100.0	wt.%	100%

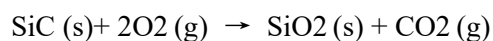
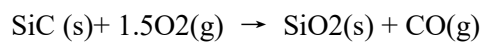


(b)

Elt.	Rady.	şiddet (c/s)	Toplam	Birim	
C	Ka	0.54	0.559	wt. %	1
		0.99	1.335		2
O	Ka	151.47	39.093	wt. %	1
		115.57	39.427		2
Na	Ka	41.00	4.744	wt. %	1
		21.28	3.221		2
Al	Ka	155.20	13.991	wt. %	1
		109.11	12.615		2
Si	Ka	415.37	41.613	wt. %	1
		340.34	43.402		2

Şekil 2. SEM görüntüleri ve EDS analizleri (a) Ti Tozu (b) Seramik Parlatma Atığı

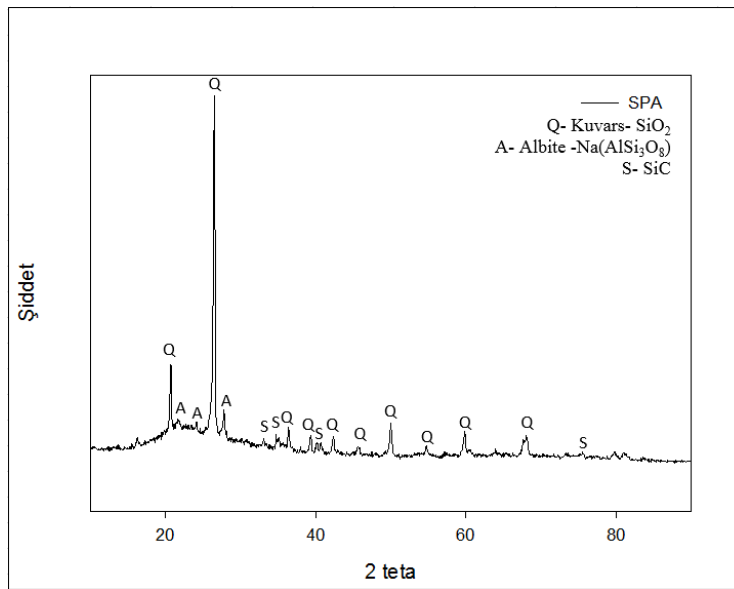
Al ve Si elementleri, tipik olarak seramik matrisin temel bileşenleri olan alüminyum silikat yapılarının göstergesi iken; C elementi, aşındırıcı partiküller (alümina, silisyum karbür, elmas tozu gibi) ve kimyasal katkı maddelerinden kaynaklı olabilir. Oksijenin varlığı, metal oksit fazlarını işaret ederken, Na elementi ise seramik hammaddesi ya da katkı maddesi olarak kullanılan bazı bileşiklerin bir parçası olabilir. Elde edilen elementel seramik kompozisyonları ile benzerdir. Bununla birlikte, seramik bünyelerde kullanılan seramik parlatma atıkları, SiC içeriği tespit edilmiştir (Şekil 4). SiC'ün oksidasyon reaksiyonunda, yüksek sıcaklıkta SiC, oksijenle tepkimeye girerek silika (SiO₂) ve karbon monoksit (CO) veya karbon dioksit (CO₂) oluşturur. Bu gazlar, özellikle sıvı fazda hapsolür ve kabarcıklar oluşturur. Bu süreç köpükleşmeye yol açar.



Metalik toz içerisinde ilave edilen parlatma atığının sinterleme sonrası reaksiyonu aşağıda verilmiştir.

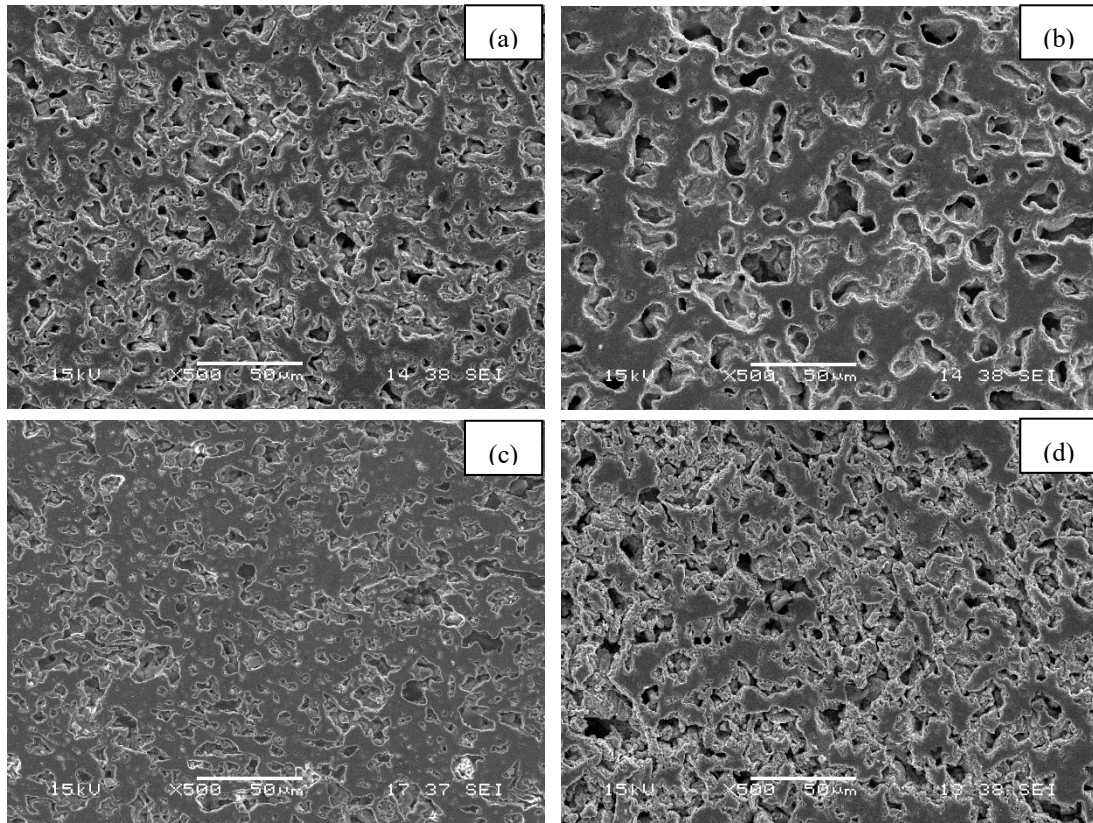
$$\text{Ti (s)} + \text{SiC (SPA)} \rightarrow [\text{ECAS – Sinterleme Prosesi}] \rightarrow \text{Gözenekli Ti} + \text{CO/CO}_2$$

Seramik parlatma atığının XRD (X-Ray Diffraksiyon) analizi Şekil 3 de verilmiştir. Alınan analize göre atıktaki kuvars (SiO_2), albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ve silisyum karbür (SiC) fazlarının tespit edilmiştir. Kuvars ve albit, feldispat grubu mineraller olarak doğal kökenli bileşenler olup, parlatma işlemi sırasında işlenen seramik malzemelerin yapısal içeriğini yansıtabilir. Silisyum karbür ise yüksek sertlik ve aşındırıcı özellikleri nedeniyle parlatma sürecinde katkı malzemesi olarak kullanıldığına işaret etmektedir. Bu fazların varlığı, atığın yeniden kullanım potansiyelini değerlendirmede önemli olup, özellikle yapı malzemeleri, seramik gibi alanlarda ikincil hammadde olarak değerlendirilebileceğini de ortaya koymaktadır [38].



Şekil 3. Seramik parlatma atığının XRD analiz

Şekil 4’de toz elektrik akım sinterleme yöntemiyle elde edilen ağırlıkça %2, %5, %8 ve % 10 parlatma atığı katkılı Ti köpüklerin SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir. Artan yüzde ile köpük, açık gözeneklere sahip daha homojen bir yapıya dönmüştür. Köpükteki gözenek morfolojisinin, küresel formda olmadığı geometrik formlarda olduğu görülmektedir. İlave edilen parlatma atığı morfolojisi ile benzer bir yapı sergilemektedir. Köpük gözenek yapısı yer tutucu parçacıkların seçilerek kolayca kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Farklı boyut aralıklarında SPA parçacıkları kullanılarak köpükte özel olarak tasarlanmış bir gözenek boyutu dağılımı elde etmek de mümkündür. Gözeneklilik artan SPA ile %30 ile %40 arasında olduğu ön görülmekte ve bu nedenle, boşluk tutucu yöntemiyle %50 ile %80 arasında ayarlanabilir bir gözeneklilik elde edilebilirliğin mümkün olacağı sonucuna varılmıştır. %2, %5, %8 katkılı numunelerde porozite oluşumu numune genelinde olmamıştır. İlave edilen atık oranının yeterli olmadığı görüşüne varılmıştır.



Şekil 4. ECAS sonrası üretilen Ti köpük numunelerin SEM görüntüleri (a) %2 SPA katkılı, (b) %5 SPA katkılı, (c) %8 SPA katkılı, (d) %10 SPA katkılı

%10 oranında Seramik Parlatma Atığı (SPA) katkısı içeren titanyum esaslı köpük malzemede elde edilen 2,95 g/cm³ yoğunluk değeri, yaklaşık 4,5 g/cm³ [19] yoğunluğa sahip kompakt saf titanyum ile karşılaştırıldığında, malzemenin oldukça yüksek bir gözeneklilik oranına sahip olduğunu göstermektedir. Bu değer, teorik yoğunluğun yalnızca küçük bir yüzdesinin korunabildiğini ve yapının büyük oranda açık ve/veya kapalı gözeneklerden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu düşük yoğunluk, köpükleşme mekanizmasının etkin bir şekilde gerçekleştiğini ve katkı malzemesi olan SPA'nın, gaz oluşumu ya da eriyik faz viskozitesi üzerinde etkili olarak gözenek oluşumunu teşvik ettiğini göstermektedir. SPA'nın bünyesinde SiC'in oksidasyonu sonucu oluşan CO/CO₂ gazlarının köpük yapının gelişimine katkı sağlamasına olanak tanımaktadır. SPA katkısının aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesine katkı sağlaması, bu yaklaşımı sadece malzeme mühendisliği açısından değil, aynı zamanda döngüsel ekonomi bağlamında da değerli kılmaktadır. Sonuç olarak, %10 SPA katkısı ile üretilen titanyum esaslı köpüklerde gözlenen 2,95 g/cm³ yoğunluk, hem malzemenin fonksiyonel hafiflik özelliklerine işaret etmekte hem de katkı malzemesinin köpükleşme davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Çalışmada, seramik parlatma atığı tozlarının kullanımı ile metal köpük üretimi hedeflenmiştir. Hedeflenen gözenek yapısı mikro yapısal bütünlüğü ile fonksiyonel özellikleri için dengeli bir optimizasyon sağlanmıştır.

- ✓ Seramik parlatma atığı (SPA) katkı oranının artırılmasıyla birlikte, titanyum köpüklerin gözenek yapısında belirgin bir homojenleşme sağlanmış, açık gözenek oranı artmış gözenek morfolojisinin, yer tutucu partikül formuyla uyumlu şekilde, kontrollü biçimde şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, sinterleme süreci sırasında SPA içeriğinde yer alan SiC'in oksidatif bozunması sonucu oluşan CO ve CO₂ gazlarının titanyum matris içerisinde hapsediği ve bunun da gözenek oluşumunu tetikleyerek köpük yapının gelişiminde doğrudan etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- ✓ Artan oranlarda kullanılan seramik parlatma atığının, Ti köpük üretim sürecinde gözenek oluşumunu etkin biçimde desteklediği, bu atığın titanyum esaslı gözenekli malzemelerde sürdürülebilir ve etkili bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.
- ✓ %10 SPA katkılı köpükte elde edilen 2,95 g/cm³ yoğunluk, saf Ti'nin teorik yoğunluğu olan 4,50 g/cm³ ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %34,4 oranında bir gözeneklilik elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuç, hedeflenen düşük yoğunluklu yapıların üretiminde SPA katkısının etkili bir köpükleştirici unsur olarak işlev gördüğünü sayısal olarak da ortaya koymaktadır. Bu bulgular, SPA katkısının yalnızca gözeneklilik oranını artırmakla kalmayıp aynı zamanda hedeflenen yoğunluk aralığında kontrollü köpük yapılar elde edilmesini mümkün kıldığını ve bu sayede fonksiyonel uygulamalara yönelik özelleştirilebilir malzeme tasarımına olanak sunduğunu göstermektedir.
- ✓ %10 SPA katkısı ile elde edilen yaklaşık %34,4 porozite, hedeflenen gözeneklilik seviyelerine ulaşmada önemli bir eşik olarak değerlendirilmiş ve bu katkı oranının, köpük yapının istenen yoğunluk ve porozite aralığına yönlendirilmesinde etkili bir yol gösterici olduğu anlaşılmıştır. Bu doğrultuda, çalışmanın ilerleyen aşamalarında daha yüksek SPA oranlarının uygulanmasıyla gözenekliliğin %50'nin üzerine çıkarılması hedeflenmekte olup, malzemenin yapısal özelliklerinin bu artışa bağlı olarak nasıl değişeceği detaylı şekilde araştırılacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvar altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atık toz temini Kütahya Seranit Fabrikası tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, araştırmanın yürütülmesinde sağlanan destek nedeniyle Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP) ve proje numarası 2024-26-62-119 ile verilen dolaylı teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu çalışmada çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir. Çalışma, tüm yazarların katkılarıyla yazılmıştır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar, çalışmanın tüm süreçlerinde *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin bilimsel, etik ve atıf kurallarına uyduklarını beyan etmişlerdir.

Kaynaklar

- [1] P.T. Nivala, S.P. James, "Metal open-cell foams with periodic topology fabricated by spark plasma sintering," *Materialia*, vol. 8, 2019, doi:10.1016/j.mtla.2019.100428.
- [2] Y. Zhang, R. Liu, C. Liu, Y. Zhang, L. Yan, J. Jiang, E. Liu, F. Xu, "Metal foams for the interfering energy conversion: Electromagnetic wave absorption, shielding, and sound attenuation," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 215, pp. 258–282, 2025, doi:10.1016/j.jmst.2024.06.054.
- [3] F.S. Damanik, G. Lange, "Influence of MWCNT coated nickel on the foaming behavior of MWCNT coated nickel reinforced AlMg4Si8 foam by powder metallurgy process," *Metals* vol. 10, pp. 1–9, 2020, doi:10.3390/met10070955.
- [4] Ş. Eldemir, Ö. Üyesi, O. Erdem, "Metalik köpükler ve uygulama alanları," *Malzeme Bilimleri Dergisi* vol. 2, pp. 91–101, 2023.
- [5] T. Wang, L. Liu, Z. Liu, K. Wang, R. Yao, X. Yao, R. Hang, "Characterization, mechanical property, degradation behavior, and osteogenic activity of Zn–Mn alloy foam prepared by electrodeposition," *Acta Metallurgica Sinica*, May 2025, doi:10.1016/j.mtla.2019.100428(2025).
- [6] S. Mardani, V. Aghabalaei, M. Baghdadi, A. Torabian, B.A. Goharrizi, "Application of Cu@Cu foam and RuO₂@Ti for removal of nitrogen compounds and organic matters from non-standard treated municipal wastewater by continuous electrochemical process: Optimization and mechanism," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 191, pp. 523–539, 2024, doi:10.1016/j.psep.2024.09.002.
- [7] J. Xiao, Y. Yang, G.B. Qiu, Y.L. Liao, H. Cui, X.W. Lü, "Volume change of macropores of titanium foams during sintering," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, pp. 3834–3839, 2015, doi:10.1016/S1003-6326(15)64029-8..
- [8] M. Hajizadeh, M. Yazdani, S. Vesali, H. Khodarahmi, T. Mirzababaie Mostofi, "An experimental investigation into the quasi-static compression behavior of open-cell aluminum foams focusing on controlling the space holder particle size," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp. 193–204, 2021, doi:10.1016/j.jmapro.2021.08.043.
- [9] Q. Li, W. Yang, C. Liu, D. Wang, J. Liang, "Correlations between the growth mechanism and properties of micro-arc oxidation coatings on titanium alloy: Effects of electrolytes," *Surface Coatings Technology*, vol. 326, pp. 162–170, 2017, doi:10.1016/j.surfcoat.2017.03.021.
- [10] P. Ji, B. Chen, B. Li, Y. Tang, G. Zhang, X. Zhang, M. Ma, R. Liu, "Influence of Nb addition on microstructural evolution and compression mechanical properties of Ti–Zr alloys," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 69, pp. 7–14, 2021, doi:10.1016/j.jmst.2020.03.092.
- [11] E. Yılmaz, A. Gökçe, F. Findik, and H. O. Gulsoy, "Metallurgical properties and biomimetic HA

- deposition performance of Ti-Nb PIM alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 746, pp. 301–313, 2018, doi:10.1016/j.jallcom.2018.02.274.
- [12] S. K. Yazici, F. Muhaffel, and M. Baydogan, “Effect of incorporating carbon nanotubes into electrolyte on surface morphology of micro arc oxidized Cp-Ti,” *Applied Surface Science*, vol. 318, pp. 10–14, 2014, doi:10.1016/j.apsusc.2013.11.137.
- [13] E. M. Saeed, N. M. Dawood, and S. F. Hasan, “Improvement corrosion resistance of Ni-Ti alloy by TiO₂ coating and hydroxyapatite/TiO₂ composite coating using micro arc oxidation process,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 2789–2796, 2021, doi:10.1016/j.matpr.2020.12.723.
- [14] S. Guan, M. Qi, Y. Li, and W. Wang, “Morphology evolution of the porous coatings on Ti-xAl alloys by Al adding into Ti during micro-arc oxidation in Na₂B₄O₇ electrolyte,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 395, 2020, doi:10.1016/j.surfcoat.2020.125948.
- [15] E. Yang, R. Yang, W. Wei, Q. Mo, F. Liang, D. Li, and W. Li, “Corrosion resistance and antibacterial properties of hydrophobic modified Ce-doped micro-arc oxidation coating,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 29, pp. 3303–3316, 2024, doi:10.1016/j.jmrt.2024.02.052.
- [16] F. Cavilha Neto, V. Salinas-Barrera, C. Aguilar, W. Dal’Maz Silva, C. Binder, and A. N. Klein, “Highly porous CP-Ti foams manufactured with powder compaction, the space holder method and plasma-assisted sintering for biomedical applications,” *Materials Letters*, vol. 361, 2024, doi:10.1016/j.matlet.2024.136091.
- [17] I. M. Makena and M. B. Shongwe, “Effects of porosity on the corrosion behaviour of PM-fabricated titanium foams for biomedical applications,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 19, 2024, doi:10.1016/j.ijoes.2024.100495.
- [18] I. García, M. Bayod, A. Conde, M. A. Arenas, J. Damborenea, A. Romero, and G. Rodríguez, “Concentrated Solar Energy sintering crossmark,” *Materials Letters*, vol. 185, pp. 420–423, 2016.
- [19] H. C. Hsu, S. K. Hsu, S. C. Wua, P. H. Wang, and W. F. Ho, “Design and characterization of highly porous titanium foams with bioactive surface sintering in air,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 575, pp. 326–332, 2013, doi:10.1016/j.jallcom.2013.05.186.
- [20] X. Ma, C. He, Y. Yan, J. Chen, H. Feng, J. Hu, H. Zhu, and Y. Xia, “Energy-efficient electrochemical degradation of ciprofloxacin by a Ti-foam/PbO₂-GN composite electrode: Electrode characteristics, parameter optimization, and reaction mechanism,” *Chemosphere*, vol. 315, 2023, doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137739.
- [21] A. Abhash, P. Singh, V. A. N. Ch, S. Sathaiah, R. Kumar, G. K. Gupta, and D. P. Mondal, “Study of newly developed Ti–Al–Co alloys foams for bioimplant application,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 774, 2020, doi:10.1016/j.msea.2020.138910.
- [22] A. Hassani, A. Habibolahzadeh, and H. Bafti, “Production of graded aluminum foams via powder space holder technique,” *Materials & Design*, vol. 40, pp. 510–515, 2012, doi:10.1016/j.matdes.2012.04.024.
- [23] H. Bafti and A. Habibolahzadeh, “Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters,” *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4122–4129, 2010, doi:10.1016/j.matdes.2010.04.038.

- [24] P. Siegkas, N. Petrinic, and V. L. Tagarielli, "Measurements and micro-mechanical modelling of the response of sintered titanium foams," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 57, pp. 365–375, 2016, doi:10.1016/j.jmbbm.2016.02.024.
- [25] D. P. Mondal, J. D. Majumder, N. Jha, A. Badkul, S. Das, A. Patel, and G. Gupta, "Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route," *Materials & Design*, vol. 34, pp. 82–89, 2012, doi:10.1016/j.matdes.2011.07.055.
- [26] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, D. Domancic, and I. Alfonso, "Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 276–283, 2015, doi:10.1016/j.matdes.2015.06.038.
- [27] N. Jha, D. P. Mondal, J. D. Majumdar, A. Badkul, A. K. Jha, and A. K. Khare, "Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route," *Materials & Design*, vol. 47, pp. 810–819, 2013, doi:10.1016/j.matdes.2013.01.005.
- [28] A. Ayday and M. Durman, "Effect of different surface-heat-treatment methods on the surface properties of AISI 4140 steel," *Materials and Technology*, vol. 48, 2014.
- [29] G. Li, Y. Wang, L. Qiao, R. Zhao, S. Zhang, R. Zhang, C. Chen, X. Li, and Y. Zhao, "Preparation and formation mechanism of copper incorporated micro-arc oxidation coatings developed on Ti-6Al-4V alloys," *Surface and Coatings Technology*, vol. 375, pp. 74–85, 2019, doi:10.1016/j.surfcoat.2019.06.096.
- [30] Y. Zhang, G. R. Ma, X. C. Zhang, S. Li, and S. T. Tu, "Thermal oxidation of Ti-6Al-4V alloy and pure titanium under external bending strain: Experiment and modelling," *Corrosion Science*, vol. 122, pp. 61–73, 2017, doi:10.1016/j.corsci.2017.01.009.
- [31] C. T. Guerrero, I. A. Figueroa, M. F. Azamar, T. E. Soto, L. E. Carranza, C. Reyes, and I. Alfonso, "A study on syntactic aluminum foams manufactured infiltrating sintered preforms of iron hollow spheres," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 323, 2024, doi:10.1016/j.matchemphys.2024.129656.
- [32] N. I. Hafiz, M. A. Islam, and S. Saha, "Characterization of synthesized nickel foam using ammonium hydrogen carbonate as space holder," *Results in Engineering*, vol. 24, 2024, doi:10.1016/j.rineng.2024.103634.
- [33] S. Sathaiah, R. Dubey, A. Pandey, N. R. Gorhe, T. C. Joshi, V. Chilla, D. Muchhala, and D. P. Mondal, "Effect of spherical and cubical space holders on the microstructural characteristics and its consequences on mechanical and thermal properties of open-cell aluminum foam," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 273, 2021, doi:10.1016/j.matchemphys.2021.125115.
- [34] J. Rivard, V. Brailovski, S. Dubinskiy, and S. Prokoshkin, "Fabrication, morphology and mechanical properties of Ti and metastable Ti-based alloy foams for biomedical applications," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 45, pp. 421–433, 2014, doi:10.1016/j.msec.2014.09.033.
- [35] M. S. Bernardo, T. Jardiel, A. C. Caballero, M. Bram, J. Gonzalez-Julian, and M. Peiteado, "Electric current activated sintering (ECAS) of undoped and titanium-doped BiFeO₃ bulk ceramics with homogeneous microstructure," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 2042–2049, 2019, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.045.

-
- [36] Y. Garip and O. Ozdemir, “A study of the cycle oxidation behavior of the Cr/Mn/Mo alloyed Ti–48Al–based intermetallics prepared by ECAS,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 818, 2020, doi:10.1016/j.jallcom.2019.152818.
- [37] A. Erdogan, T. Yener, and S. Zeytin, “Fast production of high entropy alloys (CoCrFeNiAlxTiy) by electric current activated sintering system,” *Vacuum*, vol. 155, pp. 64–72, 2018, doi:10.1016/j.vacuum.2018.05.027
- [38] D. Kırsever, H. Ö. Toplan, and A. Ş. Demirkıran, “Effect of porcelain polishing waste additive on properties and corrosion resistance of ceramic foams produced from zeolite,” *Journal of the Australian Ceramic Society*, vol. 59, pp. 671–683, 2023, doi:10.1007/s41779-023-00865-z.

Research Article

Determination of Agricultural-Based Biomass Energy Potential as a Sustainable Clean Energy Source: The Case of Muş Province (2020-2024)

Hatice Erdem ^{1,*} 

Received: 23.04.2025

Accepted: 03.06.2025

¹Muş Alparslan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Food Engineering, Muş, Türkiye; h.erdem@alparslan.edu.tr

*Corresponding Author

Abstract: This study aims to calculate the biomass energy potential that can be theoretically obtained from agricultural products for the Muş province between 2020-2024. In this context, calculations were made by taking into account the legumes, industrial plants, cereals, forage crops, oilseeds, and tubers grown in the region. The analyses are based on five-year data (2020–2024) obtained from the Plant Production Statistics Database of the Turkish Statistical Institute. Accordingly, the average biomass energy potentials were calculated in megawatts (MW). According to the results, the product groups with the highest biomass energy potential were grains and forage crops. When evaluated on a district basis, the Central district has the highest share (33,02%) and the Hasköy district has the lowest share (2,44%) in terms of 5-year average biomass energy potential. Considering all available biomass sources in Muş province, the estimated annual energy potential was determined to be 27.145 MW in 2020, 29.288 MW in 2021, 33.863 MW in 2022, 37.361 MW in 2023, and 40.608 MW in 2024. These findings show that Muş province has significant potential on both national and global scales in terms of sustainable and environmentally friendly biomass energy that can be produced from agricultural crops.

Keywords: agricultural crops; biomass; clean energy; Muş; sustainability.

Araştırma Makalesi

Sürdürülebilir Temiz Enerji Kaynağı Olarak Tarımsal Kökenli Biyokütle Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi: Muş İli Örneği (2020-2024)

Özet: Bu çalışmada, Muş ili için 2020-2024 yılları arasında tarım ürünlerinden teorik olarak elde edilebilecek biyokütle enerji potansiyelinin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, bölgede yetiştirilen baklagiller, endüstriyel bitkiler, tahıllar, yem bitkileri, yağlı tohumlar ve yumru bitkiler dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Analizler, Türkiye İstatistik Kurumu'nun Bitkisel Üretim İstatistikleri Veri Tabanı'ndan temin edilen 2020–2024 dönemine ait beş yıllık verilere dayanmaktadır. Bu doğrultuda ortalama biyokütle enerji potansiyelleri megawatt (MW) cinsinden hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, biyokütle enerji potansiyeli en yüksek ürün grupları tahıllar ve yem bitkileri olmuştur. İlçeler bazında değerlendirildiğinde, 5 yıllık ortalama biyokütle enerji potansiyeli bakımından en yüksek paya Merkez ilçe (%33,02), en düşük paya ise Hasköy ilçesi (%2,44) sahiptir. Muş ilinde mevcut tüm biyokütle kaynakları

değerlendirildiğinde, elde edilebilecek yıllık enerji potansiyelinin 2020 yılında 27.145 MW, 2021 yılında 29.288 MW, 2022 yılında 33.863 MW, 2023 yılında 37.361 MW ve 2024 yılında 40.608 MW olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, Muş ilinin tarımsal ürünlerden üretililecek sürdürülebilir ve çevre dostu biyokütle enerjisi açısından hem ulusal hem de küresel ölçekte kayda değer bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: biyokütle; Muş; sürdürülebilirlik; tarım ürünleri; temiz enerji.

1. Introduction

Energy, one of the most important indicators of economic and social development, has become a priority for all countries in the world since the early 1970s [1]. In recent years, global population growth, modernization and rapid development of industrialization have significantly increased energy demand. Although fossil fuels such as coal and oil dominate the energy market today, they come with environmental costs such as greenhouse gas emissions, global warming, and ozone layer depletion. Although approximately 80% of energy consumption worldwide is based on fossil fuels, excessive use of these resources leads to their depletion, and combustion processes harm the environment by increasing the emission of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO) and sulfur dioxide (SO₂). It is predicted that energy consumption, especially in the transportation sector, will increase by 60% by 2030. In addition, excessive use of fossil fuels brings with it many environmental and social problems such as energy security risks, fluctuations in crude oil prices, and damage to biodiversity. The search for renewable and carbon-neutral energy sources has accelerated to combat global climate change. [2]. Therefore, the need to develop new, accessible, environmentally safe, sustainable, and ecologically sound energy sources has become more urgent than ever [3].

Renewable energy is derived from naturally replenishing resources such as sun, wind, water, geothermal heat, and biomass and, unlike fossil fuels, is inexhaustible. It is generally environmentally friendly with a low carbon footprint, improves air quality, and provides sustainable energy solutions. It also reduces fossil fuel dependency, supports economic growth, and provides energy security. Prominent technologies include solar panels, wind turbines, hydroelectric power plants, organic matter-burning biomass power plants, geothermal power plants, tidal/wave systems, and hydrogen fuel cells [4]. Among these, biomass has become an important energy source and the fourth largest energy source worldwide, and as a result, studies on the use of biomass to meet the energy needs around the world have intensified in recent years [5].

Biomass is a renewable alternative that is widely available in nature and used for sustainable energy production. Biomass, derived from plant and organic matter, has a wide range of sources including agricultural crops, plant residues, forest wastes, and specially grown energy crops [6]. Biomass is produced by green plants converting sunlight into plant material through photosynthesis and includes all terrestrial and aquatic vegetation as well as all organic waste. A biomass resource can be thought of as organic matter in which the energy of sunlight is stored in chemical bonds. When the bonds between adjacent carbon, hydrogen, and oxygen molecules are broken through digestion, combustion, or decomposition, these substances release their stored chemical energy [7].

Biomass energy refers to any type of heat energy obtained from biological sources other than fossil fuels. This energy source can be provided not only from terrestrial ecosystems but also from ocean and freshwater habitats [8]. Among renewable energy sources (solar, geothermal, wind, tidal, bioenergy, etc.), biomass is the only renewable carbon source that can be converted into energy, solid/liquid/gaseous fuels, and chemicals by thermochemical (combustion, pyrolysis, gasification, hydrothermal liquefaction, etc.) and biological (anaerobic digestion, fermentation, etc.) conversion methods [9].

In today's world where climate change concerns are increasing, fossil fuel reserves are rapidly depleting and the need for green energy is becoming increasingly urgent, biomass stands out as a strong alternative for energy production. Biomass plays a critical role in nature's carbon cycle; CO₂ released into the atmosphere during the combustion process of biomass is reabsorbed by plants and other organic matter. This natural cycle creates a closed-loop carbon system that separates biomass from fossil fuels, significantly reducing net carbon emissions. Thanks to its environmentally friendly structure, wide range of resources, and accessibility, biomass is becoming an increasingly preferred renewable energy source. In contrast to the limited nature of fossil fuels, biomass offers a sustainable and renewable energy reserve. A wide range of feedstocks, from forestry waste to specially grown energy crops, can be easily adapted to different geographic regions and local farming systems. This flexibility makes biomass a powerful solution that both increases energy security and reduces dependence on fossil fuels [10].

The United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) provide a comprehensive plan to promote sustainability and a cleaner future. The SDGs' pillars include universal access to energy, environmental responsibility, and climate action. SDG 7 (Goal 7) aims to ensure that everyone has access to affordable, reliable, modern, and environmentally friendly energy. In this context, biomass energy, as a clean and renewable energy source, offers an important solution, especially in regions where traditional energy infrastructure is inadequate [11, 12]. In addition, the efficient use of biomass energy is essential to achieve many of the SDGs, including those related to clean energy, zero hunger, industry, innovation, infrastructure, responsible production and consumption, and climate action. The efficient and sustainable use of biomass energy plays a key role in achieving the environmental, social, and economic objectives outlined in the United Nations' 2030 Agenda for Sustainable Development, particularly those related to clean energy, climate action, and responsible resource use [13].

In Türkiye, 86% of the energy demand is met by fossil resources and 73% is imported. Energy consumption in Türkiye is increasing much faster than its production, making Türkiye a rapidly growing energy importer. At the same time, agriculture is one of the main activities in Türkiye and represents a large part of the national income. Due to the climatic conditions and agricultural production in Türkiye, the diversity of agricultural products is quite high. Both agricultural production residues and large amounts of horticultural production residues are produced. Biomass can meet a significant part of the energy demand in Türkiye, as it is abundant. If local energy resources such as biomass are used adequately and efficiently, external dependence on energy will be significantly reduced and energy imports to the country can be eliminated [1]. In this study, annual average dry biomass amounts and corresponding theoretical biomass energy potentials were calculated based on agricultural crops planted in the districts of Muş province between 2020 and 2024.

2. Material ve Method

Muş province is located in the Upper Murat-Van section of the Eastern Anatolia Region. It was established on the plain between Çar Creek and Kornı Creek. Muş province consists of 6 districts, including Bulanık, Hasköy, Korkut, Malazgirt, Varto, and Center. Muş is bordered by Ağrı to the east, Bingöl to the west, Erzurum to the north, Diyarbakır and Batman to the southwest, and Bitlis to the south. Its total area is 8196 km² and covers approximately 1,1% of Turkey's surface area. The geographical location of Muş is given in Fig. 1.

Muş is generally under the influence of the harsh and continental climate of the Eastern Anatolia Region. Steppe plants, meadow grasses, and oak forests constitute the vegetation types of Muş province, which is located within the influence zone of the continental climate. Agriculture and animal husbandry are the main sectors of the provincial economy. The total land of the province consists of 41,2% agricultural land, 38,8% meadow, 9,2% forest land, 8,3% pasture, and 2,5% land unsuitable for agriculture [14]. Irrigated agriculture is primarily practiced in the lands around the bed of the Murat River and Karasu, which flow in the Muş Plain in the central district. Later on, irrigated agriculture was practiced in Bulanık and Malazgirt districts where the waters of the Murat River could be reached, and in the Hasköy district where Karasu passes through. Apart from these lands, there are lands where

irrigated agriculture is practiced in a fragmented manner where there are no large lands where irrigated agriculture is practiced [15]. Cereals (wheat-barley) are cultivated on 84% of the total cultivated agricultural land, forage crops (alfalfa) on 10%, industrial crops (sugar beet, tobacco, sunflower) on 3%, and vegetables, fruits, and legumes on the remaining 3% [16].



Figure 1. Geographical location and districts of Muş province.

The data used to determine the biomass energy potential in Muş province were obtained from the Turkish Statistical Institute (TUIK). The data were obtained by following the path shown in Fig. 2.

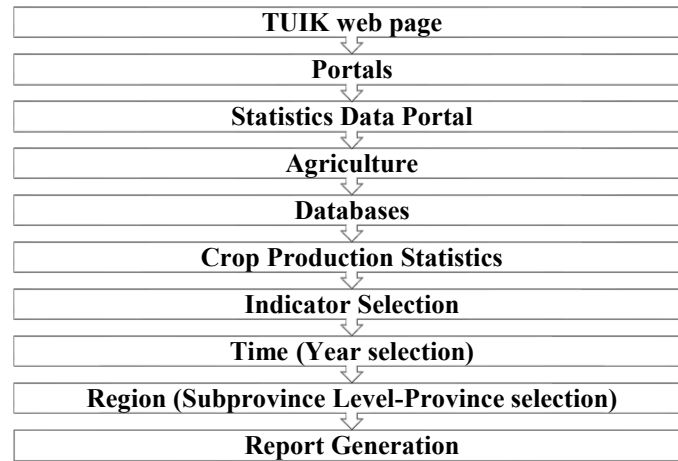


Figure 2. Schematic of obtaining data for the study.

In this study, in order to determine the biomass energy potential of Muş province, the areas covered by field crops cultivated between 2020-2024 were taken in hectares, and average dry biomass amounts and average biomass energy potentials were calculated for each district. Legumes, industrial crops, cereals, forage crops, oilseeds, and tuber crops are considered field crops. The calculations are based on average values reported in the literature, indicating that approximately 25-30 tons of dry agricultural biomass can be obtained per hectare annually, with a calorific value ranging between 3800-4300 kcal/kg,

depending on the crop type and environmental conditions. 1 kcal is taken as 1.10^{-7} TOE (tons of oil equivalent) and 1 TOE is taken as 11,63 MW and calculations were made using the following formulas (Eqs. 2.1-2.8) [17-19].

$$B_1 = 25 \times A \quad (2.1)$$

$$B_2 = 30 \times A \quad (2.2)$$

$$B_{ort} = (B_1 + B_2)/2 \quad (2.3)$$

$$C_1 = B_{ort} \times 3800 \quad (2.4)$$

$$C_2 = B_{ort} \times 4300 \quad (2.5)$$

$$C_{ort} = (C_1 + C_2)/2 \quad (2.6)$$

$$D_{ort} = C_{ort} \times 10^{-7} \quad (2.7)$$

$$E_{ort} = D_{ort} \times 11,63 \quad (2.8)$$

Where; A: Area (ha), B_1 : Minimum dry biomass amount (tons), B_2 : Maximum dry biomass amount (tons), B_{ort} : Average dry biomass amount (tons), C_1 : Minimum dry biomass heating value (kcal), C_2 : Maximum dry biomass heating value (kcal), C_{ort} : Average dry biomass heating value (kcal), D_{ort} : Average dry biomass energy amount (TOE), E_{ort} : Average dry biomass energy amount (MW).

3. Results and Discussion

Muş, which is located in the TRB2 Region covering the provinces of Van, Muş, Bitlis, and Hakkari, has a total agricultural land area of 3.241.124 decares according to TUIK data for 2024. Of this area, 3.135.099 decares are cultivated agricultural land and 22.535 decares are fallow. The total agricultural land in Muş corresponds to approximately 1,35% of the total agricultural land in Turkey. When the distribution of agricultural areas of Muş province by districts is examined, there are 963.700 decares in the central district, 899.905 decares in Malazgirt, 647.889 decares in Bulanık, 336.500 decares in Varto, 335.707 decares in Korkut and 57.423 decares in Hasköy [20].

3.1. Cereals

The main cereal crops grown in Muş province are rye, wheat, barley, corn, triticale, and oats. The average dry biomass amounts in tons that can be obtained from cereals in the center and districts of Muş province between 2020-2024 are given in Table 1 (Eq. 2.3), and the average biomass energy amounts determined in MW are given in Fig. 3 (Eq. 2.8). From Table 1, it is seen that the average dry biomass in Muş province in terms of cereals is 3.748.382 tons in 2020 and 5.023.015 tons in 2024, and the average dry biomass amount increases by approximately 34% in five years. It was determined that the highest average dry biomass amount in the districts was 2.264.754 tons in Malazgirt district in 2024 and the lowest was 41.525 tons in Varto district in 2024. There may be differences in the average amount of dry biomass that can be obtained from cereal crops on a district basis. This may be due to the difference in the size of the cultivated agricultural area between the districts. If the sum of the average dry biomass amounts that can be obtained from cereal crops between 2020 and 2024 are ranked from largest to smallest for the districts, they are Malazgirt, Central, Bulanık, Korkut, Varto and Hasköy, respectively.

Table 1. Average amounts of dry biomass from cereal crops in Muş province (tons)

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2020	1.027.925	57.351	173.223	1.285.955	1.065.633	138.295	3.748.382

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2021	928.373	75.625	393.759	1.453.295	1.118.659	191.634	4.161.344
2022	930.974	46.604	355.988	1.519.051	1.363.590	189.989	4.406.196
2023	1.146.910	62.769	258.088	1.856.250	1.507.847	232.375	5.064.238
2024	1.195.543	62.769	219.918	2.264.754	1.238.507	41.525	5.023.015

Considering Fig. 3, when evaluated in terms of the average biomass energy potential that can be obtained from cereal crops between 2020-2024 for Muş province, Malazgirt district has the highest total biomass energy potential with approximately 39.468 MW. In 2020, the average biomass energy potential of Malazgirt district was calculated as 6.057 MW, 6.845 MW in 2021, 7.155 MW in 2022, 8.743 MW in 2023, and 10.667 MW in 2024. The district with the lowest total biomass energy potential is Hasköy district with approximately 1.437 MW. The average biomass energy potential in the Hasköy district was calculated as 270 MW in 2020, 356 MW in 2021, 220 MW in 2022, and 296 MW in 2023 and 2024. The total average biomass energy potential in the central district is 29.647 MW, 24.633 MW in Bulanık, 6.599 MW in Korkut, and 3.739 MW in Varto. The average biomass energy potential that can be obtained from cereal crops in Muş province is calculated as 17.655 MW in 2020, 19.601 MW in 2021, 20.754 MW in 2022, 23.853 MW in 2023 and 23.659 MW in 2024.

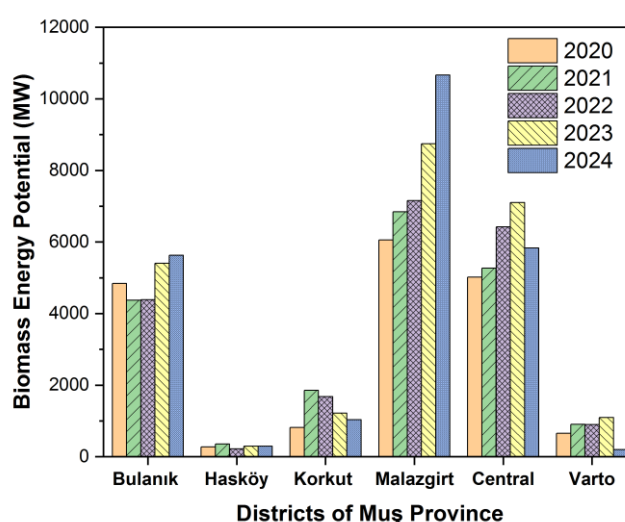


Figure 3. The average biomass energy potential from cereal crops in Muş province

3.2. Legumes

Chickpeas, beans, and lentils, which are legume crops, are grown in Muş province. The average dry biomass amounts that can be obtained from legumes in Muş province between 2020 and 2024 are given in Table 2 (Eq. 2.3) and the average biomass energy potentials that can be obtained are given in Fig. 4 (Eq. 2.8). When Table 2 is evaluated, it is determined that the average dry biomass from legume crops in Muş province is 83.597 tons in 2020, 89.774 tons in 2021, 92.043 tons in 2022, 121.545 tons in 2023, and 11.052 tons in 2024. There can be differences in the average amount of dry biomass from legumes over the years. While there was a linear increase in the average dry biomass amounts from 2020 to 2023 in the province, there was a significant decrease of approximately 87% in 2024. If the sum of the average

dry biomass amounts from legumes between 2020-2024 are listed from largest to smallest according to the districts, they are Central, Malazgirt, Bulanık, Korkut, Varto, and Hasköy, respectively.

Table 2. Average amount of dry biomass from legumes in Muş province (tons)

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2020	5.137	1.944	1.540	11.363	61.361	2.252	83.597
2021	5.027	2.338	2.461	12.350	65.447	2.151	89.774
2022	869	756	2.338	2.874	84.051	1.155	92.043
2023	2.789	1.042	4.538	1.183	110.688	1.306	121.545
2024	2.585	1.042	2.409	525	4188	303	11.052

The five-year change in the energy potential of the average dry biomass obtained in the districts is shown in Fig. 4 for each district. When the averages of the highest biomass energy potential from legumes between 2020-2024 are examined; the highest value was determined as 521.4 MW in the Central district in 2023 and the lowest value was determined as 1,4 MW in Varto in 2024. In 2020, the biomass energy potential was calculated as 24,2 MW for Bulanık, 9,2 MW for Hasköy, 7,3 MW for Korkut, 53,5 MW for Malazgirt, 289 MW for Central, and 10,6 MW for Varto. In 2024, biomass energy potential is calculated as 12,2 MW in Bulanık, 4,9 MW in Hasköy, 11,3 MW in Korkut, 2,5 MW in Malazgirt, 19,7 MW in Central, and 1,4 MW in Varto. By 2024, the amount of biomass energy that can be obtained in all districts has decreased significantly and it is also seen that approximately 82% of the five-year average biomass energy potential from legumes for Muş province can be met from the Central district.

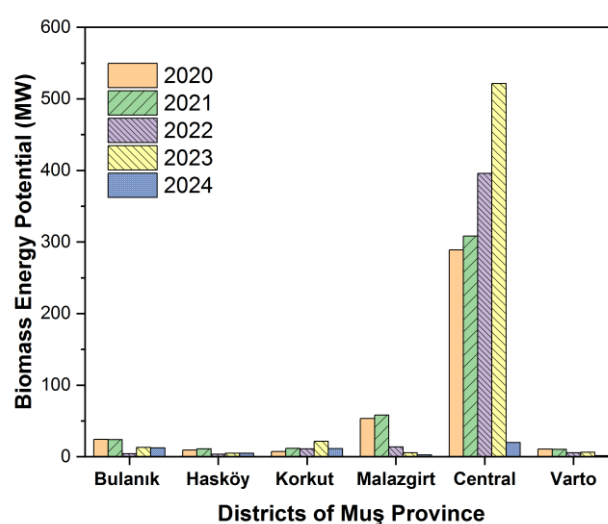


Figure 4. The average biomass energy potential from legumes in Muş province

3.3. Forage Crops

Vetch (Hungarian), vetch (other), alfalfa, sainfoin, corn for silage, forage peas, and meadow grass (green grass) are grown as forage crops in Muş. The average amount of dry biomass from forage crops in Muş province is given in Table 3 (Eq. 2.3), and the average biomass energy potentials are given in

Fig. 5 (Eq. 2.8). When Table 3 is examined, it was determined that 1.670.848 tons of dry biomass were generated from fodder crops in Muş province in 2020, 1.664.894 tons in 2021, 2.382.001 tons in 2022, 2.289.639 tons in 2023, and 3.127.784 tons in 2024. When forage crops are evaluated by years, it is seen that there is an increase in 2024, although there is a decrease in 2021 and 2023. If the sums of the average dry biomass amounts from forage crops between 2020-2024 are ranked from largest to smallest, they are Central, Varto, Korkut, Bulanık, Malazgirt, and Hasköy, respectively.

Table 3. Average amount of dry biomass from forage crops in Muş province (tons)

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2020	164.986	159.225	188.650	141.488	757.697	258.803	1.670.848
2021	158.043	113.988	213.397	180.188	747.203	25.2076	1.664.894
2022	250.225	129.635	371.168	133.235	1.025.717	472.021	2.382.001
2023	469.579	60.258	385.688	135.638	637.079	601.398	2.289.639
2024	508.780	60.258	672.579	138.589	925.471	822.107	3.127.784

According to Fig. 5, when the average biomass energy potential that can be obtained from forage crops in Muş province in the five-year period between 2020 and 2024 is evaluated, it is seen that the district with the highest total biomass energy potential is the Central district, with approximately 19.279 MW. In 2020, the average biomass energy potential of the Central district was calculated as 3.569 MW, 3.519 MW in 2021, 4.831 MW in 2022, 3.001 MW in 2023, and 4.359 MW in 2024. The district with the lowest total average biomass energy potential is Hasköy district, with 2.465 MW. The total average biomass energy potential in other districts is 11.375 MW for Varto, 8.627 MW for Korkut, 7.308 MW for Bulanık, and 3.434 MW for Malazgirt, respectively. The average biomass energy potentials from forage crops in Muş province are calculated as 7.870 MW in 2020, 7.842 MW in 2021, 11.219 MW in 2022, 10.785 MW in 2023, and 14.732 MW in 2024.

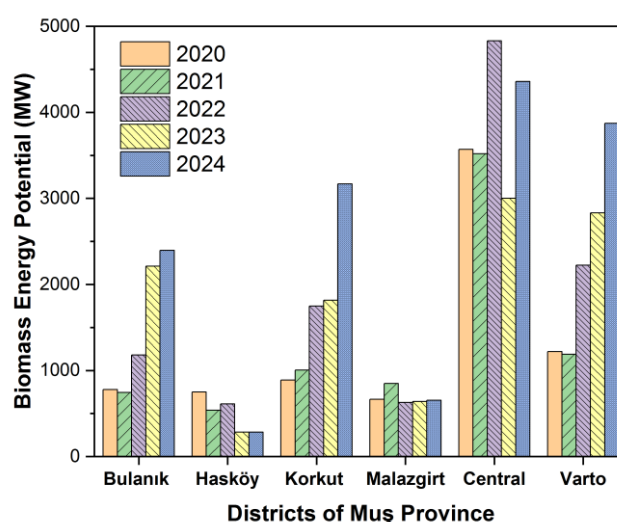


Figure 5. The average biomass energy potential of forage crops in Muş province

3.4. Industrial Plants

Sugar beet and tobacco are grown as industrial plants in Muş province. Sugar beet is not cultivated only in the Varto district, and tobacco is cultivated only in the Central district. The average dry biomass amounts from industrial crops in the central and districts of Muş province between 2020-2024 are given in Table 4 (Eq. 2.3), and the average biomass energy amounts that can be obtained are given in Fig. 6 (Eq. 2.8). As can be seen from Table 4, in Hasköy and Korkut districts, no planting was done in 2023, and replanting was done in 2024. In the Varto district, no industrial crops were planted between 2020 and 2024. When the total amount of average dry biomass in terms of industrial plants in Muş province was evaluated by years, it was determined that 358.669 tons of average dry biomass was formed in 2024, and this value increased by approximately 76% compared to 2020 but decreased by approximately 9% compared to the previous year. In addition, the highest average amount of dry biomass in cultivated areas was found in the Central district in 2023, while the lowest amount was found in the Korkut district in 2021. If the sum of the average dry biomass amounts from industrial plants between 2020-2024 is ranked from largest to smallest for the cultivated districts, they are Central, Malazgirt, Bulanık, Korkut, and Hasköy, respectively.

Table 4. The average amount of dry biomass from industrial plants in Muş province (tons)

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2020	33.481	4.538	10.516	50.133	86.504	0	185.171
2021	33.550	11.932	3.671	63.443	104.643	0	217.239
2022	27.588	4.964	11.303	63.800	81.887	0	189.541
2023	58.163	0	0	90.750	209.756	0	358.669
2024	49.830	13.277	17.518	61.050	185.081	0	326.755

When Fig. 6 is evaluated, it is seen that industrial plant production is realized in Bulanık, Hasköy, Korkut, Malazgirt, and Central districts in terms of industrial plants. There is no industrial plant production in the Varto district. In addition, there was no industrial plant production in the Hasköy and Korkut districts in 2023. Therefore, there is no average biomass energy potential for the districts and years with no cultivation. The highest total average biomass energy amount was calculated as 3.246 MW in the Central district. In 2020, the average biomass energy potential of the Central district was calculated as 407 MW, 493 MW in 2021, 386 MW in 2022, 988 MW in 2023, and 872 MW in 2024. The district with the lowest total biomass energy potential is Hasköy district, with 163 MW. The average biomass energy potential in the Hasköy district was calculated as 21 MW in 2020, 56 MW in 2021, 23 MW in 2022, and 63 MW in 2024. In other districts, the total biomass energy potentials are as follows: Bulanık 954 MW, Korkut 203 MW, and Malazgirt 1.550 MW. The average biomass energy potential that can be obtained from industrial plants in Muş province is calculated as 872 MW in 2020, 1.023 MW in 2021, 893 MW in 2022, 1.689 MW in 2023, and 1.539 MW in 2024.

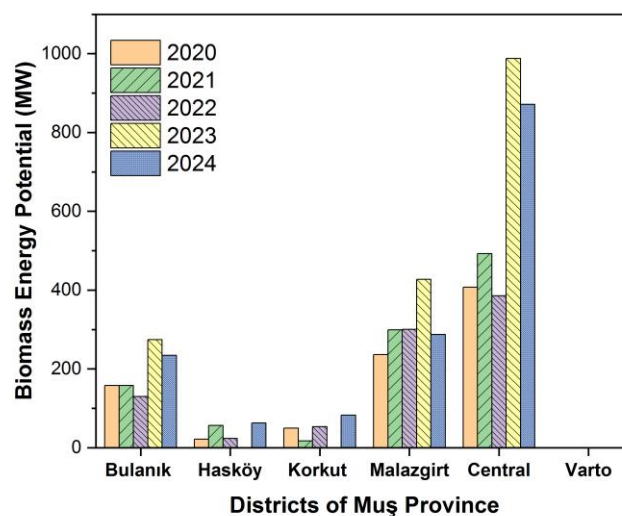


Figure 6. The average biomass energy potential from industrial plants in Muş province.

3.5. Oilseeds

Sunflower and safflower are grown in Muş province as oilseed crops. The average amount of dry biomass from oilseed crops in Muş is given in Table 5 (Eq. 2.3), and the average biomass energy potentials are given in Fig. 7 (Eq. 2.8). As can be seen from Table 5, some districts in Muş province do not cultivate oilseed crops. These districts include the Hasköy, Korkut, and Varto districts. Among the districts where oilseed crops are cultivated, both sunflower and safflower are produced in the Central district, while only sunflower is produced in the Bulanık and Malazgirt districts. In terms of oilseed crops, it was determined that the average dry biomass in Muş province was 71.437 tons in 2020, increased by approximately 13% to 80.751 tons in 2021, increased by approximately 47% in 2022 compared to the previous year to 118.726 tons, decreased by approximately 18% to 96.899 tons in 2023 compared to the previous year, and increased by approximately 31% to 126.800 tons in 2024 compared to the previous year. If the total of the average dry biomass amounts from oilseed crops between 2020-2024 is ranked from largest to smallest for the districts where production is made, it is Central, Malazgirt, and Bulanık, respectively.

Table 5. The average amount of dry biomass from oilseeds in Muş province (tons)

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2020	2.428	0	0	2.571	66.437	0	71.437
2021	1.711	0	0	2.695	76.346	0	80.751
2022	17.177	0	0	10.799	90.750	0	118.726
2023	25.300	0	0	2.830	68.769	0	96.899
2024	22.055	0	0	2.860	101.885	0	126.800

Fig. 7 shows that oilseed crops are not cultivated in some districts in Muş province. Since oilseed crops are cultivated in the Central, Malazgirt, and Bulanık districts, the average biomass energy potential between 2020-2024 was calculated only for these districts. The Central district has the highest average

biomass energy potential among these districts. While the average biomass energy potential in Central shows a linear increase between 2020 and 2022 (312,9 MW for 2020, 359,6 MW for 2021, and 427,4 MW for 2022), it decreased by approximately 24% in 2023 to 323,9 MW compared to the previous year and increased to 479,9 MW in 2024. In total, about 1.904 MW of biomass energy was provided in the center between 2020 and 2024, while about 323 MW of biomass energy was provided in Bulanık and 102,5 MW in Malazgirt. It is seen that approximately 82% of the five-year average biomass energy potential that can be obtained from oilseeds for Muş province can be provided from the Central district.

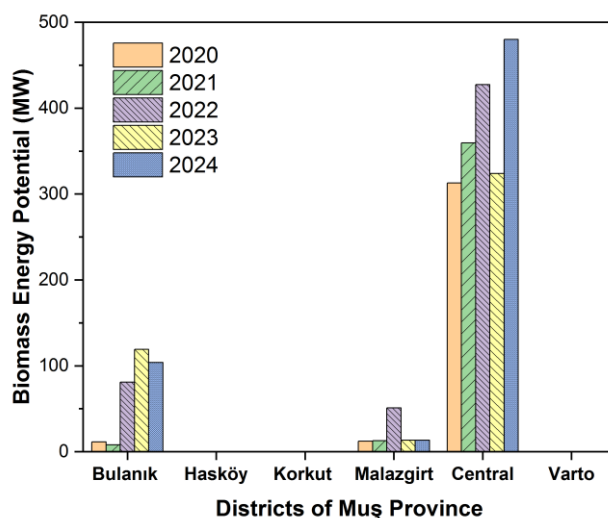


Figure 7. The average biomass energy potential from oilseeds in Muş province

3.6. Tuberous Plants

In Muş province, only potatoes are cultivated in the tuber crops class. The average amount of dry biomass from tuber crops in Muş is given in Table 6 (Eq. 2.3), and the average biomass energy potentials that can be obtained are given in Fig. 8 (Eq. 2.8). When the data in Table 6 are examined, only the Bulanık, Central, and Korkut districts of Muş province produced tuberous plants. In the Korkut district, while very little production was made between 2020-2023, no production was made in 2024. In Bulanık district, the average dry biomass amount decreased by approximately 97% in 5 years. The highest average dry biomass amount was calculated in 2024 in the Central district. In addition, the highest average dry biomass amount in terms of tuberous plants is also in the Central district.

Table 6. The average amount of dry biomass from tuberous plants in Muş province (tons)

	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	Total
2020	2145	0	14	0	1403	0	3561
2021	2013	0	8	0	1966	0	3988
2022	74	0	6	0	825	0	905
2023	69	0	44	0	963	0	1075
2024	61	0	0	0	5984	0	6045

According to Fig. 8, when the average biomass energy potential from tuberous plants in Muş province between 2020 and 2024 is evaluated, the district with the highest total biomass energy potential is the Central district, with 52,47 MW. In 2020, the average biomass energy potential of the Central district was calculated as 6,61 MW, 9,26 MW in 2021, 3,89 MW in 2022, 4,53 MW in 2023, and 28,19 MW in 2024. The district with the lowest total biomass energy potential is Korkut district, with 0,34 MW. The total biomass energy potential in Bulanık is 20,54 MW. The average biomass energy potential from tuber crops in Muş province is calculated as 16,77 MW in 2020, 18,78 MW in 2021, 4,26 MW in 2022, 5,06 MW in 2023, and 28,19 MW in 2024.

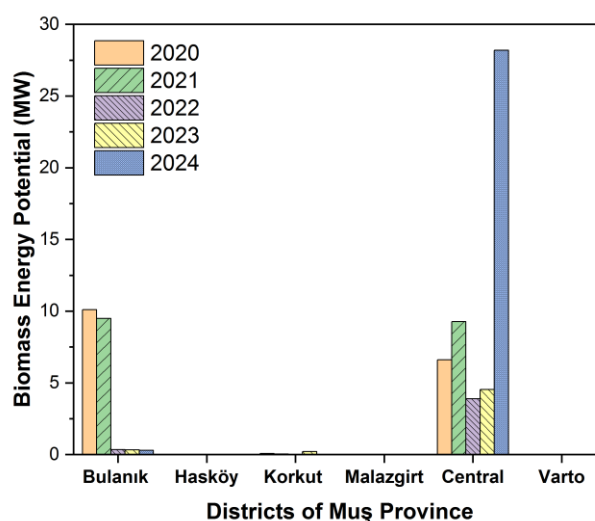


Figure 8. The average biomass energy potential from tuberous plants in Muş province

4. Conclusions

There are six districts in Muş province, including the Central district and five districts. In the study, 5-year average dry biomass amounts and average biomass energy potentials were calculated separately for each district between 2020-2024. Cereals, legumes, industrial plants, oilseeds, forage crops, and tuberous plants were taken as the basis in the calculations. In the calculations made using the data between 2020-2024, the total biomass energy potential of Muş province by year is given in Table 7 (Eq. 2.8). It is seen from Table 7 that the five-year total biomass energy potential is listed as cereals > forage crops > industrial plants > oilseeds > legumes > tuberous plants on the basis of agricultural products. Due to the high cereal planting and production in Muş province, where agriculture and animal husbandry are carried out, the amount of dry biomass and biomass energy potential produced by cereal products are also high.

The total biomass energy potential from field products for the districts of Muş province between 2020-2024 is given in Table 8 (Eq. 2.8). The biomass energy potential more or less varies depending on whether the agricultural areas are fully planted or not, due to the nature of the method used in this study. As seen in Table 8, the agricultural products that are planted the most and therefore produce the most biomass energy for all districts are cereals (62,7%) and forage crops (31,2%). The districts with the highest and lowest 5-year average biomass energy potential are Central (33,02%) and Hasköy (2,44%), respectively. When the biomass energy potentials that can be obtained from all products between 2020 and 2024 are evaluated on a district basis, it has been determined that 33.317 MW of energy can be obtained for Bulanık, 4.099 MW for Hasköy, 15.491 MW for Korkut, 44.688 MW for Malazgirt, 55.563 MW for Central, and 15.107 MW for Varto.

In this study, it was determined that there is an average of 35.723.911 tons of 5-year total biomass potential based on the areas where cereals, legumes, forage crops, industrial plants, oilseeds, and tuberous plants were planted in Muş province between 2020-2024, and the average energy potential corresponding to this dry biomass is approximately 170.000 MW.

When these findings are evaluated within the national context, they are consistent with similar studies conducted for other provinces. For instance, in Elazığ, the theoretical biomass energy potential from field crops between 2000 and 2010 was calculated as 158.948MW, with cereals contributing the largest share at 132.083 MW [21]. In Iğdır, the agricultural biomass energy potential for the 2009–2013 period was found to be 639.000 TOE, representing about 0,3% of Turkey's total biomass energy potential [18]. Likewise, in Kars, a study reported that the total annual biomass production was approximately 1,56 million tons, which could potentially yield 361.488 MWh of electricity [22].

In conclusion, the findings of this study demonstrate that Muş province has a highly promising agricultural biomass energy potential compared to similar regions. The province's substantial cereal cultivation and animal husbandry activities position it as a strategically important region for contributing to both regional development and the national renewable energy strategy.

Table 7. Total biomass energy potential from field products in Muş province between 2020-2024

	Biomass Energy Potential (MW)					Total
	2020	2021	2022	2023	2024	
Cereals	17.655,44	19.600,55	20.753,84	23.853,32	23.659,16	105.522,31
Forage Crops	7.869,94	7.841,90	11.219,58	10.784,54	14.732,33	52.448,30
Industrial Plants	872,18	1.023,23	892,77	1.689,38	1.539,07	6.016,63
Oilseeds	336,48	380,35	559,22	456,41	597,25	2.329,70
Legumes	393,76	422,85	433,53	572,49	52,06	1.874,69
Tuberous Plants	16,77	18,78	4,26	5,06	28,47	73,35
Total	27.144,58	29.287,66	33.863,20	37.361,21	40.608,33	168.264,98

Table 8. Total biomass energy potential from field products in Muş province between 2020-2024 on a district basis

	Biomass Energy Potential (MW)						Total
	Bulanık	Hasköy	Korkut	Malazgirt	Central	Varto	
Cereals	24.632,79	1.437,15	6.598,80	39.467,78	29.646,79	3.739	105.522,31
Legumes	77,28	33,55	62,58	133,27	1.534,26	33,76	1.874,69
Forage Crops	7.308,33	2.465,12	8.626,55	3.434,35	19.279,43	11.334,52	52.448,30
Industrial Plants	954,33	163,49	202,57	1.550,46	3.145,77	0	6.016,63
Oilseeds	323,45	0	0	102,47	1903,78	0	2.329,70
Tuberous Plants	20,54	0	0,34	0	52,47	0	73,35
Total	33.316,72	4.099,31	15.490,83	44.688,34	55.562,50	15.107,28	168.264,98

Acknowledgement

The author thanks the referees and journal boards of *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The author reports no conflict of interest relevant to this article.

Research and Publication Ethics Statement

The author declared that they complied with the scientific, ethical and citation rules of the *International Journal of Pure and Applied Sciences* throughout the entire process of the study.

References

- [1] Bulut, A.P. (2025). Evaluation and digital mapping of agricultural and animal waste as sources of biomass energy in Turkey. *Biofuels*, 16(2), 121-129. doi:[10.1080/17597269.2024.2424033](https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2424033)
- [2] Kant, G., Hasan, A., Yadav, P., Pandey, A., Srivastava, S. (2025). The generational shift in biofuels: A path toward sustainable energy solutions. *Biomass and Bioenergy*, 196, 107757. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107757>.
- [3] Aridi, R., Aridi, M., Pannier, M.-L., Lemenand, T. (2025). Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with various renewable energy sources. *Energy*, 320, 135139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135139>
- [4] El-Araby, R. (2024). Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17(1), 129. doi:[10.1186/s13068-024-02571-9](https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9).
- [5] Sevgili, S. and Nacar Koçer, N. (2023). Elazığ İli'nde Bitkisel Kökenli Tarımsal Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi Amacıyla Değerlendirilmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1(1), 51-64.
- [6] Avcıoğlu, A.O., Dayıoğlu, M.A., Türker, U. (2019). Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy*, 138, 610-619. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.053>.
- [7] McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- [8] Field, C.B., Campbell, J.E., Lobell, D.B. (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(2), 65-72. doi:[10.1016/j.tree.2007.12.001](https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.12.001).
- [9] Xu, C., Liao, B., Pang, S., Nazari, L., Mahmood, N., Tushar, M.S.H.K., Dutta, A., Ray, M.B. (2018). 1.19 Biomass Energy. Dincer, I. (ed.), *Comprehensive Energy Systems*, pp. 770-794, Elsevier, Oxford. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00121-8>
- [10] Islam, N.F., Gogoi, B., Saikia, R., Yousaf, B., Narayan, M., Sarma, H. (2024). Encouraging circular economy and sustainable environmental practices by addressing waste management and biomass energy production. *Regional Sustainability*, 5(4), 100174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.regsus.2024.100174>.
- [11] Balakrishnan, D., Sharma, P., Bora, B.J., Dizge, N. (2024). Harnessing biomass energy: Advancements through machine learning and AI applications for sustainability and efficiency. *Process Safety and Environmental Protection*, 191, 193-205. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.08.084>.

- [12] IRENA, I., “Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2024”, International Renewable Energy Agency, United Arab Emirates, Retrieved from <https://coilink.org/20.500.12592/w0vtbgc> on 21 Apr 2025. COI: [20.500.12592/w0vtbgc](https://coilink.org/20.500.12592/w0vtbgc).
- [13] Ersoy, A.E. and Ugurlu, A. (2024). Bioenergy's role in achieving a low-carbon electricity future: A case of Türkiye. *Applied Energy*, 372, 123799. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123799>
- [14] Muş İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, “2021 Yılı Brifing”. URL: <https://mus.tarimorman.gov.tr/Link/24/Faaliyet-Raporlari>
- [15] Baytar, İ. and Doğan, M. (2021). Muş İlinde Tarım ve Hayvancılık Faaliyetleri. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, 4(2), 302-320. doi: [10.33712/mana.943607](https://doi.org/10.33712/mana.943607).
- [16] Muş Vakfı, “Muş Coğrafi ve Ekonomik Yapısı”, 2025. <https://musvakfi.org.tr/ilimiz-tr-1063.htm>
- [17] Kurt, G. and Nacar Koçer, N. (2010). Malatya ilinin biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 26(3), 240-247.
- [18] Kuş, E., Yıldırım, Y., Çokgez Kuç, A., Demir, B. (2016). Iğdır İli Tarımsal Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Eşdeğeri. *Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.*, 6(1), 65-73.
- [19] Topal, M. and Topal, E. İ. A. (2012). Ürün Bitkilerinden Yenilenebilir Enerji Kaynağı Biyokütle Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi: Afyonkarahisar İli Örneği (2006-2010). *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 1-11. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/1596/19828>.
- [20] TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), 2024. <http://www.tuik.gov.tr>
- [21] M. Topal and Topal, E. İ. A. (2012). Elazığ İli Biyokütle Enerji Potansiyeli Üzerine: 2000–2010. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 3, no. 2, pp. 21–30.
- [22] M. Demir. (2017). Kars ilinin biyokütle enerji potansiyeli ve kullanılabilirliği. *Türk Coğrafya Dergisi*, no. 68, pp. 31-41. doi: [10.17211/tcd.286858](https://doi.org/10.17211/tcd.286858).

Araştırma Makalesi

TiB2-VC Tozu ile Kaplanan St52 Çeliğinin Mikroyapı ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Musa Kılıç¹ , Anıl İmak^{2,*}  ve İhsan Kırık³ 

Gönderim: 27.05.2025

Kabul: 04.06.2025

¹Kaynak Teknolojisi Programı, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; musa.kilic@batman.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye; aimak@bingol.edu.tr

³Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye;

ikirik@bingol.edu.tr

*Sorumlu yazar

Özet: Çeliklerde aşınmaya bağlı olarak zamanla hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar kaplama yöntemleri ile giderilebilir. Bu çalışmada yüzey aşınma direnci düşük St 52 çelik yüzeyi TiB2 matris içerisinde ağırlıkça %1 ve %5 VC (Vanadyum Karbür) ilave edilerek hazırlanan TiB2-VC karışım tozu kullanılarak TIG(Tungsten Inert Gas) yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama ve alt tabaka arasında mükemmel bir ara yüz oluşması metalurjik olarak iyi bir bağlanmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Oluşan karbür ve borür fazlarının sayesinde mikrosertlik değeri ve aşınma direnci artmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde C2 numunesinde kaplama bölgesinde 1291 HV0.5, C1 numunesinde ise kaplama bölgesinde 1193 HV0.5 ölçülmüştür. Aşınma direnci mikrosertlik artışı ile bağlantılı olarak en düşük C2 numunesinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: St52; TIG; TiB2-VC; mikroyapı; aşınma

Research Article

Investigation of Microstructure and Wear Behavior of St52 Steel Coated with TiB2-VC Powder

Abstract: In steels, damage occurs over time due to wear. These damages can be repaired using coating methods. In this study, the surface of St 52 steel, which has low wear resistance, was coated using the TIG (Tungsten Inert Gas) method with a TiB₂-VC mixed powder. This powder was prepared by adding 1% and 5% VC into a TiB₂ matrix. A perfect interface formed between the coating and the substrate, indicating a good metallurgical bond. Due to the formation of carbide and boride phases, microhardness and wear resistance increased. In microhardness measurements, the coating region of sample C2 had a value of 1291 HV0.5, while the coating region of sample C1 showed 1193 HV0.5. As a result of the increase in microhardness, the highest wear resistance was obtained in sample C2.

Keywords: St52; TIG; TiB2-VC; microstructure; wear

1. Giriş

Teknolojinin hızlı gelişmesine bağlı olarak hammaddeye ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Ancak dünyamızda kaynakların sınırlı olması ve artan nüfus yoğunluğuna bağlı olarak giderek azalması daha ergonomik malzemelerin üretim ve imalatını zorunlu bir hale getirmiştir. Makine imalat endüstrisinde makine ve parçalarının kullanıldıkları süre ve ortama bağlı olarak mekanik (aşınma, yorulma) ve kimyasal(korozyon) tahribatlar yaşanabilmektedir.

Metal yüzeylerinde meydana gelen bu tahribatları minimum düzeye indirmek için gelişen yüzey mühendisliği metal yüzeylerinde metal matris kompozit oluşturarak sert, aşınma ve korozyona dirençli yüzeyler ve alt tabakanın ise sünek ve yeterli mukavemete olması istendiğinde tercih edilmektedir [1].

Yüzey modifikasyon tekniği ile aşınma, korozyon, yorulma direnci iyi ve daha iyi mekanik özelliklere sahip yüzeyler elde etmek metal yüzeylerinde MMK (metal matrisli kompozitler) kaplamalar oluşturmak için etkili ve düşük maliyetli yöntemdir[2], [3].

MMK kaplamalar oluşturmak için TRD, HVOF, plazma sprey ve lazer yöntemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4]-[7]. Diğer yöntemlere kıyasla TIG yöntemi ile kaplama işlemi donanımının yaygın olması, ekipman maliyetlerinin düşük olması, aynı zamanda kaplama kalınlığı, kimyasal bileşimi ve mekanik özelliklerinin kontrolünün kolay olması ve metalurjik olarak alt tabakaya iyi bağlanması kullanımını yaygınlaştırmıştır. TIG kaplama yönteminde malzemelerin üst kısmına açılan kanala toz karışımlarının yerleştirildikten sonra ergiterek yüzey özelliklerinin artırıldığı ayrıca diğer seramik kaplama yöntemleri ile zor olan kaplama işlemleri bu yöntem ile kolaylıkla yapılabilmektedir [8]-[10].

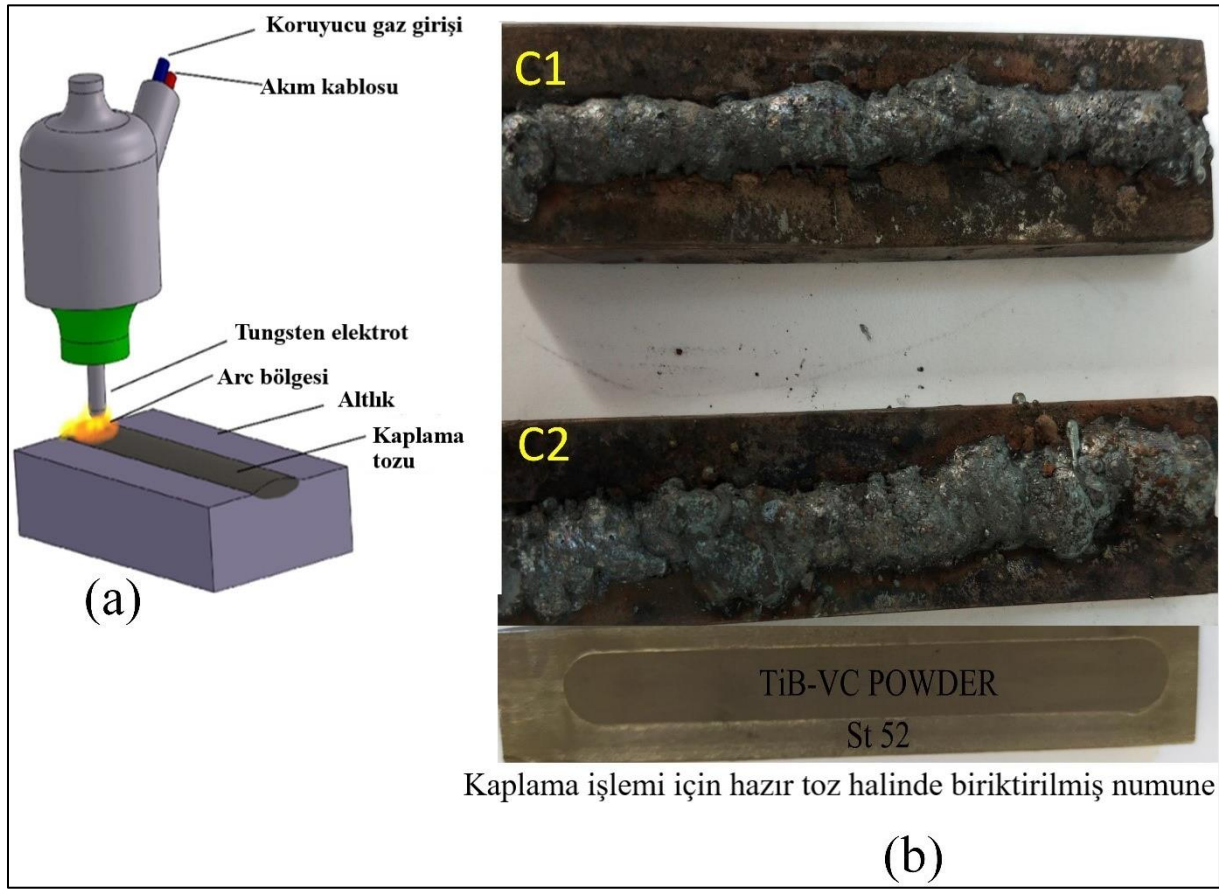
Sert karbür (VC, SiC, B4C) ve borürler(TiB2) alt tabaka yüzeylerine ilave edilerek mikroyapı ve mekanik özellikler olarak yüksek sertlik, yüksek tokluk ve aşınmaya dirençli MMK kaplamalar oluşturulabilir [11]-[13].

Bu takviyelerden VC ve TiB2 yüksek ergime noktası, yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, iyi termal ve elektriksel iletkenliğine sahip karakteristik özelliklerinden dolayı metal yüzeylerinde kaplamalar oluşturmak için araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [14]-[16].

TIG kaplama kullanılarak orta karbonlu çeliğin farklı türde (VC ve TiB2) tozların daha önce herhangi bir araştırmaya konu olmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda farklı türde ve özelliklere sahip tozların çelik yüzeyine kaplanması ve mikroyapı ile mekanik özelliklerinin araştırılması bu çalışmaya amaç olmuştur.

2. Materyal ve Metot

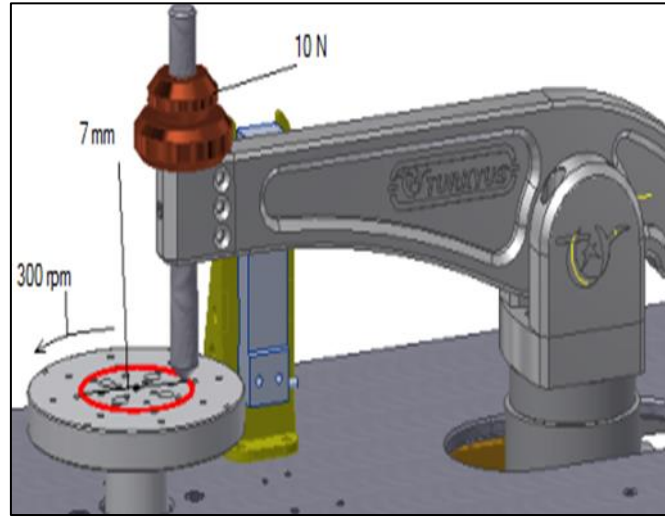
Bu çalışmada orta karbonlu çelik yüzeyi TIG yöntemi kullanılarak TiB2-VC tozu ile kaplanmıştır. St52 çeliği 100x25x10mm ebatlarında kesilerek dikey freze ile yüzeyinde 6 mm genişliğinde 1.5 mm derinliğinde kanal açılmıştır. Kanal açma işlemi sonrası alt tabaka yüzeyi kir ve empürilerden temizlemek için alkol banyosuna daldırılmıştır. Kaplama tozu olarak Titanyum Borür (TiB2) < 10 µm; CAS-12045-63-5; Parti No: 336289-50G Sigma Aldrich firmasından, VC (ortalama tane boyutu ~45 µm) tozu BC firmasından temin edilmiştir. TiB2 matris içeresine ağırlıkça %1 (C1) ve %5 (C2) VC tozu ilave edilerek karıştırma cihazında homojen bir karışım elde etmek için karıştırılmıştır. Karışım tozlar alkol ile bulamaç haline getirilerek oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra alt tabaka yüzeyine yatırılmıştır. TIG (Oerlicon-Magic Wave 2200) kaynak makinesi ve % 2 toryumlu tungsten elektrod yardımıyla kaplama işlemi 90 A akım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de TIG kaplama yönteminde ait şematik resim, kaplama öncesi ve kaplama sonrası numunelere ait resim verilmiştir.



Şekil 1. TIG kaplama yöntemine ait şematik resim, kaplama öncesi (a) ve kaplama sonrası numunelere ait resim (b).

Kaplanan numuneler kaplama yüzeyine dik doğrultuda kesildikten sonra bakalite alınmıştır. Kesilen numuneler kaba ve ince parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Kaba zımparalama işleminde numuneler farklı boyutlardaki SiC zımparalar ile hazırlanmıştır. İnce parlatma işleminde ise 1 μ elmas pasta ile parlatılmıştır. Kaplama ile altlık arasında oluşan mikroyapı ve yapısal geçişleri tespit etmek için Nikon TESCANA MIRA3 XMU marka optik mikroskop ve enerji dispersif spektrometri (EDS) cihazı kullanılmıştır. XRD analizinde ise 20–90 ° tarama aralığı, 0.02 ° adım boyutu ve dakikada 10 ° 'lik bir tarama hızı göz önüne alınarak cobalt hedefte ($\lambda = 1.79026 \text{ \AA}$) Rigaku RadB-DMax II difraktometre analizleri yapılmıştır. Kaplamanın mikrosertlikleri 10 saniye süreyle 50 gf yük altında, Future Tech FM-700 mikrosertlik test cihazı kullanılarak 9 noktadan ölçülmüştür.

Numuneler Şekil 2'de verilmiş olan Turkey Podwt marka pin-on disk yardımıyla aşınma işlemine tabii tutulmuştur. Aşınma parametreleri daha önceki çalışmalar dikkate alındıktan sonra uygulanan yük 15 N, kayma hızı 0,4 m/s seçilmiş olup ön deneyler yapıldıktan sonra seçilmiştir.



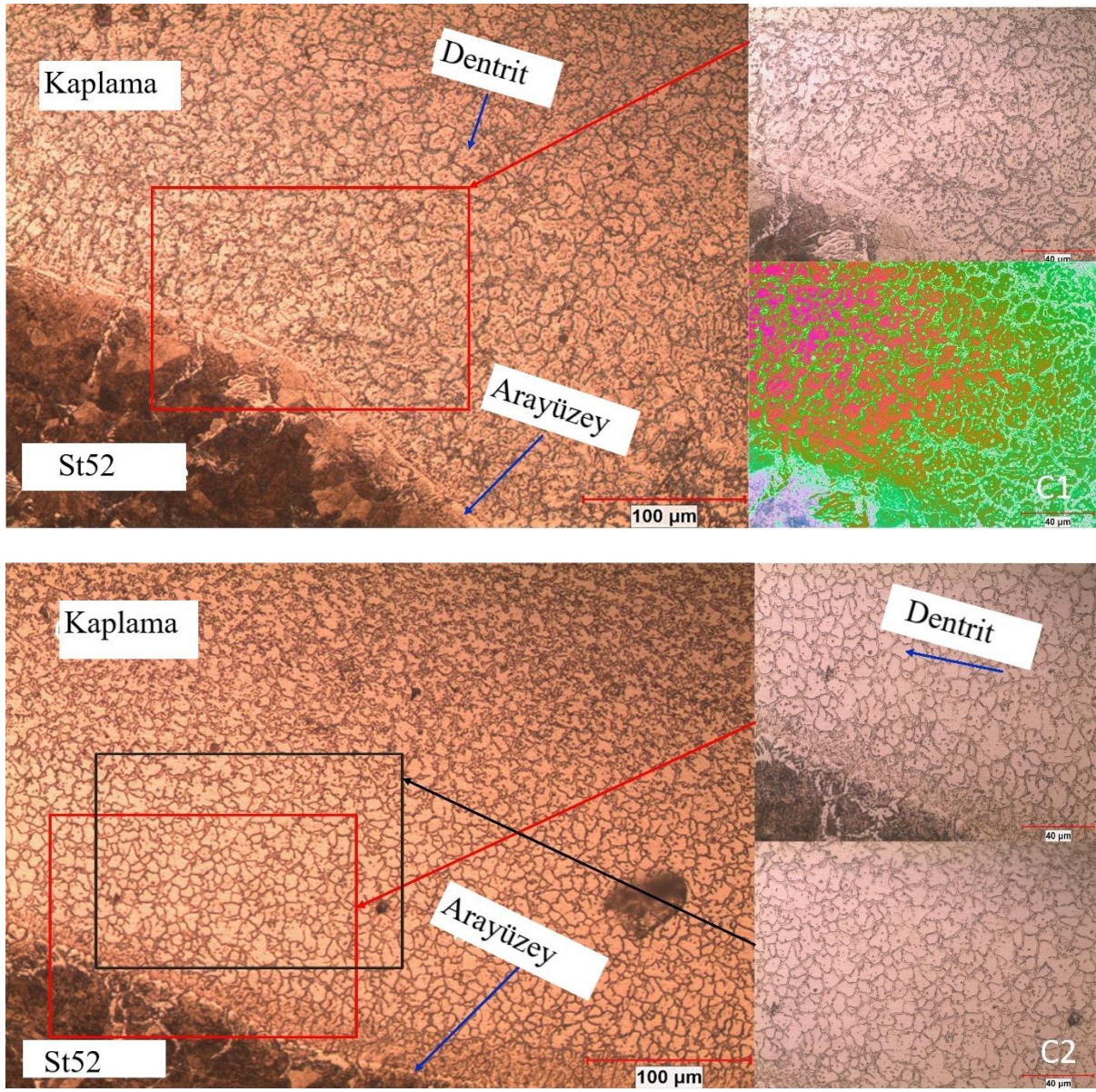
Şekil 2. Turkyus Podwt marka pin-on disk aşınma cihazı şematik resmi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Optik Analizi

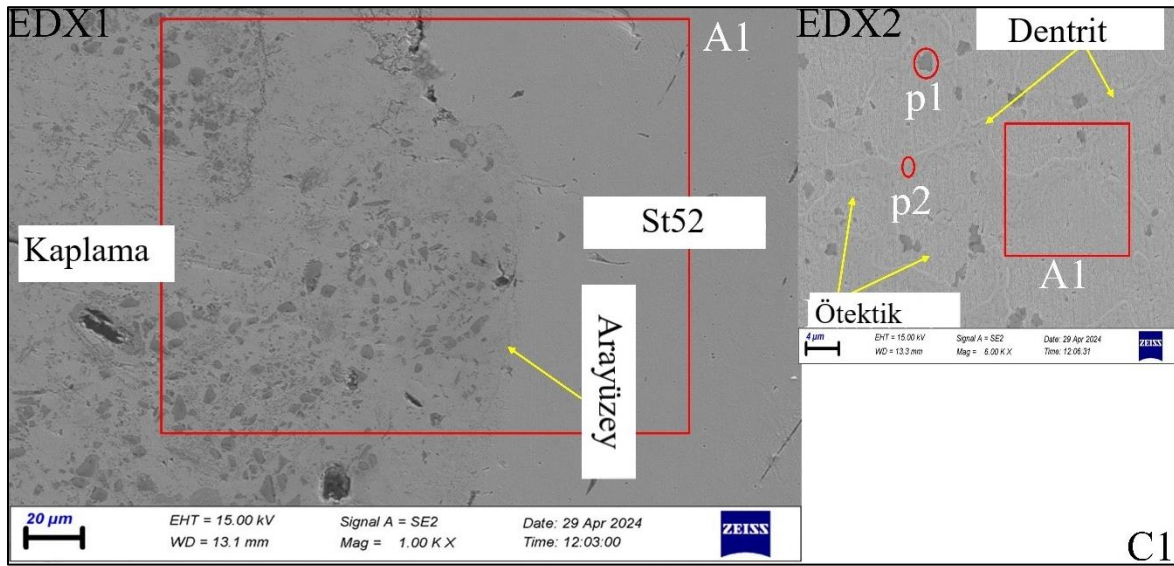
TiB-VC tozları kullanılarak ST52 yüzeyi TIG(Tungsten Inert Gas) yöntemi kullanılarak yüzey modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzey modifikasyonu yapılan numunelere ait optik resimleri Şekil 3'te verilmiştir. C1 numunesine ait optik mikroyapı resiminde üç bölgenin varlığı görülmektedir. Bu bölgeler arayüzey, alt tabaka bölgesi ve kaplama tabakasından oluşmaktadır. Arayüz bölgesinin düz bir bant şeklinde ilerlediği görülmüş ve hiçbir gözenek ve çatlak gözlenmemiştir. Alt tabaka bölgesinin feritik ve perlitik yapıdan oluştuğu gözlenmiştir. Kaplama bölgesi ise dendirit ve ötektik yapıdan oluştuğu özellikle arayüz bölgesinin hemen altındaki kaplama bölgesinde sütunsal dendritler gözlenirken, kaplamanın üst kısmına doğru ise daha çok hücresel yapı sergilemiştir. Daha çok kaynak ergitme yöntemlerinden lazer ışını, elektron ışını, TIG vb. ile yapılan yüzey modifikasyon çalışmalarında dentritik yapılar arkın başlamasıyla birlikte kaplama tabakasından oluşan sıvı ergiyik banyosunun hızlı bir şekilde katılaşması sonucu oluşur.

Şekil 3'te C2 numunesinde ise C1 numunesinde olduğu gibi alt tabaka feritik ve perlitik yapılarından oluşmuştur. Kaplama tabakasından herhangi bir çatlak ve gözenek vb. olumsuzluklar gözlenmemiştir. Arayüz bölgesinden kaplama tabakasından orta kısmına kadar hücresel dendritler yoğun oluşurken kaplama bölgesinin üst kısmında ise dağınık bir yapı sergilemiştir. Arayüz bölgesi düzgün bir bant şeklinde ilerlemiştir. Bu alt tabakaya yerleştirilen tozların erimesi için TIG yöntemi ile başlatılan ark yeterli bir enerji girisi sağlayarak tozları erittiği ve kaplama tabakasından alt tabakaya nüfuz ederek düzgün bir bağlanma sağlamıştır.



Şekil 3. Kaplamalara ait mikroyapı resimleri

3.2. SEM-EDS Analizi



Şekil 4. %1 VC takviyeli kaplama numunesi SEM ve EDX görüntüleri

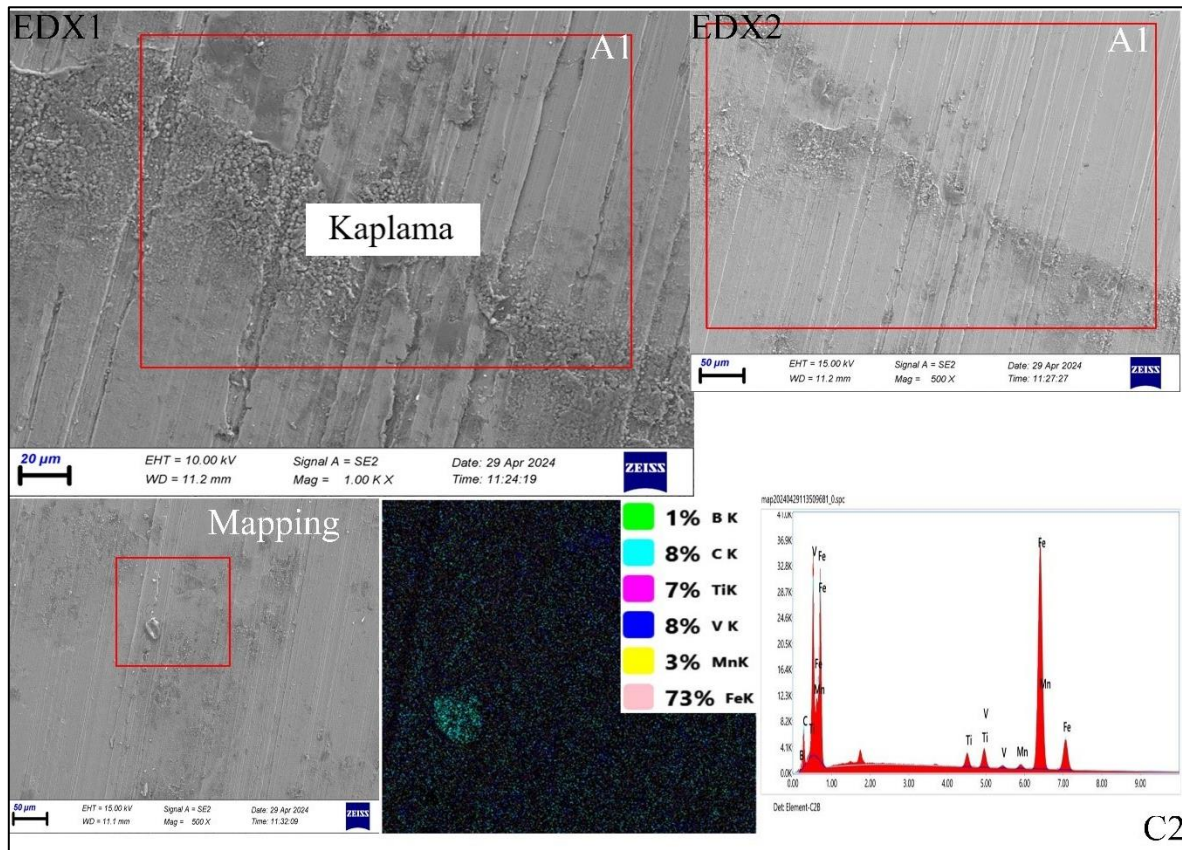
Tablo 1. %1 VC takviyeli kaplama numunesine ait EDX sonuçları

Numune	Spectrum	Kimyasal Bileşimi %wt.					
C1		B	C	Ti	Mn	Fe	V
(EDX1)	A1	3.88	3.16	14.17	-	77.78	1.01
C1 (EDX2)	P1	1.20	12.25	71.31	-	15.25	-
	P2	3.74	2.20	2.13	1.69	90.24	-
	A1	1.20	2.40	1.35	1.46	93.59	-

Kaplamalara ait SEM -EDS sonuçları Şekil 4, Şekil 5, Tablo 1 ve Tablo2’de verilmiştir. Kaplama tozunun erime sonrası hızlı soğumasıyla birlikte ara yüzey çizgisinin düzensiz bir şekil aldığı tespit edilmiştir(Şekil 4). Kaplama tabakası ve alt tabakanın belirgin bir şekilde ayrıştığı açıktır. Ara yüzey bölgesinin ise koyu gri partikül yoğunluğu olduğu ve bu partiküllerin alt tabakaya doğru yöneldiği gözlenmiştir. Ayrıca arayüz bölgesinin düzgün bir yapı sergilediği ve hat boyunca herhangi bir gözenek ve çatlak formunun olmadığı aşıkardır. Bu sonuca bağlı olarak kaplama ve alt tabaka arasında metalurjik bir bağın olduğu açıktır.

Kaplama tabakasında dendritik ve ötektik yapı sergilemiştir(Şekil 5). Metal ve alaşım elementleriyle yapılan kaplamalarda katılaşma ile birlikte en sık gözlenen mikroyapılardan biri dendritik yapılarıdır[17]. Bu yapılar soğutmanın hızlı bir şekilde gerçekleştiği durumlarda ince dendritik kollar yavaş soğutma durumunda ise kaba yapıli dendritler üreterek malzemelerin mikroyapısal özelliklerini etkilerler.

C1 nolu numuneye ait EDS sonuçlarında tüm elementlerin varlığı tespit edilmiş ancak alt tabakaya doğru daha fazla taramanın yapılması neticesinde Fe elementinin daha yoğun olduğu belirlenmiştir. Bu bölgede Fe elementi ile birlikte Ti, B, C ve V elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte aynı numunenin kaplama tabakasında alınan C2 nolu numunenin EDS sonuçlarında ise elementlerin oranları değişmiştir. Özellikle P1 noktasından alınan sonuçlarda Ti %71.31, C %12.25 gibi yüksek değerler elde edilmiştir. Tablo EDS sonuçlarında ise tüm elementlerin (V, Ti, C ve B) varlığının bulunduğu, bununla birlikte demirin daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Kaplama tabakasında bulunan partiküllülerin TiC ve TiB fazlarına işaret ettiği düşünülmektedir. EDS sonuçlarında görüldüğü gibi koyu gri dentritik yapıların her iki numuneye ait EDS sonuçlarında Ti, C elementleri yoğunken gri bölgelerin ise ötektik bölgelerinde Ti, C ve Fe yoğun elementlerde olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama bölgesinde meydana gelen bu karbürler mikrosertlik ve aşınma direnci gibi malzeme özelliklerini önemli bir şekilde etkilediği daha önce yapılmış olan çalışmalarda belirtilmiştir[18],[19]. Buytoz yaptığı çalışmada karbürlerin tipi (M7C3, TiC, VC), miktarı ve morfolojisi mikroyapıyı doğrudan etkilediğini belirtmiş ve bu etkiyi hem faz oluşumu hem de kaplama kalitesi açısından incelenmiştir. Ti ve V katkısı ile oluşturulan kompleks karbürler daha ince ve homojen yapı ile birlikte yüksek oksidasyon direnci ve dolaylı olarak sertliğe pozitif katkı sağladığından bahsetmiştir [20].



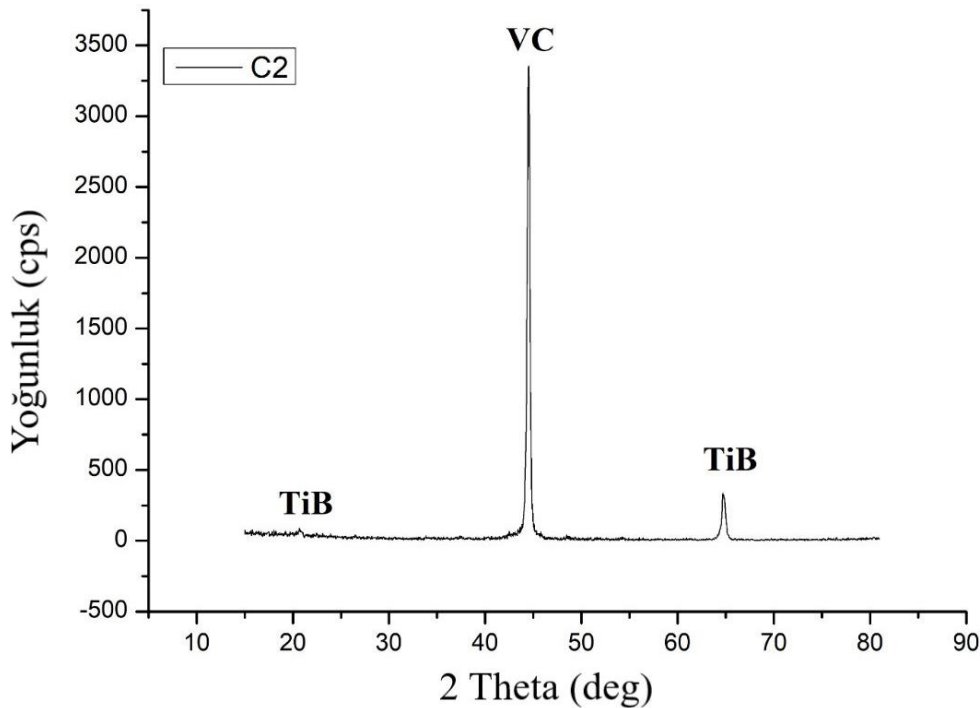
Şekil 5. %5VC takviyeli kaplama numunesi SEM ve EDS görüntüleri

Tablo 2. %5 VC takviyeli kaplama numunesine ait EDX sonuçları

Numune	Spectrum	Kimyasal Bileşimi %wt.					
		B	C	Ti	Mn	Fe	V
C2 (EDX1)	A1	2.11	8.27	1.61	1.31	83.86	2.84
C2 (EDX2)	A1	1.90	7.24	1.08	-	87.37	2.41

3.3. XRD Analizi

C2'ye ait XRD analiz sonucu Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda TiB fazının düşük pikler sergilediği en yüksek pike ise VC fazının sahip olduğu tespit edilmiştir. oluşmuştur. EDS analizlerinde C, B, Ti ve V elementlerinin varlığı yapı içerisinde bu tür fazların oluşmasını sağlayabilir. Arkın başlamasıyla birlikte kaplama tabakasındaki V elementinin ergiyik havuzu içerisinde alt tabakadan gelen C ile soğuma esnasında birleşerek VC fazının oluşmasına katkı sunduğu düşünülmektedir. Ke vd. [12] yapmış olduğu çalışmada benzer fazların yapıda oluştuğunu ifade etmiştir. Yapıda oluşan karbür ve borür esaslı fazlar kaplama tabakasının sertliğinin artmasını sağlayarak mekanik özellikle katkı sunar.

**Şekil 6.** C2 numunesine ait XRD analiz sonucu

3.4. Sertlik ve Aşınma Analizi

Numunelere ait sertlik ve aşınma grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda en yüksek sertliğin kaplama tabakasında, en düşük sertliğin ise alt tabakada elde edilmiştir(Şekil 7). Kaplama tabakasında ve ara yüz bölgesinde sertliğin artmasının temel nedeni olarak yapıda oluşmuş sert karbür ve borür fazlarından dolayıdır. Mikrosertlik ölçümlerinde elde edilen en yüksek sertlik değeri C2 numunesinde kaplama bölgesinde 1291 HV, ara bölgede 851 ve alt tabakada ise 431 HV olarak ölçülmüştür. C1 numunesinde ise kaplama bölgesinde 1193 HV, ara bölgede 695 ve alt tabaka bölgesinde ise 485 HV olarak ölçülmüştür.

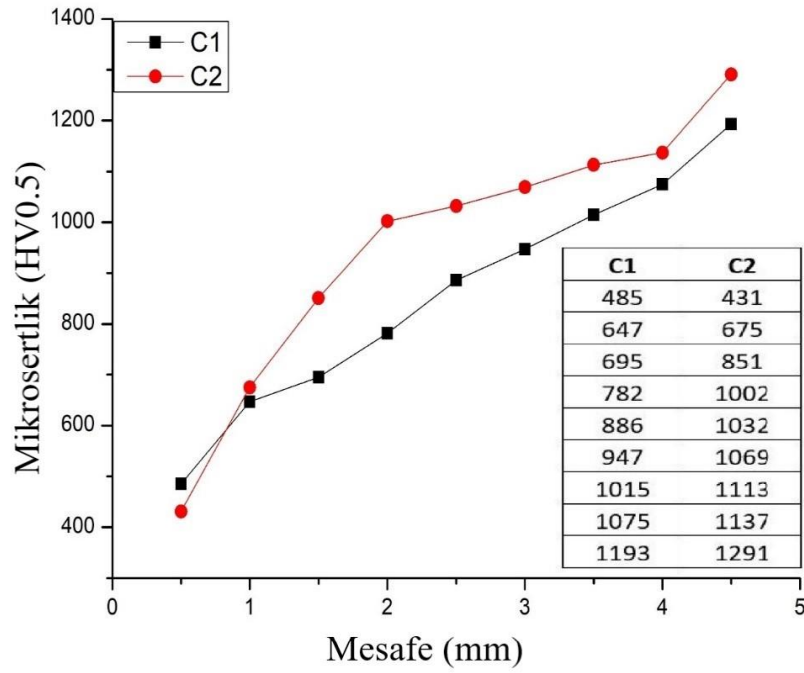
Shin vd. [21]Bu çalışmada, düşük karbonlu çelik alt tabaka ile TiC, TiB₂ ve VC seramik parçacıklarının yüzey alaşımlanması 1,4 MeV’lik HEEB kullanılarak gerçekleştirilmiştir. VC yüzey alaşımlı numune için mekanik özelliklerde dikkate değer bir artış gözlemlendi. Vanadyum karbürler düzgün bir şekilde oluşmuş olması, matrisin sertliğinin 2-3 katına kadar bir sertlik artışı ve en yüksek aşınma direnci ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir.

Litaratür araştırması değerlendirildiğinde kaplama bölgesinde sertliğin artışının benzer olduğu ve artan sertliğin karbür ve borür fazlarına atfedilebileceği ifade edilmiştir.

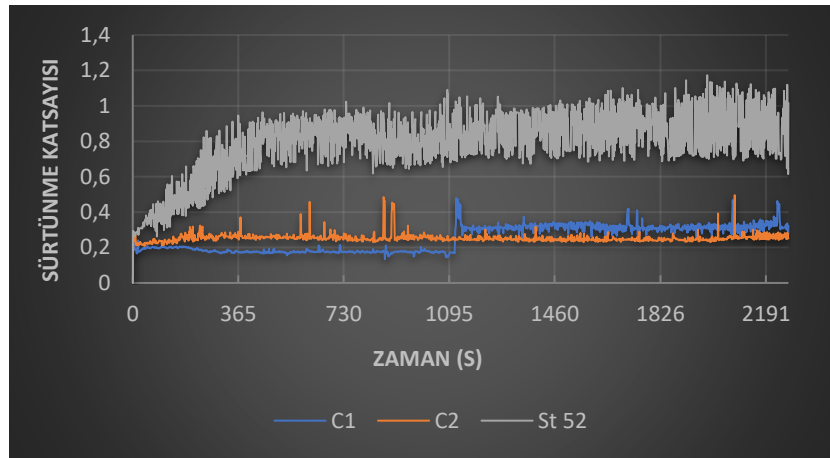
Şekil 8 aşınma diyagramında kaplama tabakasının daha düşük bir aşınma sergilediği aşınma direncinin arttığı alt tabakada ise aşınma direncinin düşük olduğu görülmektedir. Mikrosertlik sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde mikrosertliğin artmasına paralel olarak aşınma direnci artmıştır. Ancak aşınma direnci ile mikrosertlik arasında doğru orantı olsa da sürtünme katsayısı ile ters orantıya sahiptir. Sürtünme katsayısı düşük aynı zamanda sertliği yüksek olan kaplamaların aşınma direnci de yüksek olmaktadır. Bu sonuçla aşınma testinin sürtünme katsayısı ve mikrosertlik değerlerinin aşınma direncinin belirlenmesinde önemli etkenler olduğu düşünülmektedir.

Aramid vd. [22] lazer yöntemini kullanarak çelik alt tabaka yüzeyi FeCrV15 + TiB₂ kapladı. Tribolojik değerlendirmeler, tüm kaplamaların çelik alt tabaka ile karşılaştırıldığında daha iyi aşınma önleyici özellikler sergilediğini, karbür parçacıklarının artan yakınsamasına ve daha yüksek tane sınırı yoğunluğuna atfedildi.

VC ilavesi aşındırıcı aşınma direncini iyileştirmek için sertliği artırabilir ve ayrıca kimyasal afinit-eyi ve konsantrasyon gradyanını azaltarak yapışma aşınması ve difüzyon aşınmasını engelleyebilir[12,15]. C2 numunesinde sürtünme katsayısının düzgün bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Ancak C1 numunesinde belli bir zaman aralığında %50 oranında arttığı görülmektedir. Her iki numunede bazı bölgelerde piklerin yükseldiği bununda yüzeyde meydana gelen kopmalardan kaynaklandığı açıktır. VC ilavesi ile yapılan yüzey alaşımlama ile yüzey tabakasının sertliğini ve aşınma direncini belirgin şekilde iyileştirdiği görülmektedir. VC ve TiB₂ esaslı yapılan diğer çalışmalarda da mikrosertliğin arttığı aşınma direncinin de sertlik ile paralel yönde arttığı daha önce yapılan çalışmalarda diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir[23]-[29].



Şekil 7. Numunelere ait mikrosertlik ölçüm grafiği



Şekil 8. Kaplamalara ait aşınma grafiği

4. Sonuç

Bu çalışmada St 52 çelik yüzeyi TiB2-VC tozları kullanarak TIG yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama sonrası numunelere optik mikroskop, SEM-EDX ile mikroyapı, sertlik ve aşınma ile mekanik özellikleri incelenmiş ve karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. TIG yöntemi ile düzgün ara yüzeye sahip kaplamalar elde edilebilir.
2. Kaplamaların mikroyapıları dentritik ve ötektiklerden oluşmuştur.
3. Kaplama bölgesinde oluşan fazlar sert borür ve karbür fazlarından TiB2 ve VC oluşmuştur.
4. Kaplama bölgesinde gözenek ve çatlak gibi süreksizlikler oluşmamıştır.
5. Elde edilen sonuçlarda en yüksek sertliğin kaplama tabakasında, en düşük sertliğin ise alt tabakada elde edilmiştir. C2 numunesinde kaplama bölgesinde 1291 HV, ara bölgede 851 HV0.5 ve alt tabakada

ise 431 HV0.5 olarak ölçülmüştür. C1 numunesinde ise kaplama bölgesinde 1193 HV0.5, ara bölgede 695 HV0.5 ve alt tabaka bölgesinde ise 485 HV0.5 olarak ölçülmüştür.

6. C2 numunesinde sürtünme katsayısının düzgün bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Ancak C1 numunesinde belli bir zaman aralığında %50 oranında arttığı görülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirirler.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan ederler.

References

- [1] S. Islak, C. Özorak, C.T. Sezgin ve M. Akkaş, “Effect of boron on micro structure and microhardness properties of Mo-Si-B based coatings produced via TIG process”, *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 61, no. 3, pp. 1234–1241, Sep. 2016. doi: 10.1515/amm-2016-0248.
- [2] E. Ünal, A. Yaşar ve I.H. Karahan, “Ni-B/TiB₂ Elektrodolanmış kompozit kaplamaların korozyon dayanımlarının belirlenmesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 36, no. 3, pp. 709–718, 2021.
- [3] A.A. Olewi ve A.S.J. Jilabi, “The Effects of travel speed of tungsten inert gas cladding of tungsten carbide and nickel composites on the microstructure of stainless steel”, *Advances in Science and Technology. Research Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 123–131, 2024. doi: 10.12913/22998624/188642.
- [4] M. Kılıç ve E. Korkmaz, “Kaplama kalınlığına parametrelerin etkisi”, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 28–35, 2023.
- [5] S. Özel, “Microstructure and mechanical properties of HVOF sprayed WC-Co/NiCrBSi, Cr₃C₂ coatings on Al alloys”, *Materials Testing*, vol. 55, no. 9, pp. 694–700, 2013.
- [6] S. Özel ve E. Vural, “The microstructure and hardness properties of plasma sprayed Cr₂O₃/Al₂O₃ coatings”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 18, no. 11–12, pp. 1052–1056, 2016.
- [7] H. Durmuş, N. Çömez, C. Gül, M. Yuddaşkal, ve R.O. Uzun, “Ferromolibden ve ferrobor takviyeli lazer kaplamaların aşınma karakteristiği ve mikroyapısı”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 1009–1017, 2019.
- [8] S. Buytoz, M. Kilic, ve C. Carboga, “Microstructure and wear behaviour of Ni-based/TiC composite coating”, *International Journal of Surface Science and Engineering*, 16(1), 71-90, 2022.
- [9] A. Imak, I. Kirik, ve M. Kilic, “Comparison of microstructure and wear behaviors of PTA coated AISI 304 with alumina, boron and ekaboron III powder”, *Materials Testing*, 64(4), 541-549, 2022.
- [10] M. Aslam, G.K. Chandan, ve B.K. Kanchan, “Development of SiC ceramic reinforced composite interlayer cladding with AISI304 stainless steel wire on low carbon steel substrate using TIG cladding process”, *Silicon*, 15(18), 7733-7743, 2023.
- [11] M.S. Alam, ve A.K. Das, “Research progress in gas tungsten arc cladding on steel: a critical review”, in *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems: Select Proceedings of RAM 2021*, 859-867, Singapore: Springer, 2022, pp. 859–867. doi: 10.1007/978-981-16-7787-8_68.
- [12] D. Ke, Y. Pan, Y. Xu, P. Wang, ve R. Wu, “VC and Cr₃C₂ doped WCoB-TiC ceramic composites prepared by hot-pressing”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 68, pp. 24–28, 2017. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2017.08.041.

- [13] F. Gong, J. Zhao, G. Liu, ve X. Ni, "Design and fabrication of TiB₂-TiC-Al₂O₃ gradient composite ceramic tool materials reinforced by VC/Cr₃C₂ additives", *Ceramics International*, vol. 47, no. 14, pp. 20341–20351, 2021. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.04.042.
- [14] B. Nayebe, S.A. Delbari, M.S. Asl, E. Ghasali, N. Parvin, ve M. Shokouhimehr, "A nanostructural approach to the interfacial phenomena in spark plasma sintered TiB₂ ceramics with vanadium and graphite additives", *Composites Part B: Engineering*, vol. 222, Art. no. 109069, 2021. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109069.
- [15] N.K. Paraye, P.K. Ghosh ve S. Das, "A novel approach to synthesize surface composite by in-situ grown VC reinforcement in steel matrix via TIG arcing", *Surface and Coatings Technology*, vol. 399, Art. no. 126129, 2020. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126129.
- [16] F. Akkurt, E. Kalender, ve A. Yörükoğlu, "Üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramiği: Tityum diborür", *Journal of Boron*, vol. 4, no. 4, pp. 203–208, 2019. doi: 10.30728/boron.614471.
- [17] A. Imak, "Coating of AISI 304 stainless steel surface with addition of Cr₃C₂ to NiCrCo medium entropy alloy powder", *Materials Testing*, vol. 67, no. 6, pp. 1038–1045, 2025.
- [18] M. Yildirim Beltir, A. Imak, I. Kirik, A. Turgut ve V. Koc, "Microstructure and wear properties of NiTi-XSiC coating of AISI 1020 by SHS", *Materials Testing*, 67(2), vol. 67, no. 2, pp. 386–396, 2025. doi: 10.1515/mt-2024-0240.
- [19] F. Bulut, A. Imak ve I. Kirik, "Comparison of Ni-based SiC and B₄C reinforcements on a TIG-coated AISI 1040 steel", *Materials Testing*, vol. 67, no. 1, pp. 49–60, 2025.
- [20] S. Buytoz, "Effect on high temperature oxidation behavior of vanadium and titanium element in FeCrC coating", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 75, pp. 3149–3157, 2022. doi: 10.1007/s12666-022-02669-4.
- [21] K.S. Shin, J.H. Yoo, S.H. Lee, K. Kaneko ve Y. Tomokiyo, "Microstructural and mechanical properties of TiC, TiB₂ and VC with low carbon steel surface alloy fabricated by high energy electron beam irradiation", *In Materials Science Forum*, vols. 475–479, pp. 3927–3930, 2005.
- [22] B.P. Aramide, T. Jamiru, T.A. Adegbola, et al., "Influence of TiB₂ incorporation on microstructural evolution in laser-clad FeCrV15 + TiB₂ deposits", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, pp. 9861–9869, 2024. doi: 10.1007/s11665-024-09518-1.
- [23] Ü.A. Usca, S. Şap, M. Uzun ve Ü. Değirmenci, "Determination of mechanical and tribological properties of vacuum sintered hybrid reinforced Al-4Cu composites", *Journal of Composite Materials*, vol. 58, no. 26, pp. 2799–2815, 2024. doi.org/10.1177/00219983241283599.
- [24] S. Şap, Ü. Değirmenci, Ü.A. Usca ve M. Uzun M, "Tribological behaviors and mechanical properties of novel Al-5Cu hybrid composites under dry sliding conditions", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 15, pp. 7690–7704, 2024. doi: 10.1177/0954406224123456.
- [25] S. Şap, Ü. Değirmenci ve Ü.A. Usca, "Impact of boron nitride and silicon carbide on tribological properties of Al-3Gr-based hybrid composites", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, Art. no. 510, 2023. doi: 10.1007/s40430-023-04000-0.
- [26] S. Şap, "Mechanical and tribological behaviour of novel Al-12Si-based hybrid composites", *Materials Testing*, vol. 65, no. 4, pp. 560–577, 2023. doi: 10.1515/mt-2023-0075.
- [27] S. Şap, Ü.A. Usca, M. Uzun, K. Giasin ve D.Y. Pimenov, "Development of the hardness, three-point bending, and wear behavior of self-lubricating Cu-5Gr/Al₂O₃-Cr₃C₂ hybrid composites", *Journal of Composite Materials*, vol. 57, no. 8, pp. 1395–1409, 2023. doi: 10.1177/0021998323112345.
- [28] Ü. Değirmenci, "Mechanical and tribological behavior of a hybrid WC and Al₂O₃ reinforced Al-4Gr composite", *Materials Testing*, vol. 65, no. 9, pp. 1416–1436, 2023. doi: 10.1515/mt-2023-0213.
- [29] Ü.A. Usca, M. Uzun, M. Kuntoğlu, S. Şap, K. Giasin ve D.Y. Pimenov, "Tribological Aspects, Optimization and Analysis of Cu-B-CrC Composites Fabricated by Powder Metallurgy", *Materials*, vol. 14, no. 15, Art. no. 4217, 2021. doi: 10.3390/ma14154217.

Araştırma Makalesi

Öğütülmüş Pomza Taşı ile Stabilize Edilen Kumlu Zeminin Esnek Üstyapı Tasarımına Etkisinin Araştırılması

Tacettin Geçkil¹ , Talha Sarıcı²  ve Bahadır Karabaş^{3,*} 

Gönderim: 30.01.2025

Kabul: 10.06.2025

^{1,2,3}İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye,
¹tacettin.geckil@inonu.edu.tr, ²talha.sarici@inonu.edu.tr, ³karabasbaha@gmail.com

* Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışmada, öğütülmüş pomza taşı (PT) ile stabilize edilen kumlu yol taban zemininin, esnek üstyapı tabaka kalınlıkları ve ilk yapım maliyetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle zemin özelliklerinin belirlenmesine yönelik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, zemin örneklerine ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında PT ilave edilerek hazırlanan numunelere Standart Proktor deneyi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, serbest basınç deneyi için numuneler hazırlanmış ve bu numuneler 28 günlük kür süreci sonrasında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek basınç dayanımı %9 oranında PT içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. Ayrıca, katkısız kumlu zemin ile %9 PT katkılı numuneler, 28 günlük kür süresi sonunda Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı (CBR) deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, %9 PT katkısı ile CBR değerinde 2.57 katlık bir artış sağlandığını göstermiştir. Belirlenen CBR değerleri doğrultusunda, AASHTO 1993 esnek üstyapı tasarım esaslarına göre tabaka kalınlıkları hesaplanmış ve buna bağlı olarak maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, %9 oranında PT ile stabilize edilen zemin kullanımının ilk yapım maliyetlerinde %4.61 oranında tasarruf sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kumlu zemin, pomza taşı, stabilizasyon, esnek üst yapı

Research Article

Investigation of the Effect of Sandy Soil Stabilized with Ground Pumice Stone on Flexible Pavement Design

Abstract: In this study, the effects of ground pumice stone (PT) on the flexible pavement layer thicknesses and initial construction costs of a sandy subgrade were investigated. For this purpose, laboratory tests were first conducted to determine the geotechnical properties of the soil. Subsequently, Standard Proctor tests were applied to specimens prepared by adding PT at rates of 3%, 6%, 9%, and 12% by weight. Following this procedure, samples for unconfined compressive strength (UCS) tests were prepared and tested after a 28-day curing period. The results indicated that the highest compressive strength was observed in the mixture containing 9% PT. In addition, both the unmodified sandy soil and the sample containing 9% PT were subjected to the California Bearing Ratio (CBR) test after 28 days of curing. The results showed that the CBR value of the 9% PT-stabilized sample increased by a factor of 2.57. Based on the

determined CBR values, pavement layer thicknesses were calculated in accordance with the AASHTO 1993 flexible pavement design method, and cost analyses were conducted accordingly. The calculations revealed that stabilizing the soil with 9% PT resulted in a 4.61% reduction in initial construction costs.

Keywords: sandy soil, pumice stone, stabilization, flexible pavement

1. Giriş

Günümüzde artan ulaşım ihtiyaçlarının güvenli ve ekonomik olarak tasarlanmış karayolu vasıtasıyla giderilmesi inşaat mühendisliği konuları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Karayolları, farklı coğrafi ve tabiat koşullarında inşa edilmekte olup, yol güzergâhları ekonomik ve teknik analizler doğrultusunda belirlenmektedir. Tasarım sürecinde zemin durumu, trafik yükü, bölgesel ve ekonomik faktörler dikkate alınarak en düşük maliyetle en yüksek faydayı sağlayacak çözümler geliştirilebilmektedir. Ancak, taşıma gücü düşük zeminler ve bu zeminlerin iyileştirilmesi, tasarım sürecinde karşılaşılan temel zorluklardan biridir. Güvenli ve kesintisiz ulaşımı sağlamak için, yol üstyapılarının standartlara uygun şekilde tasarlanması ve zeminin teknik kriterlere uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Zemin stabilizasyonu [1-6], düşük taşıma gücüne sahip güzergâhlarda ekonomik ve güvenli karayolu projelerinin uygulanabilirliğini sağlayan önemli bir yöntemdir.

Taşıma kapasitesi yetersiz zeminlerin stabilizasyonu maksadıyla kireç [7], çimento [8], ve bitüm gibi malzemeler [9] kullanılmaktadır. Ayrıca, söz konusu katkı malzemelerin yanı sıra farklı katkı malzemeleri ve yöntemlerin [10-26] kullanımına yönelik çalışmaların sayısı gün geçtikçe arttığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmalar vasıtasıyla karayollarının daha ekonomik ve daha güvenli tasarlanmasının sağlanacağı değerlendirilmektedir.

Rahgozar ve arkadaşları [10], kil zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla çimento ve pirinç kabuğu külü kullanarak gerçekleştirdikleri serbest basınç deneyleri sonucunda, %4 çimento ve %10 pirinç kabuğu külü eklenmesinin taşıma kapasitesini artırdığını saptamışlardır.

Reddy ve arkadaşları [11], zemin stabilizasyonunu uçucu kül, metakaolin ve bunların kombinasyonlarıyla test etmişlerdir. Deney sonuçları, %9 uçucu kül, %12 metakaolin ve %8 uçucu kül + %6 metakaolin eklenmesiyle en yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiğini göstermiştir.

Geçkil ve arkadaşları [12,13], atık araç lastiklerinden elde edilen siyah karbon kullanarak killi kum zeminlerin stabilizasyonunu araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde %10 siyah karbon ilavesiyle 1, 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda CBR değerlerinde sırasıyla 1.28 kat, 1.77 kat ve 2.87 kat artış gözlemlenmiştir.

Perera ve arkadaşları [14], kil zeminlere farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15 ve %20) kırılmış cam ekleyerek bir dizi mekanik ve mikroyapısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, %10-15 oranında kırılmış cam ilavesi, serbest basınç dayanımı, CBR ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini; şişme ve büzülme potansiyellerini azalttığını ve kilin su tutma kapasitesini artırdığını belirlemişlerdir [14].

Bharti ve arkadaşları [15], siyah pamuklu zeminin bakır cürufu ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) bakır cürufu ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde modifiye Proktor testi, CBR, serbest basınç, likit limit ve plastik limit deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, %20 bakır cürufu içeren karışımın optimum stabilizasyon sağladığını belirlemişlerdir.

Domphoeun ve Eisazadeh [16], zeminin dayanım özelliklerini artırmak amacıyla pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç kullanarak stabilize etmişlerdir. Farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15 ve %20) pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde modifiye Proktor testi, serbest basınç testi, likit limit ve plastik limit deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, %20 pirinç kabuğu külü, %1 hindistan cevizi lifi ve %8 kireç içeren karışımın optimum stabilizasyon sağladığını belirlemişlerdir.

Pomza taşının öğütülmesi vasıtasıyla elde edilen katkı malzemesinin çeşitli zemin tiplerinin stabilizasyonu maksadıyla kullanıldığı [17-20] yapılan araştırmalarda kullanımın uygun olduğu görülmüştür.

Mesfun ve arkadaşları [17], şişme özelliğine sahip killi yol taban zeminin kireç ve pomza taşı tozu kullanarak stabilizasyonun araştırılması amacıyla çeşitli deneyler yapmışlardır. CBR deneyi neticesinde %7 kireç + %3 pomza taşı tozu içeren karışımda en yüksek dayanımın elde edildiğini belirlemişlerdir.

Fithria ve arkadaşları [18], yumuşak kilin pomza tozu ve odun kömürü tozu ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. %2 - %4 pomza tozu ve %15, %20, %25 odun kömürü tozu kullanılarak yapılan deneyler neticesinde, zemin örneklerinin fiziksel ve mekanik parametrelerinde olumlu değişikliklerin olduğunu tespit etmişlerdir. Serbest basınç dayanımlarındaki en büyük artışın %4 pomza tozu ve %25 odun kömürü tozu karışımından elde etmişlerdir.

Vekli ve Çadır [19], mermer tozunun ve pomza tozunun kil zemin üzerindeki iyileştirme etkisini araştırmak amacıyla, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında mermer tozu ve pomza tozu kullanılarak deneyler yapmışlardır. Mermer tozu ve pomza tozu ilavesinin, sıkıştırılabilirlik ve geçirgenlik gibi zemin özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Kullanılan katkılar ile zeminde arzu edilen iyileşmenin sağlandığı, en iyi mukavemet artışının %15 pomza tozu ilaveli karışımda elde edildiğini belirlemişlerdir.

Nasiri ve arkadaşları [20], petrolle kirlenmiş ince taneli killi zeminin uzun vadeli geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla pomza tozu kullanarak çeşitli deneyler yapmışlardır. Deneylerde %4, %7, %10 petrol konsantrasyonu ile kirlenilen zemin örneği, %5, %10 ve %15 pomza tozu kullanılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, 1 yıllık kür süresine sahip örneklerde %10 pomza tozunun zeminin serbest basınç dayanımını %370'e kadar artırdığını ve çatlamaya karşı duyarlılığı azalttığını belirlemişlerdir.

Yapılan literatür incelemesi neticesinde, bu çalışmanın öğütülmüş pomza taşı ile iyileştirilen kumlu yol taban zemininin, esnek üstyapı tabaka kalınlıkları ve ilk yapım maliyetleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı nadir çalışmalardan biri olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, bu çalışma ile öğütülmüş pomza taşının stabilizatör malzeme olarak kullanımının, son yıllarda alternatif ve farklı katkı malzemelerinin araştırılmasına yönelik çalışmalara önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu maksatla öncelikle zemin özellikleri, elek analizi, piknometre ve kıvam limitleri gibi deney yöntemleriyle belirlenmiştir. Daha sonra, katkı oranları ön deneyler ile tespit edilen, ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 PT katılarak hazırlanan karışım numunelerine standart proktor, serbest basınç ve CBR deneyleri uygulanmıştır. Söz konusu bu deneyler katkısız zeminler kullanılarak kontrol numuneleri kapsamında tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde esnek yol üst yapı tasarım tabaka kalınlıkları AASHTO 1993 yöntemiyle hesaplanmış ve belirlenen tabaka kalınlığı için maliyet analizleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kumlu Zemin

Çalışma kapsamında Malatya ilinden temin edilen kumlu zemine, ASTM C136/C136M-elek analizi deneyi [27] yapılarak zeminin dane çapı dağılımı tespit edilmiştir. Akabinde, zemin örneği ASTM D4318 - kıvam limitleri [28] deneyi uygulanmıştır. Daha sonra ASTM D854 - özgül ağırlık deneyine [29] göre özgül ağırlığın tespiti için piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Son olarak zeminin maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) değerlerini belirlemek için ASTM D698-Standart Proktor deneyi [30] uygulanmıştır.

Deneyisel çalışmalar sonucunda araştırılan zeminin kötü derecelenmiş kum (SP) ve AASHTO sınıflandırma yöntemine göre A-3 zemin sınıfına ait olduğu belirlenmiştir. SP zeminler genellikle tek boyuta yakın dane çaplarına sahiptir; büyük ölçüde farklı boyutta tanelerden oluşmazlar, A-3 zeminler ise genellikle ince daneli, temiz kumlardan oluşan zemin çeşitidir. Bu sınıftaki zeminler drenaj kapasitesi iyidir, ancak taşıma kapasitelerinden dolayı iyileştirilerek kullanılmalıdır[1]. Maksimum kuru yoğunluğunun 1.685 g/cm^3 , optimum su içeriğinin %18.5, dane yoğunluğunun 2.699 g/cm^3 , plastisite indisinin NP olduğu tespit edilmiştir. Zemin numunesi örneği Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Kumlu zemin numunesi görüntüsü

2.2. Öğütülmüş Pomza Taşı

Pomza taşı, silikat içeren bir kayadır. Çoğunlukla açık renklidir. Genellikle kirli beyaz, gri, kırmızı, kahverengi ve siyah renklerde olabilir. Bazik ve asidik karakterli olarak volkanik faaliyetler neticesinde meydana gelir. Bazaltik pomza koyu renkli, kahverengimsi siyahımsıdır. Dünyada en yaygın olarak görülen asidik pomza, kirli beyaz bir görünüme sahiptir. Pomza, çeşitli alanlarda kullanılan bir endüstriyel ham madde olup, özellikle inşaat, tekstil, tarım ve kimya sanayinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Fiziksel, kimyasal, mineralojik ve yapısal özellikleri sayesinde farklı sektörlerdeki kullanımı her geçen gün artmaktadır. Asidik özellik gösteren pomzalar daha fazla silis oranına sahiptir [31]. Bu nedenle çalışmada 1-70 mikron aralığında öğütülmüş pomza taşı kullanılmıştır. Öğütülmüş pomza taşının içeriği Tablo 1’de verilmiştir. Kumlu zemin ve öğütülmüş pomza taşı Şekil 2’de görülmektedir

Tablo 1. Öğütülmüş pomza taşının içeriği

Parametre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂
Değer (%)	70.14	16.44	1.01	0.74	11.17	0.2	0.3



Şekil 2. Kumlu zemin ve öğütülmüş pomza taşı numunesinin görünüşü

2.3. Standart Proktor, Serbest Basınç ve Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deneyleri

Standart Proktor deneyi ASTM D698'e göre [32], zeminin maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) belirlemek için yapılır. 105°C'de 24 saat boyunca kurutulan zemin numunesine

farklı su oranları eklenerek kalıba yerleştirilir ve tokmakla sıkıştırılır. Beş farklı su içeriğiyle yapılan denemeler sonucu elde edilen verilerle ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerleri belirlenir.

Serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına göre [33, 34], 28 günlük kür süresi sonunda katkısız zemin ve karışım numunelerinin dayanımını belirlemek için uygulanmıştır. Numuneler, 105°C’de kurutulmuş zemine su eklenerek hazırlanmış, Çapı 38mm, yüksekliği 76 mm boyutlarındaki kalıba yerleştirilip sıkıştırılmış ve kür süresi boyunca uygun koşullarda bekletilmiştir. Süre sonunda, numuneler cihaza yerleştirilerek basınç dayanımları ölçülmüştür.

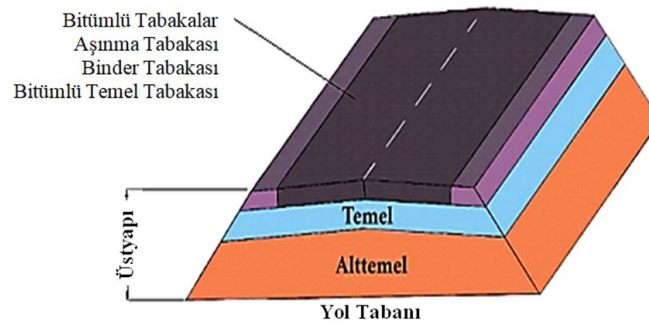
CBR deneyi, ASTM D1883-13 standardına göre [32, 35], ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerlerine göre hazırlanmış numunelere belirli kür süresi sonrası uygulanır. 1935 mm² alanlı piston, 1.27 mm/dk hızla zemine itilerek taşıma kapasitesi belirlenir. CBR değeri, 2,5 ve 5 mm penetrasyonlardaki yüklerin, standart kırmataşa uygulanan yüklere oranıyla hesaplanır. Numuneler üç tabakada sıkıştırılarak kalıba yerleştirilir, yoğunluğu kontrol edilir ve kür sonunda deney cihazına alınır. CBR hesaplamaları bu verilerle yapılır. Şekil 3’de CBR deneyinin hazırlanması, yükleme ve veri okuma aşamaları görülmektedir. Çalışmamız kapsamında söz konusu deneylerin uygulamasında ilgili standartlar esas alınmıştır.



Şekil 3. CBR deneyinin hazırlanması, yükleme ve veri okuma aşamaları

2.4 Esnek Üst Yapı Tasarımı

Esnek üstyapı tasarımı, asfalt beton kaplama, temel ve alt temel tabakalarından oluşmaktadır. Söz konusu tabakaların yapım aşamasında asfalt çimentosu bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Tasarım sürecinde; hizmet ömrü, tabaka kalınlıkları, trafik yoğunluğu, bölgesel faktörler, ekonomik koşullar ve zemin özellikleri gibi çeşitli unsurlar esas alınır [36]. Şekil 4’te esnek üstyapıdaki tabakaları göstermektedir.



Şekil 4. Esnek üstyapı kesit görünümü bitümlü tabakalar, temel, alt temel ve yol tabanı [3, 37]

Denklem (2.1) kullanılarak tabaka kalınlıkları hesabı AASHTO 1993 [36] esaslarına göre yapılmaktadır.

$$\log(T_{8.2}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \quad (2.1)$$

Burada;

M_R : Taban zemini için etkili elastisite modülü (psi),

P_0 : Başlangıç hizmet kabiliyeti indeksi,

$T_{8.2}$: Proje trafiğinin eşdeğer standart tek dingil yükü tekrerrür sayısı (8.2 ton),

SN : Üstyapı sayısı (üstyapı kalınlığını için),

Z_R : Standart sapma,

ΔPSI : Toplam hizmet kabiliyeti kaybı

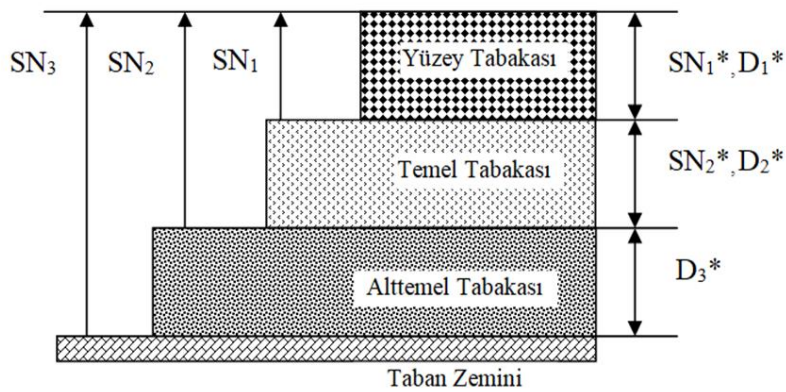
S_0 : Performans ve trafik tahmininin bileşik standart hatası,

P_t : Nihai hizmet yeteneği indeksini gösterir.

SN değeri denklem (2.1) kullanılarak belirlendikten sonra, tabaka katsayıları kullanılarak denklem (2.2) vasıtasıyla tabaka kalınlıkları hesaplanarak [36] tasarıma devam edilir

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3, \dots, a_i \times D_i \quad (2.2)$$

Burada, D_1 , D_2 , D_3 kaplama, temel ile alttemel tabaka kalınlıklarını; a_1 , a_2 , a_3 ise kaplama, temel ile alttemel tabakaları izafi mukavemet katsayılarını ifade eder. M_2 ve M_3 ise temel ve alttemel tabakalarının drenaj katsayılarını belirtir. Tabaka kalınlıklarının hesaplanmasının akabinde, SN^* değerleri ile tabaka kalınlıkları kontrolü Şekil 5'te [36] verilenlere göre hesaplanarak tespit edilir.



Şekil 5. Esnek üstyapı tasarımda hesaplanan tabaka SN 'leri

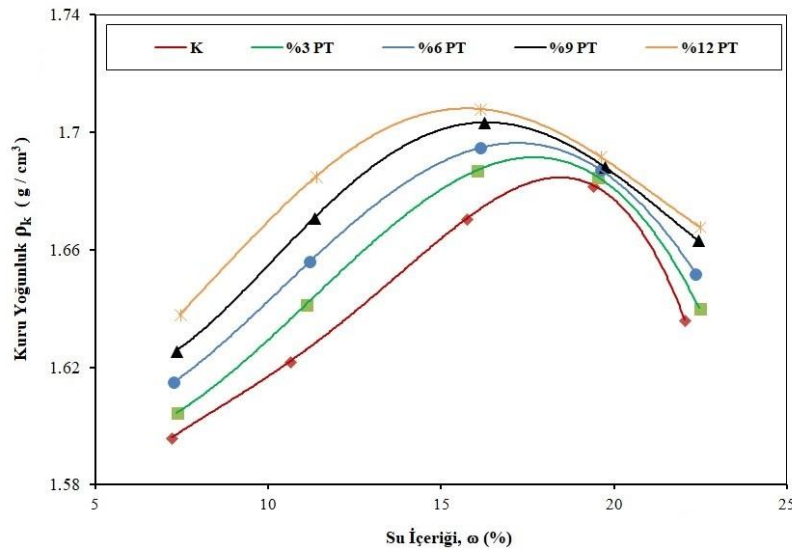
Burada; taban üzerine ihtiyaç duyulan (SN_3), alttemel üzerine ihtiyaç duyulan (SN_2), temel üzerine ihtiyaç duyulan üstyapı kalınlığı (SN_1), * : Kullanılan malzemeye göre değerleri [36] göstermektedir

3. Araştırma Bulguları

Öğütülmüş pomza taşı ile yol taban zemininin stabilizasyonunun esnek yol üst yapıya etkisinin araştırıldığı bu çalışmaya ait, deneylerin sonuçları aşağıda sunulmuştur.

3.1 Standart Proktor Deneyi Bulguları

Katkısız kumlu zemin (K) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 PT katkıli numunelere standart proktor deneyi uygulanmıştır. Katkısız zemin ve PT içeren karışımlar için 5 farklı su içeriğinde hazırlanan numuneler ile deney uygulanmıştır. Deneyler neticesinde belirlenen ρ_k ve ω (%) sonuçlarına göre Şekil 6'da çizilen kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Belirlenen ρ_{kmax} ve ω_{opt} sonuçları Tablo 2'de görülmektedir.



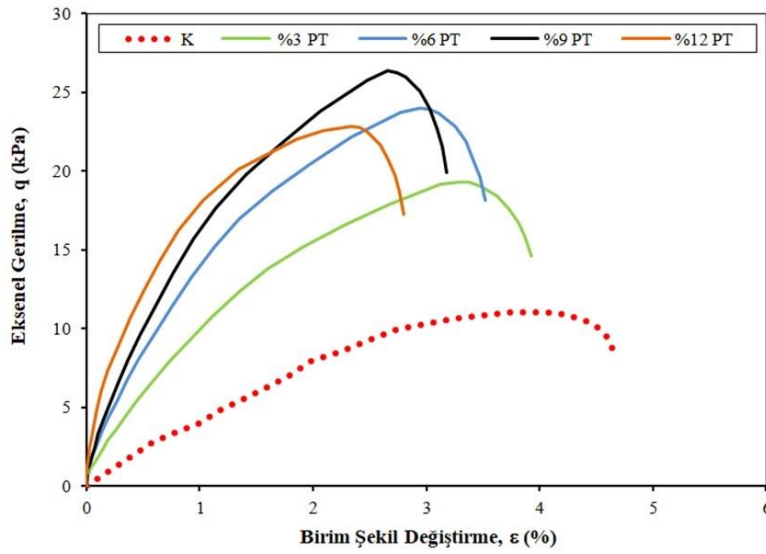
Şekil 6. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkıli karışımların standart proktor deneyine ait kompaksiyon eğrileri

Tablo 2. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkıli karışımların standart proktor deneyi sonuçları

Numuneler	ρ_{kmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)
K	1.685	18.50
%3 PT	1.691	17.78
%6 PT	1.697	17.07
%9 PT	1.703	16.35
%12 PT	1.708	15.64

3.2 Serbest Basınç Deney Bulguları

Katkısız kumlu zemin (K) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 PT katkıli serbest basınç deney numuneleri, belirlenen ρ_{kmax} ve ω_{opt} verileri esas alınarak hazırlanmıştır. Katkısız zemin ve PT içeren karışımlar için 3 farklı numune hazırlanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında saklanmıştır. 28 günlük kür süresi ardından serbest basınç deneyi uygulanmış ve değerlerin ortalaması alınmıştır. Katkısız kumlu zemin ve PT katkıli numunelerin eksenel gerilme (q) ile birim şekil değiştirme (ϵ) sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'de yenilme anındaki birim şekil değiştirme (ϵ_u) ve serbest basınç mukavemeti (q_u) değerleri görülmektedir.



Şekil 7. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı karışımların 28 günlük kür sonrası elde edilen q-ε grafiği

Tablo 3. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı karışımların 28 günlük kür sonrası elde edilen q_u - ϵ_u verileri

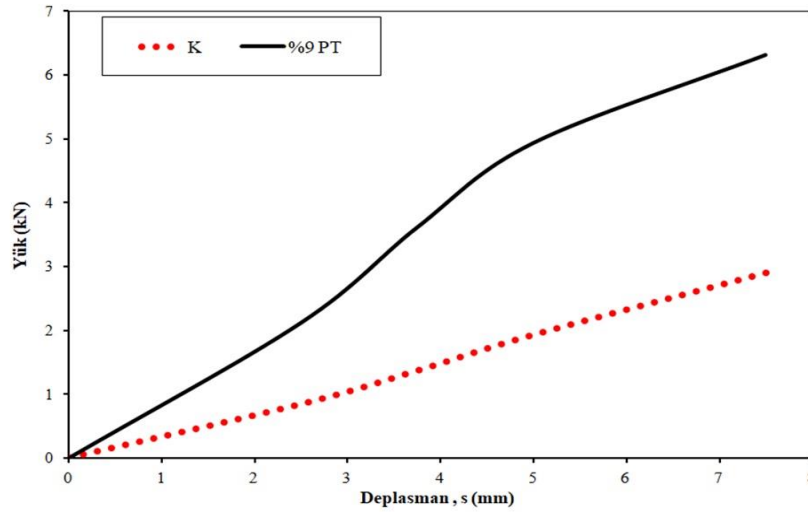
Test Numunesi	q_u (kPa)	ϵ_u (%)
K	11.03	3.98
%3 PT	19.31	3.28
%6 PT	23.97	2.94
%9 PT	26.33	2.66
%12 PT	22.80	2.34

3.3 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulguları

CBR deneyi kapsamında hazırlanan numuneler, katkısız kumlu zemin ve serbest basınç deney sonuçlarından tespit edilen optimum %9 PT'li karışım oranı esas alınarak hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numunelerinde ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerleri kullanılmıştır. Numuneler 28 günlük kür süresi boyunca oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyi yapılmıştır. CBR deneyinden tespit edilen yük - deplasman grafikleri Şekil 8'de görülebilmirken CBR değerleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı karışımların 28 günlük kür sonrası CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
K	6.36	9.65
%9 PT	16.02	24.75



Şekil 8. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı karışımların 28 günlük kür sonrası yük-deplasman ilişkisi

4. Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tasarım

Öğütülmüş pomza taşı ile yol taban zemininin stabilizasyonunun esnek yol üst yapıya etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, deneylerin sonuçlarının değerlendirilmesi ve tasarım çıktıları aşağıda sunulmuştur.

4.1 Standart Proktor Deneyi Bulgularının Değerlendirilmesi

Proktor deneyi sonuçları incelendiğinde; PT oranı arttıkça ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı, bu sonuçların literatür [18, 19, 22] ile farklılık göstermediği görülmüştür. Pomza taşının gözenekli yapıya sahip olması nedeniyle, su emme kapasitesi dane boyutunun artmasıyla birlikte artmaktadır [22]. Ancak pomza taşının dane boyutu azaldıkça su emme kapasitesinin azaldığı, pomza tozunun su emme kapasitesinin katkısız kumlu zeminden daha az olduğu görülmüştür. Bu düşüncemizin literatür [25] ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, pomza tozunun ince dane yapısının karışımda filler etkisi göstererek ρ_{kmax} değerinin artışına neden olduğu değerlendirilmektedir.

4.2 Serbest Basınç Deney Bulgularının Değerlendirilmesi

Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, katkısız kumlu zeminlerin serbest basınç mukavemet değerinin, PT'li karışımların mukavemet değerinden daha az olduğu, PT'nin karışımların mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir. En büyük mukavemet değerinin ise % 9 PT'li numunelerde tespit edilmiştir. Bu katkı oranında katkısız kumlu zemine göre serbest basınç mukavemet değerinin 2,39 kat arttığı tespit edilmiştir. PT katkısının mukavemet değerini arttırmasının literatür [18, 19, 22] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Numunelerde birim şekil değiştirmenin, PT miktarındaki artışla birlikte azaldığı ve bunun PT'nin sertleştirici etkisinden ileri geldiği değerlendirilmektedir. Bulunan sonucun, literatür [39] ile örtüştüğü görülmüştür.

4.3 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulgularının Değerlendirilmesi

CBR deney sonuçları incelendiğinde, PT'nin karışımların CBR değerini arttırdığı belirlenmiştir. CBR değerleri 2.5 mm ve 5 mm penetrasyon için sırasıyla %16.02 ve %24.75 olarak tespit edilmiştir. CBR değerinde katkısız kumlu zemine göre artış oranı 2.5mm ve 5 mm penetrasyon için sırasıyla 2.52 ve 2.57 kat olduğu belirlenmiştir. PT'li karışımların CBR değerinin katkısız numuneden daha yüksek

olduğu bu durumun literatürde [17, 22, 25,26] PT katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiği görüşü ile örtüştüğü belirlenmiştir.

Literatürde [17, 22, 23, 24], öğütülmüş pomza taşının yüksek oranda SiO₂ içermesi nedeniyle puzolanik bir karakter gösterdiği, ayrıca PT taneciklerin karışımların boşluklarını doldurma kapasitesine sahip olduğu, yapılan deneysel çalışmalar neticesinde belli oranın üstünde PT kullanılması dayanım artışına fayda sağlamadığı bilgisi mevcuttur. Çalışmamızda kullanılan PT'nin uygulanan deneyler neticesinde dayanımı arttırdığı, ayrıca karışımlardaki boşlukları doldurduğu, bu durumun karışımlardaki PT miktarının artması ile ρ_{kmax} değerlerinin artışı ile desteklendiği görülmüştür. Böylece, karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmede fayda sağladığı değerlendirilmiştir. Ancak, yapılan deneyler neticesinde, tespit edilen optimum PT oranından daha fazla PT ilave edilmesi, reaksiyona girmeden kalan PT'nin ve karışımdaki ince dane içeriğinin artmasına neden olmuş, bu yüzden karışımların dayanımını daha fazla artıramadığı düşünülmüştür.

4.4 Esnek Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

Esnek üstyapı tasarımı AASHTO 1993'te belirtilen esaslara uygun olarak, 28 günlük kür ardından belirlenen en yüksek CBR değerleri kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalarda, baz alınan CBR değerleri katkısız kumlu zemin için %9.65 ve %9 PT ilaveli karışım için %24.75'tir. Hesaplamalarda öncelikle yol taban zemininin esneklik modülü (M_R) hesaplanmıştır. M_R hesaplamalarında, AASHTO tarafından yayımlanan mekanik-ampirik teknik revizyonları içeren kaplama tasarım kılavuzu 3. baskısında MEPDG-3 2024 yılında [40] bulunan, M_R (psi)=2555(CBR)^{0.64} korelasyonu kullanılmıştır.

Katkısız zemin için M_R değeri 10902 psi (75483127 Pa) ve %9 PT'li karışım için M_R değeri 19920 psi (137376052 Pa) hesaplanmıştır. Tablo 4'teki veriler kullanılarak yol tabanı üzerine gereken SN₃ katkısız kumlu zemin için 22.50 inç (57.15 cm) ve %9 PT ilaveli zeminler için 18.03 inç (45.80 cm) hesaplanmıştır.

Tablo 5'te sunulan ve esnek kaplama hesabında kullanılan parametreler KGM (2008)'den [41] esas alınarak belirlenmiştir. Burada baz alınan otoyol 4 (2 x 2) şeritli, 20 yıl proje analiz süresinin olduğu, günlük trafiğin ilk yıl için kamyon 3760 adet, treyler 2116 adet, minibüs 5720 adet, otobüs 4672 adet, otomobil 6480 adet olduğu göz önüne alınarak, 200000000 olarak eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı esas alınmıştır. Söz konusu veriler 2023 Devlet Yolları Trafik Hacim Haritası verilerinden, Kayseri-Kırşehir karayolu trafik hacmine yakın değerler esas alınarak düzenlenmiştir.

Tablo 5. Esnek üstyapı tasarım parametreleri

Parametre	Tasarım Verileri
T _{8,2} , Eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı	200000000
P ₀ , Yolun ilk servis yeteneği	4.2
S ₀ , Toplam standart sapma	0.45
P _t , Yolun son servis yeteneği,	2.5
ΔPSI, Servis yeteneği indeksi,	1.7
Z _R , Güvenilirliğin standart normal sapması	-3.090

4.4.1 Tabaka Kalınlıklarının Hesaplanması

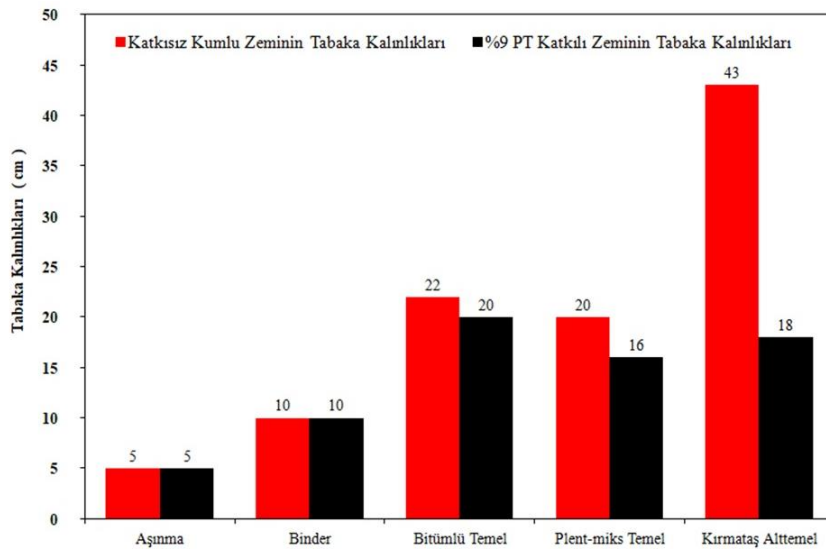
Katkısız kumlu zemin ve %9 PT katkılı zeminler için SN₃ değerleri kullanılarak ile 28 günlük kür uygulanarak elde edilen M_R değerleri ile esnek üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Tablo 6 ve 7'de seçilen tabaka kalınlıkları sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca Şekil 9'da tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 6. Katkısız kumlu zemin için hesaplanan tabaka kalınlıkları ve detayları

Tabaka İsmi	Di (cm)	ai	SN*= ai x Di	Açıklama
Aşınma	5	0.42	2.1	SN* > SN
Binder	10	0.4	4.0	(20.61>20.50)
Bitümlü Temel	22	0.36	7.92	Esnek Üstyapı tabaka
Plent-miks Temel	20	0.15	3.0	kalınlıkları uygun
Kırmataş Alttemel	43	0.13	5.59	seçilmiştir.

Tablo 7. %9 PT katkılı zemin için hesaplanan tabaka kalınlıkları ve detayları

Tabaka İsmi	Di (cm)	ai	SN*= ai x Di	Açıklama
Aşınma	5	0.42	2.1	SN* > SN
Binder	10	0.4	4.0	(18.04 >18.03)
Bitümlü Temel	20	0.36	7.20	Esnek Üstyapı
Plent-miks Temel	16	0.15	2.40	tabaka kalınlıkları
Kırmataş Alttemel	18	0.13	2.34	uygun seçilmiştir.

**Şekil 9.** Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması

Tabaka kalınlıklarının kontrolü, kırmataş alt temeli için CBR=50 ve plentmix kırmataş temeli için CBR=120 esas alınarak yapılmıştır. M_R değerleri sırasıyla $M_R=31241$ ve $M_R=54710$ psi olarak hesaplanmıştır. Tabakalar üzerinde gerekli SN değerleri, plentmix kırmataş temeli $SN_1 = 13.11$ cm, kırmataş alt temeli ise $SN_2 = 15.62$ cm olarak hesaplanmıştır. Yapılan kontrol neticesinde katkısız kumlu zeminde, plentmiks temeli için $14.02 > 13.11$ ve kırmataş alt temeli için $17.02 > 15.62$ olduğu, %9 PT zeminde, plentmiks temeli için $13.30 > 13.11$ ve kırmataş alt temeli için $15.70 > 15.62$ olduğu görül-

mehtedir. Kontrol neticesinde esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğu belirlenmiştir. %9 PT ile stabilize edilen zemin sayesinde, toplam tabaka kalınlığında %31 oranında azalma meydana geldiği hesaplanmıştır.

4.5 Esnek Üstyapı Tasarımının Ekonomik Analizi

Öğütölmüş pomza taşı ile stabilize zeminin esnek üstyapı maliyetine etkisinin incelenmesinde, ilk yapım maliyetleri ekonomik analizi Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 2024 yılı poz no'ları [42] kullanılarak yapılmıştır. Katkısız kumlu zemin ve %9 PT katkılı zeminlerin esnek yol üstyapı kalınlıklarının m² cinsinden birim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 8 ve Tablo 9'da sunulmuştur. Ayrıca, % 9 PT ile yol tabanının 15 cm kalınlığında stabilize edilmesindeki analizde; malzemenin taşınması, traktör riperi ile zeminin kabartılması, traktör buldozeri ile stabilizatör malzeme dağıtılması, greyder ile serme ve karıştırma, arazöz ile sulama, titreşimli silindirle ve lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması esas alınmıştır. PT'nin ton bazında şantiye mahalline teslim fiyatı göz önüne alınmıştır. Tablo 10'da stabilizasyonun m² birim maliyetleri verilmiştir. Ayrıca, katkısız kumlu zemin ile %9 PT ilave edilerek stabilize edilen zeminler için Şekil 10'da tabaka maliyetleri karşılaştırma grafiği görölmektedir.

Tablo 8. Katkısız kumlu zemin için tabaka kalınlıkları maliyetleri

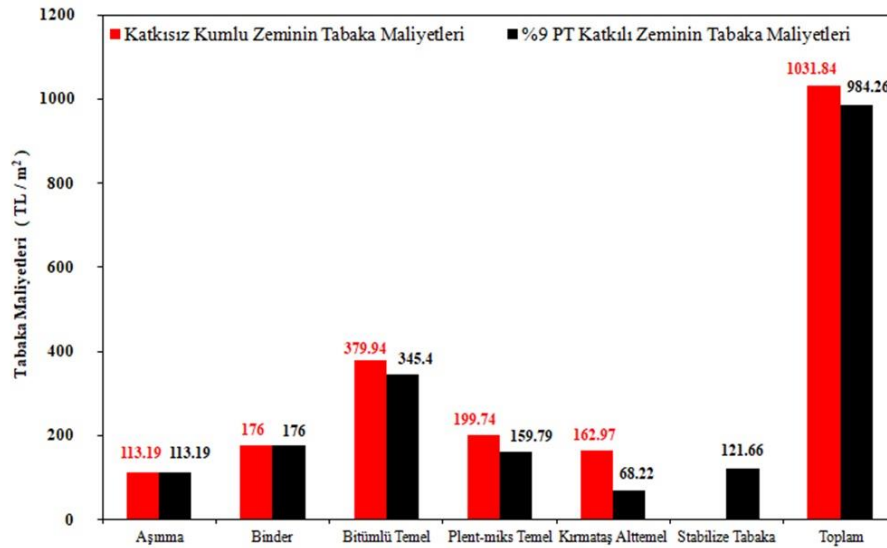
Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113.19	113.19
KGM/6320	Binder tabakası yapımı (10 cm)	ton	733.11	176.00
KGM/6220	Bitümlü sıcak temel tabakası yapımı (22 cm)	ton	719.63	379.94
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416.13	199.74
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378.99	162.97
			Toplam:	1031.84

Tablo 9. %9 pomza taşı katkılı zemin için tabaka kalınlıkları maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113.19	113.19
KGM/6320	Binder tabakası yapımı (10 cm)	ton	733.11	176.00
KGM/6220	Bitümlü sıcak temel tabakası yapımı (20 cm)	ton	719.63	345.40
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416.13	159.79
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378.99	68.22
			Toplam:	862.60

Tablo 10. %9 pomza taşı katkılı zemin için stabilizasyon birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ²
KGM 03.507	Traktör ripperin bir saatlik ücreti	saat	2083.73	0.31
KGM 03.511	Traktör Buldozerin 1 saatlik ücreti	saat	1946.93	1.31
KGM/15.140	Makina ile serme ve karıştırma	m3	13.95	2.09
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	104.79	1.57
KGM/15.052/3	Titreşimli silindirle sıkıştırma yapılması	saat	1221.53	1.83
KGM/15.058/1	Lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması	saat	891.94	1.34
Piyasa	%9 PT Temini Nakliye Dahil	kg	5.39	119.19
Toplam:				121.66

**Şekil 10.** Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıklarının maliyetleri karşılaştırılması

Katkısız kumlu zemin ve %9 PT ilaveli zemin için yol üstyapılarının maliyetleri sırasıyla 1031.84 TL/m² ve 862.60 TL/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, PT ilaveli stabilize zeminin maliyeti 121.66 TL/m² olarak hesaplanmıştır. Söz konusu maliyetler göz önüne alındığında, ilk yapım maliyetinde %4.61 oranında bir azalma görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki, %9 PT ile iyileştirilmiş bir yol tabanı sahip esnek üstyapı tasarımının 951.600 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, kumlu yol tabanının öğütülmüş pomza taşı ile stabilizasyonunun esnek yol üst yapısı kalınlığı ile ilk yapım maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda sunulmuştur.

1. Standart proktor deneyi sonuçlarında; PT oranı arttıkça ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı belirlenmiştir. PT'nin su emme kapasitesinin zemin numunesinden daha az olmasının ω_{opt} değerinin azalmasında etkili olduğu bu sonuçların literatür [18, 19, 22, 25] uyumlu olduğu, PT'nin ince dane yapısının karışımda filler etkisi göstererek ρ_{kmax} değerinin artışına neden olduğu değerlendirilmiştir.

2. Serbest basınç deneyleri neticesinde, PT ile stabilize edilen zeminlerde 28 günlük kür sonunda en büyük mukavemet değerinin ağırlıkça %9 PT'li numunede belirlenirken, katkısız kumlu zemine göre mukavemet değerinin 2.39 kat arttığı, bu sonucun literatür [18, 19, 22] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu artışın, PT'nin karışımların kohezyon kuvveti ve kayma direnci üzerindeki olumlu etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

3. Serbest basınç deneyi numunelerinde PT miktarının artmasıyla numunelerin sertliğinin arttığı bu nedenle kırılma anındaki birim şekil değiştirmenin azaldığı, bulunan sonucun, literatür [39] ile örtüştüğü görülmüştür.

4. CBR deney sonuçlarında ise %9 PT katkılı zeminlerin 28 günlük kür süresi sonundaki CBR değerleri, katkısız kumlu zemin numunelerine göre sırasıyla 2.52 ve 2.57 kat arttığı belirlenmiştir. Bu artış PT katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiğini ve bu durumun literatürde [17, 22, 25, 26] ile uyumlu olduğu görülmüştür.

5. Serbest basınç ve CBR deney sonuçlarından, PT'nin puzolanik yapısının ve PT tanelerinin karışımların boşluklarını doldurma kapasitesinin etkili olduğu değerlendirilerek, mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmektedir.

6. Yol üst yapısı tasarım sonuçlarında ise, %9 PT'li stabilize zeminler için tasarlanan üstyapı kalınlığında azalma olduğu, bu durumun PT'nin taşıma gücüne olumlu etkisinden meydana geldiği değerlendirilmiştir.

7. Maliyet analizi sonuçlarında ise, %9 PT katkılı stabilize zeminlerin üstyapı maliyetlerinde, katkısız kumlu zemine kıyasla %4.61 oranında tasarruf sağlandığı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar göz önüne alındığında, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bölünmüş bir yolda, %9 PT ile yol taban zemininin stabilizasyonu ile üst yapı maliyetinde 951.600 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır.

8. Sonuç olarak, yol taban zeminlerinin alternatif katkı malzemeleri ile stabilizasyonu kapsamında PT kullanılmasının zeminin taşıma kapasitesini arttıracığı, esnek üst yapı tabaka kalınlığını ve maliyetini düşüreceği belirlenmiştir. Ayrıca, PT'nin doğal bir malzeme olması ve stabilizasyon vasıtasıyla esnek üstyapı yapımında kullanılan malzeme miktarını azaltması ile, yapım aşamasında meydana gelen CO₂ salınımının azaltılabileceği, çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Yol inşasına yönelik stabilizasyon çalışmalarında PT'nin kullanımının artmasıyla, karayolu projeleri için maliyetlerin daha da azaltılabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, çalışmamızda sürdürülebilir malzeme kullanımı ile maliyet avantajının birlikte değerlendirildiği göz önüne alınarak, çalışmamızın yeşil altyapı uygulamalarına yönelik araştırmalar ve çevresel etki analizleri ile de desteklenerek geliştirilmesi arzu edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'nün İÜ-BAP FDK-2023-3325 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir. BAP Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

[1] Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Nobel Yayınevi, Ankara.

- [2] Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayınevi, Ankara.
- [3] Kök, B. V. (2019). *Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- [4] Sarıcı, T., Ok, B., Akbulut, N., & Cenk, A. H. (2024). An experimental study on the usability of reclaimed asphalt pavements or waste bricks in the stone columns. In Türker, U., Eren, Ö., & Uygur, E. (Eds.), *Sustainable Civil Engineering at the Beginning of Third Millennium, ACE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, 481, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1781-1_14.
- [5] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Çetkin, Ö. N. (2023). Killi kum zeminlerin dayanımı üzerinde yüksek fırın cürufunun etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 1159-1174.
- [6] Ok, B., Demir, A., Sarıcı, T., & Ovalı, M. (2021). Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temellerinin plaka yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(6), 718-728.
- [7] Hatmoko, D. D., Rifa'i, A., & Ismanti, S. (2024). Effect of using lime and fly ash as a cement substitute for soil stability. *Kurvatek Journal Energy Management and Sustainable Environment*, 9(1), 45-54.
- [8] Chakma, N., Islam, M. S., & Paul, S. (2024). Effectiveness of areca fiber and cement on the engineering characteristics of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 427, 136290.
- [9] Andavan, S., & Maneesh Kumar, B. (2020). Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions – A review. *Materials Today: Proceedings*, 22(3), 1200-1202.
- [10] Rahgozar, M. A., Saberian, M., & Li, J. (2017). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics*, 14, 52-60.
- [11] Reddy, D. S., Kowshik, K., Kishor, M. J., Durga, R. V., & Kumar, V. P. (2018). Enhancement of soil properties by using fly ash and metakaolin. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(2S), December.
- [12] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2021). Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 222-235.
- [13] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2021). Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *ECJSE*, 8(3), 1372-1384. <https://doi.org/10.31202/ecjse.894046>
- [14] Perera, S. T. A. M., Saberian, M., Zhu, J., Roychand, R., & Li, J. (2022). Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 17.
- [15] Bharti, G., Hurukadli, P., & Shukla, B. K. (2023). Environmental impact analysis and utilization of copper slag for stabilizing black cotton soil. *Materials Today: Proceedings*, 3.
- [16] Dompheun, R., & Eisazadeh, A. (2024). Flexural and shear strength properties of laterite soil stabilized with rice husk ash, coir fiber, and lime. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00364-5>.

- [17] Mesfun, R. T., Quezon, E. T., & Geremew, A. (2019). Experimental study of stabilized expansive soil using pumice mixed with lime for subgrade road construction. *International Journal of Research - Granthaalayah*, 7(7), 118-124.
- [18] Fithria, R., & Kusumastuti, D. P. (2022). The effect of wood charcoal powder and pumice powder on the parameters of shear strength of clay soil. *Indonesian Geotechnical Journal*, 1(2), 50-55.
- [19] Vekli, M., & Cadir, C. C. (2022). Usage of waste marble powder and pumice powder to improve the engineering properties of soft clay. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 6481–6490.
- [20] Nasiri, H., Khayat, N., & Nazarpour, A. (2024). Assessing one-year effects of 10% pumice powder on strength and microstructure of contaminated clay. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03892.
- [21] Altuntaş, Ö. F., & Bilgen, G. (2022). Katkılı zeminlerde taşıma gücünün istatistiksel yöntemlerle tahmini. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(1), 13-23. <https://doi.org/10.29132/ijpas.993022>.
- [22] Saltan, M., Çimen, Ö., & Keskin, S. N. (2015). Stabilization of clayey subgrade with waste pumice for road infrastructure. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(5), 583–590.
- [23] Karataş, M., Benli, A., & Ergin, A. (2017). Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 467-479.
- [24] Mboya, H. A., King'onde, C. K., Njau, K. N., & Mrema, A. L. (2017). Measurement of pozzolanic activity index of scoria, pumice, and rice husk ash as potential supplementary cementitious materials for Portland cement. *Advances in Civil Engineering*, 2017, 6952645.
- [25] Fındık, S., & Saltan, M. (2008). Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Building and Environment*, 43(4), 415-421.
- [26] Ertem, F. S., Kavlak, Y., & Saltan, M. (2011). Utilization of pumice waste for clayey subgrade of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12).
- [27] ASTM C136/C136M. (2019). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM D4318. (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] ASTM D854. (2006). *Standard test method for specific gravity of soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] ASTM D698. (2014). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [31] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2025). Dünyada ve Türkiye’de Pomza. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/pomza.pdf> (Erişim Tarihi: 15.01.2025).
- [32] Yılmaz, İ., Yıldırım, M., & Keskin, İ. (2017). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler*. Seçkin Kitabevi, Ankara.

- [33] ASTM 2166-06. (2006) Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [34] Orhan, M. (2013). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri*. Gazi Kitabevi, Ankara.
- [35] ASTM D1883-21. (2021). Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [36] AASHTO. (1993). Interim guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [37] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2025) Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zeminin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve maliyetinin araştırılması. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 5(1), 81-99.
- [38] Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O. (2019). Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder-based high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 216, 314–324.
- [39] Uzuner, B. A. (2016). *Temel Mühendisliğine Giriş*. Derya Kitabevi, Trabzon.
- [40] AASHTO. (2024). Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide (MEPDG-3). 3rd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [41] Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008) T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [42] Karayolları Genel Müdürlüğü Birim Fiyatları (2024). <http://www.kgm.gov.tr> (Erişim Tarihi: 16.12.2024).

Research Article

Mechanical Structure Investigations of Woven and Knitted Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites

Ceyda Okta¹  and Sidem Kaner^{2,*} 

Received: 18.01.2025

Accepted: 11.06.2025

¹Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering; Denizli, Türkiye; cydokta@gmail.com

^{2,*} Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering; Denizli, Türkiye, skaner@pau.edu.tr

* Corresponding author

Abstract: In this study, polymer matrices were reinforced with carbon fabric obtained by weaving and knitting carbon filaments. Different industries reported that filament unwinding occurred in woven carbon fiber composites. In composite manufacturing where woven fabric is required, the laying and manufacturing processes are challenging due to the dispersion of the fabric. With the knotted chain structure of the knit, it is easier to apply epoxy to the fabric as desired and to convert it into a composite. Especially when it is possible to produce the knit-ted chains tightly and as a whole during the knitting process, it is possible for the product converted into a composite to exhibit higher strength. In this study, the effects of weaving and knitting methods on the mechanical properties of carbon fiber reinforced composites were investigated. Mechanical properties were examined in woven and knitted structures for carbon fiber composite materials with different densities and thicknesses. Single-layer composite was produced using 3-layer 200 g/m² plain woven fabric, 200 g/m² and 245 g/m² twill carbon fiber woven fabric as woven fabric. Carbon fabric with 1x1, 2x1, and 3x1 interlock knit structures were knitted so that it could be compared with weaving. The carbon fabrics obtained from woven and knitted filaments were turned into carbon fiber-reinforced composites produced by vacuum infusion. Tensile and three-point bending tests of carbon fiber-reinforced composites were carried out within the scope of experimental studies. The fracture surfaces of the composite plates obtained were investigated via FESEM and EDS analyses. The highest tensile strength values were achieved in 245 g/m² twill weave and 3x1 interlock knitted carbon composite samples. In the knitted samples used, no dissolution problem was observed in the knitted structure.

Keywords: fiber reinforced; carbon fiber; composite; mechanical strength.

Araştırma Makalesi

Dokuma ve Örmek Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Mekanik Yapı Araştırmaları

Özet: Bu çalışmada, polimer matrisler, karbon filamentlerin dokunması ve örülmesiyle elde edilen karbon kumaş ile takviye edilmiştir. Farklı endüstriler, dokunmuş karbon fiber kompozitlerde filament açılmasının meydana geldiğini bildirmiştir. Dokuma kumaş kullanılması gereken kompozit imalatında serim ve imalat süreçleri kumaşın dağılmasından dolayı zorlayıcı olmaktadır. Örgünün sahip olduğu düğüm zincirli yapısı ile kumaşa istenilen şekilde epoksi uygulanması ve kompozite

dönüştürülme süreci daha kolaydır. Özellikle örgü sürecinde örgü zincirlerinin sık ve bir bütün şekilde üretilmesi mümkün olduğunda kompozite dönüşen ürünün daha yüksek dayanım sergilemesi mümkün olabilir. Bu çalışma ile dokuma ve örme yöntemlerinin karbon fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yoğunluk ve kalınlıkları farklı olan karbon fiber kompozit malzemeler için dokuma ve örme yapılarında mekanik özellikler incelenmiştir. Dokuma kumaş olarak 3 katlı 200 g/m² düz dokuma kumaş, 200 g/m² ve 245 g/m² dimi karbon fiber dokuma kumaş kullanılarak tek katlı kompozit üretilmiştir. Dokuma ile karşılaştırılabilmesi için 1x1, 2x1 ve 3x1 interlok örgü yapılarına sahip karbon kumaş örülmüştür. Dokuma ve örme filamentlerden elde edilen karbon kumaşlar, vakum infüzyonla üretilen karbon fiber takviyeli kompozitlere dönüştürülmüştür. Deneysel çalışmalar kapsamında karbon fiber takviyeli kompozitlerin çekme ve üç noktalı eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakaların kırılma yüzeyleri FESEM ve EDS analizleri ile incelenmiştir. En yüksek çekme mukavemeti değerleri 245 g/m² dimi örgü ve 3x1 interlok örgülü karbon kompozit numunelerinde elde edilmiştir. Kullanılan örme numunelerde, örme yapısında çözülme problemi gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: fiber takviye; karbon fiber; kompozit; mekanik dayanım.

1. Introduction

An important class of textile composites is woven fabric composites. Carbon fabrics produced by weaving carbon filaments are generally used to manufacture these composites. The layers created in the manufacture of woven fabrics are made in piles by giving a certain direction to the warp and weft threads, respectively, along the existing length and width of the fabric [1]. Although the dense texture of the woven fabric and its quick-dissolving structure facilitate the process of obtaining it as a fabric, it complicates the process of getting composites by combining the material with a polymer-based system. Fabrics obtained by weaving have been used in technical textiles for many years [9]. The transformation of the fabric obtained after the production of knitted fabrics by loop formation into a composite may show significant mechanical differences compared to a composite obtained with woven fabric [24].

Different numbers of filaments can be used in carbon fiber manufacturing such as 3K, 6K, and 12K. Carbon fiber is a rigid and light material with high mechanical strength compared to metals. Correctly determining both the mechanical and physical properties of the product obtained in the production of composite materials is an important process [6]. It has high tensile strength, chemical resistance, and thermal resistance. Thanks to its thin filament structure, its ability to bend during weaving and knitting processes creates an advantage in fabric production [18].

In most of the carbon composite-based studies reported in the literature, the effects of filament (fiber structure, types, fiber-to-volume ratio, fiber orientation and number) and weaving (shape, yarn bundle density, bundle spacing, direction of weaving) on the physical, mechanical, and thermal properties of carbon composites were examined [5]. Tugan examined the mechanical properties of woven-type composites obtained from glass, carbon, and basalt fibers in textile-based composites. Basalt, 3K, 12K carbon and E type 300 tex glass yarns in 1200 tex yarns obtained composite structures from the plain weave. According to the data obtained from the tensile and three-point bending test results; the highest tensile and bending strengths in the warp direction were observed in the glass fiber hybrid composite sample, the highest tensile strength in the weft direction was observed in the hybrid composite sample made with 12K carbon, and the highest bending strength was observed in the composite samples made with basalt [15]. Zhou et al. They produced epoxy-based carbon woven fabric with three different geometries consisting of single plain and double twill weave with different densities. They investigated the mechanical behavior of these composites under tensile loading. Different mechanical values were determined for all three composites. Accordingly, the crimp ratios in the weave types affect the mechanical properties, and as a result of the damage, mechanical properties affecting tests and microstructure examinations of

the woven fabric composites, it was determined that the weave pattern and geometry play a critical role [22].

Tursun carried out an experimental study by performing elastic analysis for two-dimensional orthogonal woven twill fabric and composite laminate material. Epoxy with glass fiber cloth and epoxy resin with carbon fiber cloth 12-layer composites were produced by vacuum infusion method as reinforcement and matrix material, respectively. According to the data obtained by the tensile test, the average tensile stress of the fabric and epoxy samples obtained with glass fiber was lower than that of the fabric and epoxy samples obtained with carbon fiber [17].

Gülcan, used carbon woven fabric of 200g/m² (3K) and 600 g/m² (12K) of different weights of carbon fibers with single and double-layer composite plate structures. Composite samples were produced as twill/twill, plain/plain, and twill/plain type hybrid structures by vacuum-assisted resin transfer molding method. According to the tensile test results, a higher elastic modulus value was achieved in the 200 g/m² weighted plain fabric type composite plate than the twill fabric type composite plate. The same is true for 600 g/m² fabrics. Among all the samples, the 200 g/m² weighted plain fabric-type composite plate showed the highest elastic modulus due to the weight effects [8].

One of the most important industrial areas for carbon composites is the defense industry. High mechanical strength and lightness are very important for the equipment and defense vehicles used in this field [23]. Yanen and Solmaz examined the products obtained in terms of ballistic performance by manufacturing hybrid composite materials from armor materials used in the defense industry. [20]. Carbon composite materials have begun to take their place among the sought-after materials in different areas of importance in the industry. Especially in vehicle brake pads, solid rocket engine parts and silicon crystallization furnaces. Korkmaz produced carbon composite materials by hand laying method in carbon fiber reinforced woven fabric type and examined their mechanical properties [12]. Turhan used 200 tex carbon fiber and 1x1 rib knitted fabrics in two different densities to manufacture composite plates by hand lay-up method. It has been observed that the material, the production method, and the density affected the mechanical properties significantly [16].

Durgun et al. compared the effect of vacuum bagging and vacuum infusion production methods on tensile strength. Samples produced by vacuum infusion showed higher tensile strength [7].

Considering the cost effect of carbon fiber materials, Shimokawa et al. produced carbon composite materials with epoxy resin cured under vacuum at low temperatures. It provided tensile and compressive strength at room temperatures and different elevated temperatures [14].

Depending on the weaving and knitting process, loss of strength in fiber structures is possible [25]. In the study, it was thought that in order to prevent the loss of strength that may occur during the composite manufacturing process, knitted fabric will provide a higher strength composite with epoxy compared to the transition of traditional woven fabric to rigid form. When the previous studies were examined, it was seen that the carbon fabrics were generally produced by weaving carbon fibers in the literature. Therefore, woven and knitted carbon fabrics were compared in terms of mechanically and metallographically in this study as a contribution to the literature. When the literature is examined, it is seen that while there are many studies on weaving, the study on carbon composite obtained by producing knitted fabric is incomplete. The main reason for this is that weaving production is easier. However, in terms of the process of converting the fabric into composite, both manufacturing and the strength that can be obtained are higher.

2. Materials and Methods

Within the scope of the study, carbon fabrics with 3K (3000 filaments) linear density-wire number as reinforcements and epoxy resin as matrix material were used in the production of the composite samples.

200 g/m² plain, 200 g/m² twill, and 245 g/m² twill were woven-type carbon fiber fabrics. 1x1, 2x1, and 3x1 interlock carbon fiber fabrics were obtained by hand knitting in a knitting machine. The carbon

fibers were supplied by DowAksa Turkey (DowAksa Advanced Composite Materials Industry Limited Company, Istanbul, Turkey). Technical information on carbon fibers used in fabric production was given in Table 1.

Table 1. Technical information of 3K carbon fiber used in the study.

	3K	Standard Test Method (ISO)
Tensile strength (MPa)	3800	10618
The elasticity of modulus (GPa)	240	10618
Breaking length (%)	1.6	10618
Intensity(g/cm ³)	1.78	10119
Linear bulk density (Tex)	197 g/1000 m	1889

Knitted fabrics were manufactured in the laboratories of Pamukkale University Faculty of Engineering. Carbon knitted fabrics were produced on the Passap Duomatic 80 knitting machine with a 6-gauge machine fineness located in the Yarn and Knitting Laboratory. The knitted fabric is knitted with 3K (3000 filament) carbon yarn. The density for 1X1, 2X1 and 3X1 interlock knits is 210g/m², 420g/m² and 720g/m² respectively.

Woven fabrics were supplied by the Spinteks Textile Industry and Trade Joint Stock Company, Denizli, Türkiye. Technical information on woven carbon fiber fabrics is given in Table 2.

Table 2. Technical information on the woven fabrics used in the study

	200P	200T	245 T
Fabric construction	Plain	2/2 Twill	2/2 Twill
Gam (± %10) (g/m ²)	200	200	245
Yarn linear bulk density (Tex)	200	200	200

2.1. Production of Composite Plates

In the production of composite materials, epoxy resin was preferred as a matrix material. Epoxy resins adhere well to a variety of fillers, reinforcements, and surfaces [2]. Vacuum infusion was used as the production method. The Epakem EPX 200 Resin and 385 H Hardener were produced by Epakem Chemistry and Construction and Industry Trade Limited Company, Istanbul, Türkiye. The properties of Epakem EPX 200 Resin were given in Table 3.

Table 3. EPX 200 epoxy resin properties

Properties	Chemical Appearance and Values
Hardness	90 Shore D
Appearance	Transparan
Viscosity	11000 cm.s.g ⁻¹
Flash Point	>200 °C
EEW	180-192
Color Alpha	<200 Gms
Density	115 g/cm ³

Usage rates of epoxy resin and hardener during operation are given in Table 4.

Table 4. Fabric and resin properties used in the experimental study

Test Samples	Sample Structure	Fabric Weight (g)	Number of Layers of Fabric	Amount of Epoxy Resin Used (g)	Fabric thickness (mm)
200 plain	Woven Carbon Fiber Fabric	73	3 layers	77	0,22
200 twill		73		52	0,26
245 twill		85		63	0,32
1x1 interlock	Knit Carbon Fiber Fabric	48	1 layer	50	0,55
2x1 interlock		44		51	0,83
3x1 interlock		44		52	1,2

For the vacuum infusion method, first of all, the surface to be treated was cleaned with a mold surface cleaner. After the fabrics were cut, woven carbon fiber fabrics were laid in 3 layers, and knitted carbon fiber fabrics were applied in one layer. The average weight of the 3 layers of woven fabric and the single-layer knitted fabrics are arranged to be the same. The mixture of epoxy resin and hardener was applied to the fabrics, which were laid, in the ratio of 2:1 as specified in the instructions to ensure impregnation with resin. The process was repeated for each fabric layer. The epoxy mixture was applied with a roller so that there was no dry place on the fabric surfaces. Air bubbles may form during the vacuum process. At this stage, to prevent this situation, the edges of the vacuumed samples are compressed with yellow paste tape. A vacuum blanket is used to preserve the heat on the top cover. The curing process for the composite was completed by applying pressure with the vacuum process.

In order to evaluate the samples mechanically at the same standard, composite manufacturing was carried out in a way that both plain and twill fabrics would be strained 90° degrees in the tensile test. The spreading was carried out in the same direction and the maximum strength values created by the mechanical strengths in one direction were taken into account.

The produced composite plates were cut with a water jet in the dimensions of 25 mm x 250 mm x 0.2 mm per ASTM D3039 standard (Figure 3) [3]. Examples of tensile test specimens taken from the composite plate obtained are shown in Figures 1 and 2.

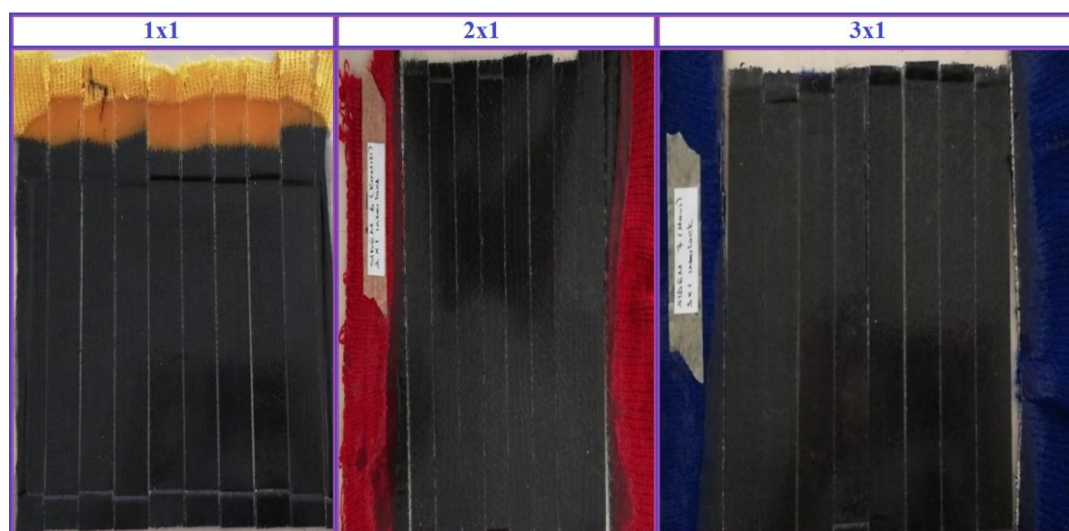


Figure 1. Knitted carbon fiber fabrics a) 1x1 interlock knitting, b) 2x1 interlock knitting, c) 3x1 interlock knitting.

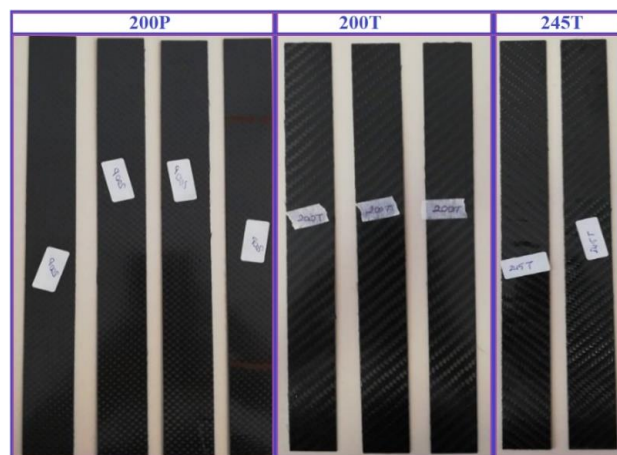


Figure 2. Woven carbon composite plates a) 200 plain weave, b) 200 twill weave, c) 245 twill weave.

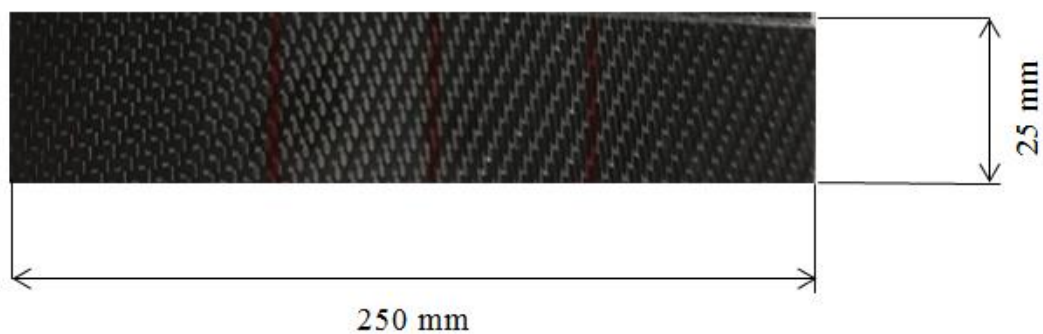


Figure 3. Tensile specimen size per ASTM D3039 standard.

To prevent slipping in the jaw area of the tensile machine, small composite plates were glued to the edges of the samples via Araldite 2015-1 chemical adhesive (see Figure 4). Thus, the problem of slipping in the jaws was eliminated.

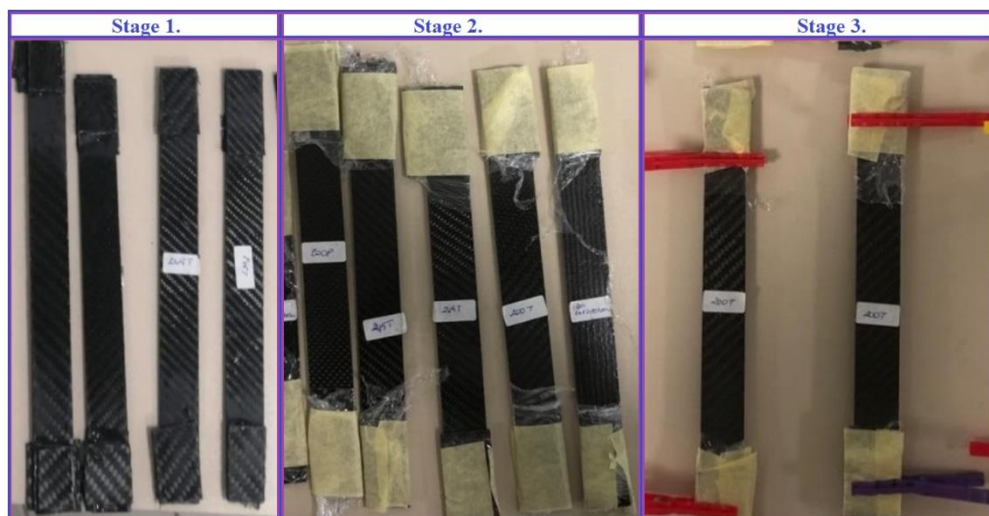


Figure 4. The preparation stage of samples Stage 1) The process of sticking the cut samples to the plate surface, Stage 2) The bonding process of samples wrapped with stretch film, Stage 3) Fastening with latch.

The sample plates in Figure 4 were adhered and kept for 6 hours and cured for 24 hours. Experimental studies were conducted on the HARDWAY universal tensile test device at Pamukkale University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Science Engineering, Materials Analysis Laboratory. Behaviors of the prepared 25 mm x 250 mm specimens under tensile load were performed at 23°C room temperature, with a preload of 4 N at a jaw speed of 2 mm/min at a distance of 100 mm between the jaws. The tensile test was applied along the y-axis, depending on the weft and warp directions of the woven and knitted fabrics. In the content of the study, 4 test samples of each material type were prepared. Fracture surfaces of high-strength woven specimens obtained in the tensile test are given in Figure 5.

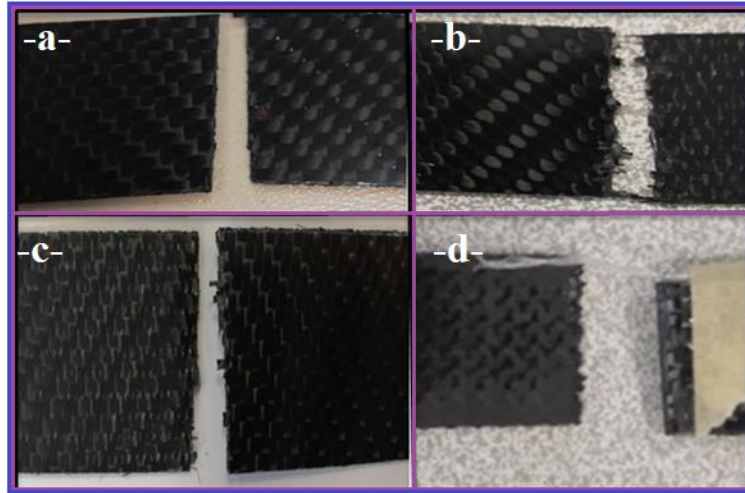


Figure 5. Fracture surfaces of woven composite plates a) Breaking surface in 245 twill weave type, b) Fiber separation on 245 twill weave type, c) Breaking surface on 200 plain weave type, d) Fiber separation in 200 plain weave type.

The three-point bending test was performed on the woven and knitted composites to determine bending strength and deformation properties on the SHIMADZU HARDWAY device at Pamukkale University Technology Faculty Material Inspection Laboratory. In accordance with the ASTM D790 standard, the samples were cut with a precision cutting device in the dimensions of 25 mm x 90 mm x 0.8 mm [2].

The images of the surfaces after bending tests are displayed in Figure 6.

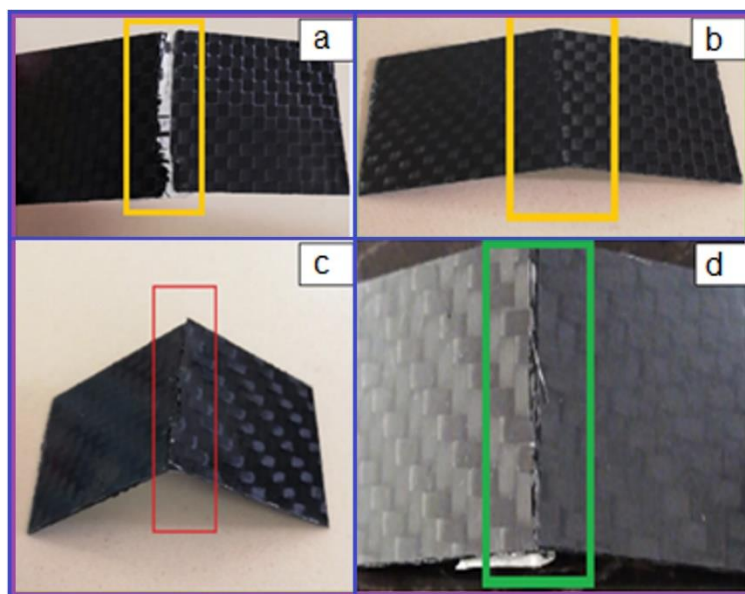


Figure 6. Bending test surfaces a) 200 plain weave type sample #1, b) 200 plain weave type sample #3, c) 200 twill weave type sample #1 d) 245 twill weave type sample #2.

FESEM images of the fracture surfaces were obtained on the ZEISS SUPRA 40VP model Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) device in Pamukkale University PAUILTAM (Advanced Technology and Research Center). Samples need to be made conductive in order to take FESEM images. At this stage, all samples were made conductive by coating them with Gold and Palladium before imaging.

3. Results

According to tensile test application on composite plates, the data in Table 5 were obtained.

Table 5. Tensile test results of 200 plain, 200 twill and 245 twill woven and 1x1, 2x1, and 3x1 interlock knit carbon composite samples

Woven	σ_T (MPa)	F (kN)	ε %	E (GPa)
200 plain	5720	11.44	14.98	44
200 twill	5280	10.56	15.20	39
245 twill	6210	12.42	14	51
Knit				
1x1 interlock	413	2.065	5.50	26
2x1 interlock	429	2.145	8.90	17
3x1 interlock	1315	2.63	8.00	43

The stress-strain curves obtained for the composite formed with 200 plain, 200 twill, and 245 twill woven carbon are given in Figure 7. When the twill woven fabrics, which are different in weight but have the same structure, are compared with the plain woven fabrics, the highest strength value of 6210 MPa was reached in the 245 twill woven structure with 3 layers of carbon fiber composite production.

In their study, Nicoletto and Riva investigated the mechanical properties of carbon woven twill weave type graphite epoxy laminate under tensile loading. The resulting sample woven laminates become an advantageous product as they have a balanced structure in terms of mechanical properties, high impact resistance and are easier and more practical to shape. In the tensile test, the samples were cut in 8

layers. Homogenization was achieved at different levels by modeling the mechanical behavior of woven laminates. It was observed that the yarn structure and the fiber bundle in the polymeric matrix affected the mechanical properties [13].

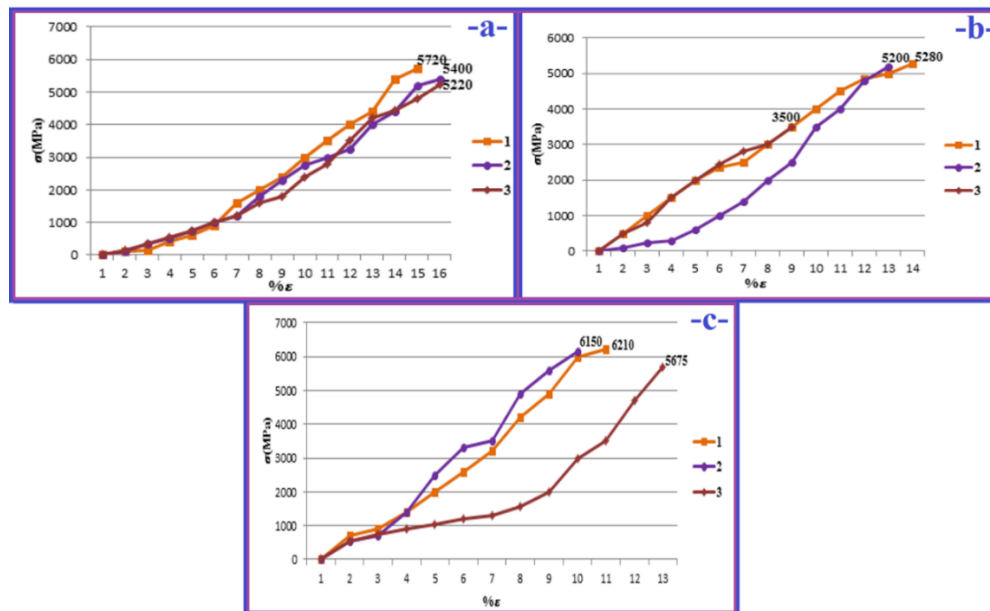


Figure 7. Stress-strain curves of a) 200 plain, b) 200 twill, c) 245 twill woven carbon composite samples.

The stress-strain curves of 1x1 interlock, 2x1 interlock, and 3x1 interlock knitted carbon composite samples are given in Figure 8. It was observed that there is an increase in strength value for the composite obtained with the 3-layer interlock knit compared to 1 and 2-layer samples.

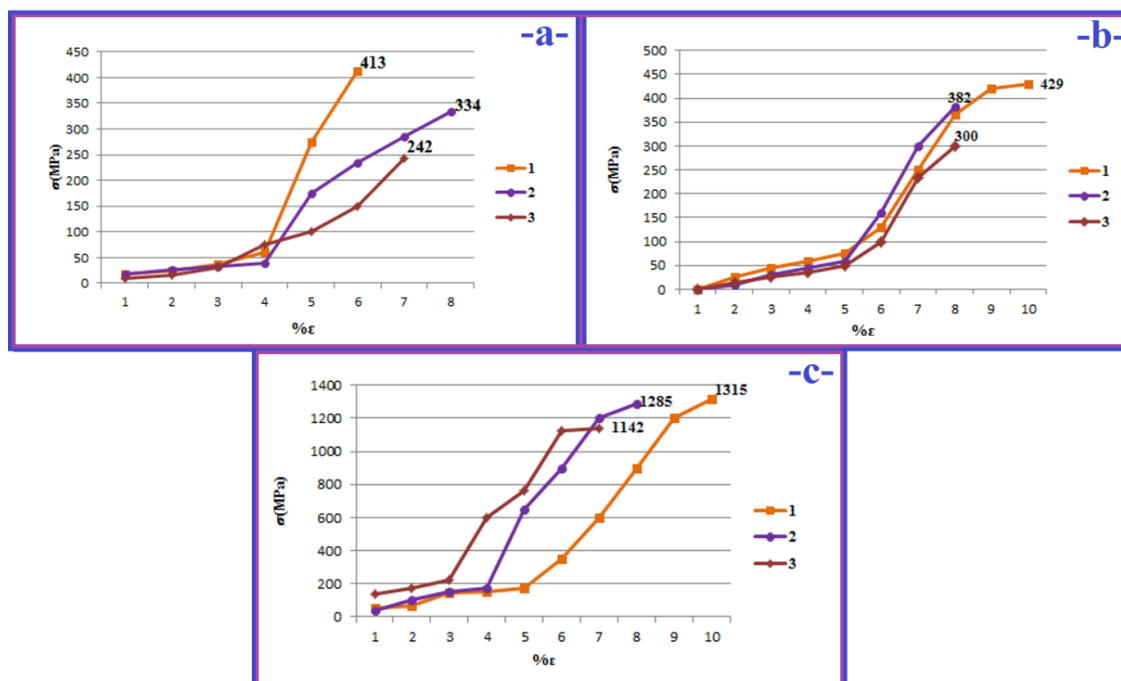


Figure 8. Stress-strain curves of a) 1x1 interlock, b) 2x1 interlock, c) 3x1 interlock knit knitted carbon composite samples.

FESEM images of the fracture surface formed after the tensile test for 245 twill-woven composite plates is given in Figure 9.

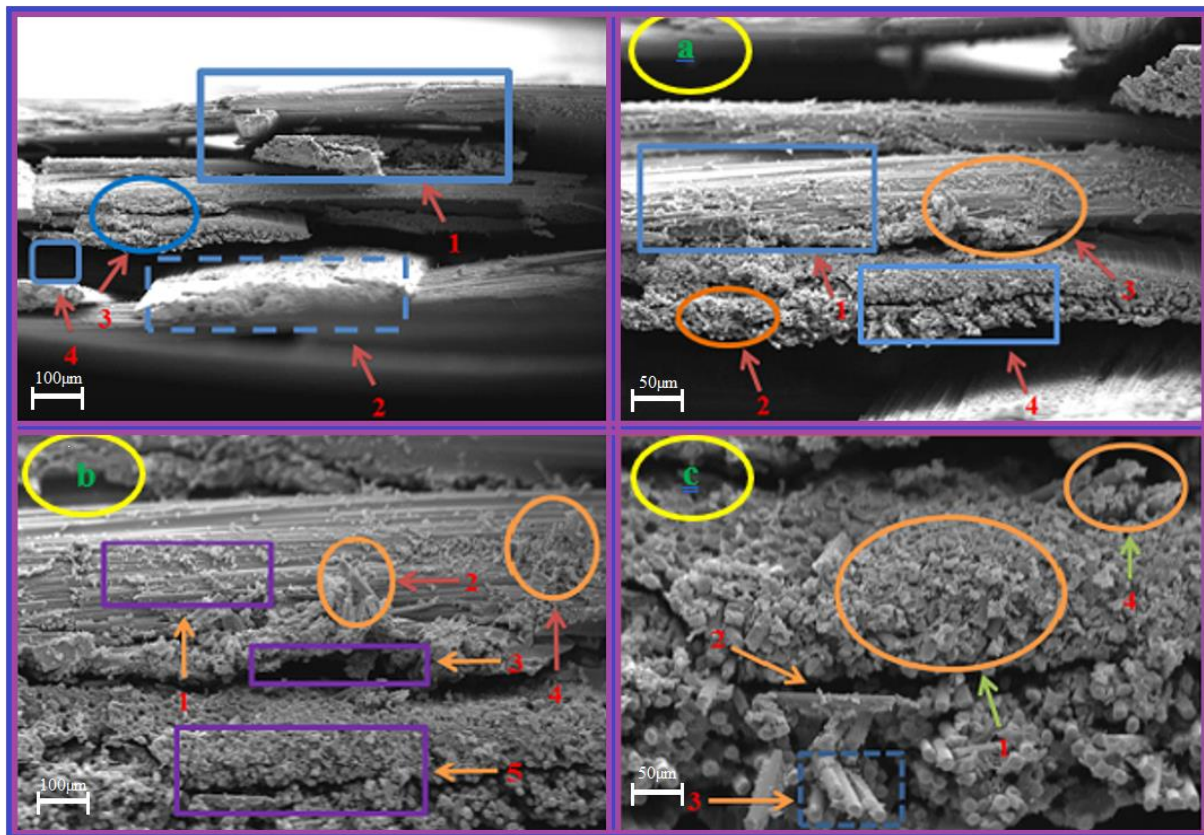


Figure 9. FESEM analysis images of 245 twill woven composite samples, 100X magnification, a) 250X magnification, b) 500X magnification, c) 1000X magnification.

In the 100X magnified sample, separations occurred between the layers in the direction of arrow number 1 in Figure 1. The fiber orientation within the layers is seen in arrow directions 2 and 3. There are breaks between the fibers. The gaps between the fibers are shown with the number 4 arrow. At 250X magnification, breaks were observed in the transverse layer region of the threads. In section 2, the fibers are in a tight structure. The effect of reinforcement-matrix material increases the strength. In 4, delamination is seen. At 500X magnification, it is seen that the fibers in the 1 and 2 directions are degraded. Inter-fiber spacing and separation of threads from the matrix material were observed in sections 3 and 5. Fiber separations in the twill structure were less in both the samples that broke in the tensile test and in the samples at the end of the bending test. The reason for this is that the woven structure of the twill form comes in an angular form. In addition, it is thought that the interface bond strengths formed with epoxy are better thanks to this. There is no known bond system in composites. Here, the bonding is achieved by the effect of the cohesive forces formed between the epoxy and the fiber. Therefore, as the cohesive bond formed becomes stronger, the strength that the composite can provide also increases.

FESEM analysis images of fabrics with 200 twill weave structures are given in Figure 10.

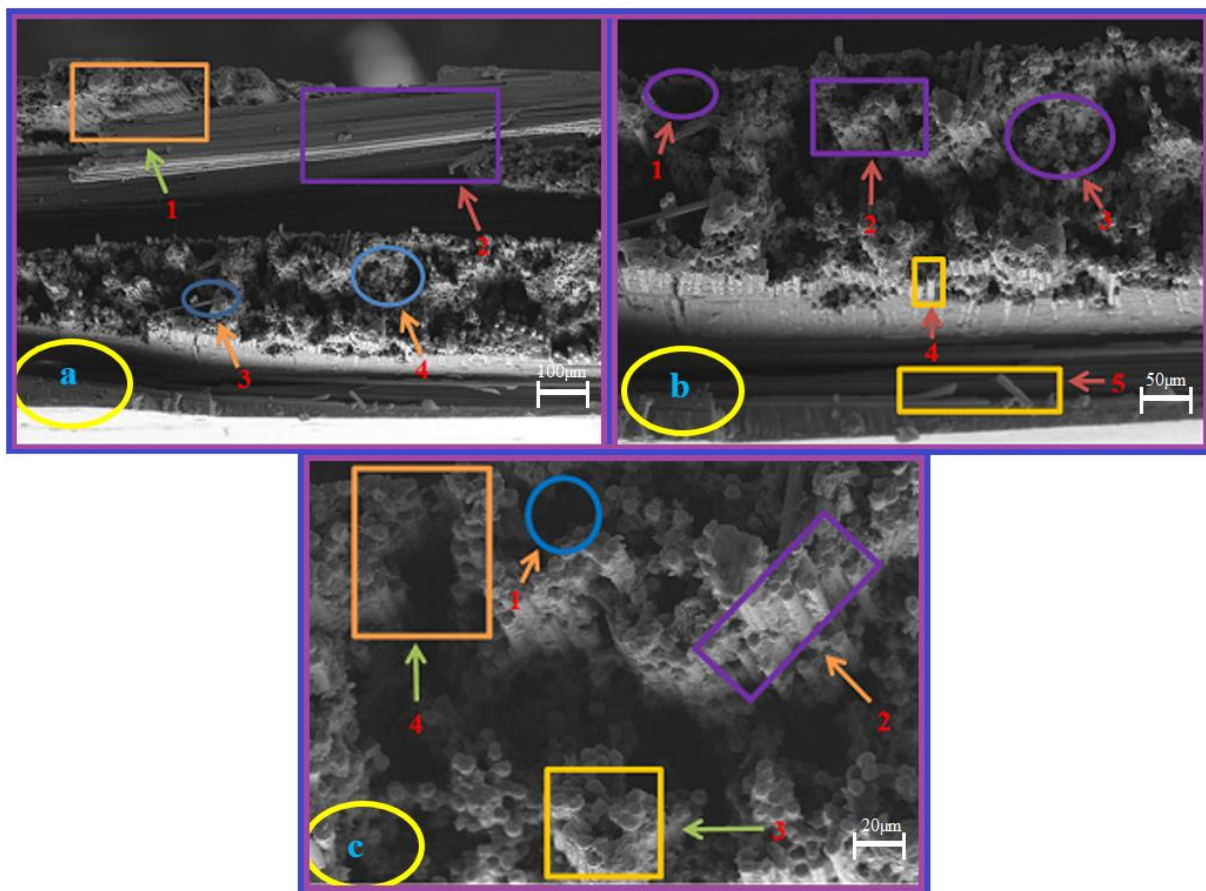


Figure 10. FESEM analysis images of 200 twill woven fabric samples a) 250X magnification, b) 500X magnification, and c) 1000X magnification.

When the 200 twill carbon composite was examined, it was observed that the fibers in the composite structure were pulled out, and interfacial debonding was observed. At 200X magnification, distortions occurred between the fibers along the cross-section of the layered structure due to the effect of tensile force on the 1 surface. Since the interface bond between the fiber and the matrix material in the 2nd region is strong, it increases strength properties. The fibers in the cross-section in area 3 are separated from the matrix structure. In area 4, gaps were observed between the fiber matrix. At 500X magnification, the situation at 250X is seen more clearly. At 1000X magnification, gaps between the fibers were observed by separating the carbon fibers from the matrix material in arrow directions 1 and 4. In regions 2 and 3, the interface bond between fiber and matrix material is vital. It was observed that there were gaps in the number 4 area.

The gap between the fibers was observed due to the separation of the carbon fibers from the matrix material. There were also separations in layers. This situation is called the deflection of crack error. Structural deterioration occurred in the fibers in the cross-section. The unidirectional nature of the plain structure of the weaving causes these deteriorations. This causes the interconnection forces to be unidirectional and reduces the ability to resist forces coming from horizontal or different angular directions.

Zhang et al. investigated the tensile, compressive and bending properties of three types of 3D carbon composites in different directions. It was observed that the 3D woven type samples with the same fiber volume had better mechanical properties in the warp direction.

The bending strength of the samples was approximately the same in the weft direction. The tensile strength properties varied depending on the thickness and yarn count. The same findings were obtained in the direction of the examinations in different axial directions [21].

FESEM analysis images of carbon composites with 3x1 knitted fabric structure are given in Figure 11.

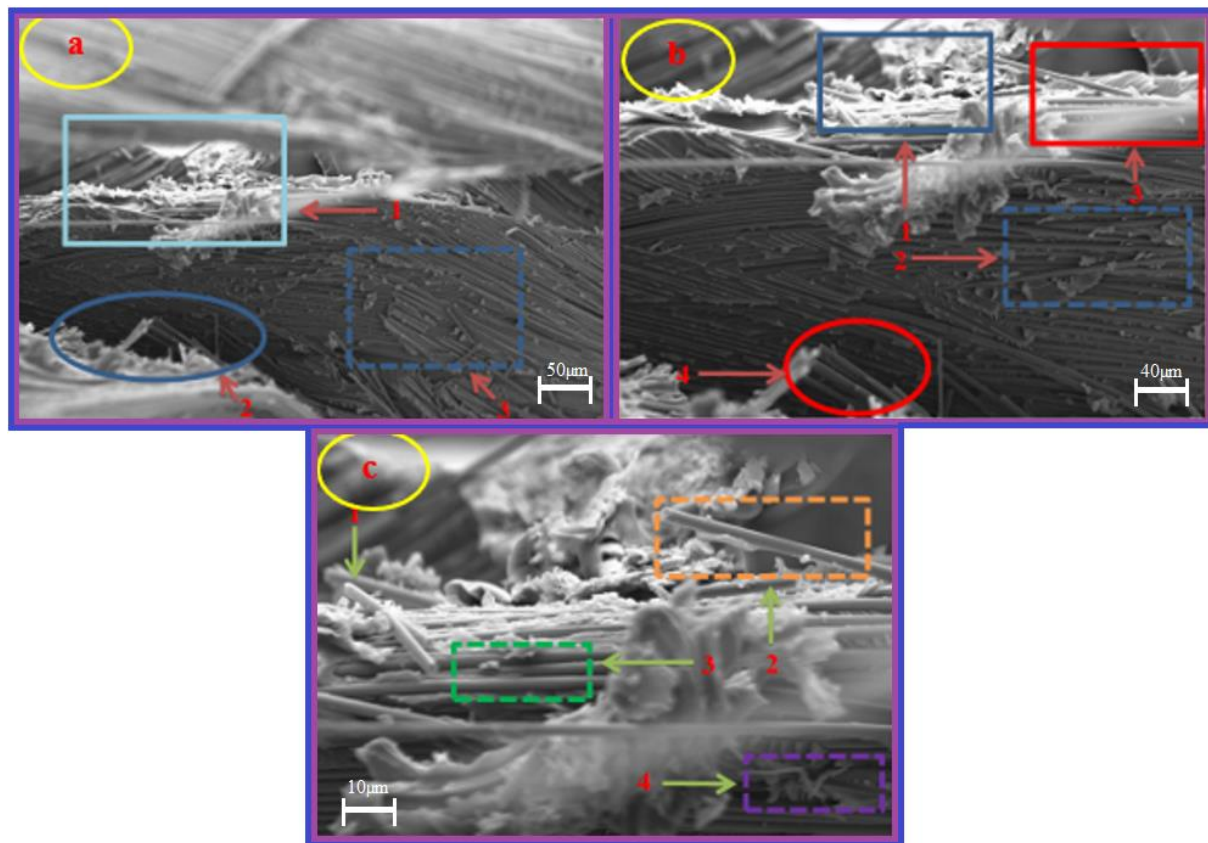


Figure 11. FESEM analysis images of the sample with 3x1 knitted fabric structure a) 250X magnification, b) 500X magnification, c) 1000X magnification.

At 250X and 500X magnifications, it was observed that the fibers were stripped from the matrix and there were gaps between the fiber and the matrix. The interfacial bonding between fiber-matrix in the composite structure seems weak. For this reason, breaks and separations occur in the fibers. The formation of air bubbles and voids that occur during production and the entry of foreign matter is also important to process errors. It causes delamination in fibers in irregular or bent structures. Therefore, it is necessary to place the fibers regularly in the composite structure and to eliminate the bending. Since carbon fibers break due to friction in the machine during the knitting process, the structural integrity obtained in the knitted fabric is negatively affected by fiber breakage caused by friction. During the process of joining the knitted fabric with epoxy, good interface bonds may not be formed in these breakage areas.

At 1000X magnification, lateral cross-sections of the fibers are seen in the samples viewed from the cross-section. At this place, interfacial shear fields due to fiber separation at fiber interfaces under the force and separation between the layers occurs. Figure 11 shows the FESEM image and the EDS analysis over the FESEM image. With the EDS detector, the atomic concentrations of the samples to be analyzed are determined. C, which is the main ingredient of the samples used, is seen in the EDS images. It is also proven that the selected fiber fabric structures for all samples used by EDS analysis are of pure C structure. EDS analysis outputs of 245 twill woven fabric, 200 twill woven fabric and composite samples with 3x1 interlock knit structure are given in Figure 12.

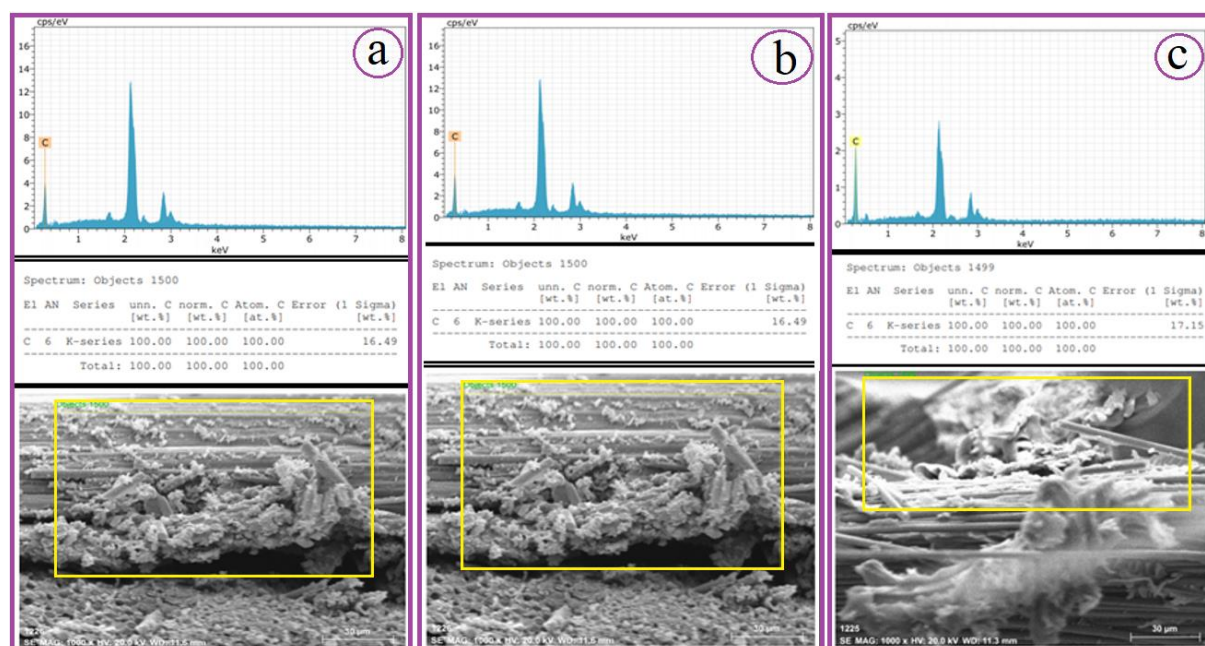


Figure 12. a) 245 twill woven fabric, b) 200 twill woven fabric, and c) 3x1 interlock knit EDS analysis.

4. Results and Discussion

For the samples within the scope of the study, the best strength was obtained in the composites produced with woven carbon fibers. Woven fabrics are more dense and more durable in terms of their properties. Knitted fabrics are generally known for having a more flexible structure. Therefore, the production methods have affected the mechanical behavior of the composite. The breakage of fibers in the knitting process adversely affects mechanical strength. A higher strength could be obtained by using a chain-like knit. It can be realized by making mechanical arrangements to the knitting machine. It is known that isotropic behavior and tensile strength for woven fabrics are dependent on the test direction when tested in the weft and filling directions. In the tests performed with the effect of weft and warp regions, the tensile strengths of the composites have very similar values [4].

According to the data obtained in this experimental study, the highest tensile strength was obtained in woven carbon fiber type carbon composite samples with 245 twill weave structures. The 3x1 interlock structure gave the best strength values in the composites obtained with knitted fabric. Strength values for composites formed with 1x1 and 2x1 interlock structures are close to each other.

In the woven samples, the percent elongation values were changing from 10 to 15%. Fracture occurs when the plates reach their highest tensile strength value. However, the fact that the broken fibers in the knitted composites adversely affect the percentage elongation rate. In the tensile test, a small amount of elongation was detected in the composite samples. Although the knitted fabric provides much better integrity, the main reason why its strength values are lower is that carbon fibers break due to friction. In the study conducted to improve the friction and wear properties of carbon fibers, polydimethylsiloxane (PDMS) coating was applied to the fiber. Increases in strength were observed in the carbon knitted and woven fabrics obtained with these fibers. In the tensile and bending tests conducted after this coating method, it was determined that there was a strength increase of 16.7% and 23.64%, respectively [26].

In this study, the fracture behavior still continues in the microstructure and it was observed that the percent elongation level increased. The fibers' separation in layers allowed the material to resist elongation for a while without breaking. During this period, the strength value exhibited by the material increases. The bond structure is strong at the fiber-matrix interfaces. Tight and coexisting reinforcement materials adhered to the matrix material increasing the strength values. In this process, as the resistance

in the intermediate bonds increases with the increase of the force, the slip between the fibers has started. It is stated that this situation occurs due to the slippage of weak and non-linear loose fiber yarns in the first stage of the test process [19].

In the interlock knitting structure, it was observed that there were breaks in the loop areas of the carbon fabrics due to the mechanism of the machine. This situation was seen in carbon composite in the form of fabric. In the tensile tests applied after the material has turned into composite, fiber separations from these breaks have been observed. To prevent the strength loss caused by fiber breakage, increasing the filament thickness may also be an alternative. Kiasat and Sangtabi experimentally investigated the mechanical behavior of twill woven carbon fabric laminates under tensile loads and evaluated the effects of fiber bundle, bundle size and fabric weave density. Twill woven carbon fabrics were made of carbon fibers with densities of 200 and 600 g/m² from 3K and 12K fiber bundles, respectively. Composite laminates were produced by vacuum infusion method. In the study conducted with the aim of obtaining lightweight design, high weaving densities such as 50K filament were preferred. In this way, fiber bundles, size and structure can provide an improvement effect on mechanical behavior [10].

In the three-point bending test, fibers were separated starting from the outer part to the inner part. Fractures were also observed in some samples. The gap between the loops and the broken fibers reduce the mechanical strength of the knitted composites. In the composite samples obtained by weaving, it was observed that the matrix-reinforcing material showed a homogeneous distribution, strengthening the bond structure between the fibers and reaching higher strength values. On the other hand, since the epoxy resin filled the empty areas formed due to knitting, the strength is negatively affected.

5. Conclusions

Within the scope of the study, the highest tensile strength was obtained in composite samples obtained from knitted fabric and 3x1 interlock knitted carbon composite samples. It is possible to obtain composites with much higher strengths by providing more frequent knitting loops in the samples obtained with knitted fabric. In order to achieve this, knitting machines are needed that will prevent fiber breakage due to friction, especially during the loop formation process.

By applying polymer-containing coatings to carbon filaments against breakage and abrasion, it is possible to prevent fiber breakage due to gaps in knitting and weaving processes. Thus, fabric production without filament breakage can be achieved. This can also enable the production of composites that provide the same strength in every region.

Methods such as weft and warp details in the weaving and knitting process and production at different angles can increase the strength of the composite. In microstructure examinations, it was observed that especially in carbon fibers, peeling, breaking and interfacial bonds formed between the fiber and the matrix material created weak connections. This situation creates the result that the breakage in the fibers during knitting reduces the strength of the fabric and, therefore, the composite. The transverse and longitudinal fracture ease of the fabric obtained with woven fabric is higher in fiber-structured carbon composites. Having a higher filament density in woven fabric increases the strength. Within the scope of the study, the highest strength was determined in carbon composite samples obtained with 245 gr/m² twill fabric having a denser weave.

Studies on different woven and knitted structures have shown that there are significant mechanical strength reductions, especially due to friction and wear. Different applications should be developed to make the manufacturing process of carbon composite, which is an alternative to high-strength steels in the industry, practical and to reduce its cost. In particular, in order to provide long-term mechanical strength, it is necessary to obtain fabrics with reduced loss rates through technical changes to be made in weaving and knitting machines. In addition, mechanical losses should be prevented during the weaving and knitting process of the fiber with secondary processes that can be applied (fiber coatings, applications that will reduce friction loss, etc.).

Considering the data obtained in the study, the effect of friction loses its effect in fabrics with high density. In order to eliminate the negative effect that friction may create, composite manufacturing should be done by preferring more tightly woven fabrics such as twill. We can state this result within the scope of the study because the highest tensile strength values were obtained in 245 gr/m² twill weave and 3x1 in-interlock knitted carbon composite samples. As the carbon density and fiber density increased, the friction effect decreased.

During the transformation of the fabric into a composite, a bond structure is not formed. It is important to use epoxy that will ensure the correct formation of cohesion and adhesion forces between the fiber and epoxy.

Acknowledgment

The authors would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest. The study was written with the contributions of all authors.

Research and Publication Ethics Statement

The authors declared that they complied with the scientific, ethical and citation rules of the *International Journal of Pure and Applied Sciences* throughout the entire process of the study.

References

- [1] Ataş, A., & İnal, O. (2018). Experimental characterisation and prediction of elastic properties of woven fabric reinforced textile composite laminates. *Journal of Science and Technology A- Applied Sciences And Engineering*, 19(3), 660-670.
- [2] ASTM D790-17 Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.
- [3] ASTM D3039/D3039M-08 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- [4] Carvalho L. H. De & Cavalcante J. M. F. & d'Almeida J. R. M. (2006). Comparison of the mechanical behavior of plain weave and plain weft knit jute fabric-polyester-reinforced composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45, 7, 791-797.
- [5] Chou, S. & Chen, H.C. (1992). Effect of woven structure on flexural and shear fracture behaviour of three-dimensional carbon-carbon composites. *Journal of Materials Science*, 27, 1741-1747.
- [6] Dominguez, C. A. E. & Hernández, H. O. & Mollinedo, H. & Huerta, O. S. & Moreno, H. H. (2023). Development and physical characterization of a composite laminate aramid/epoxy manufactured by the vacuum bag method, 47, 1, 108-115.
- [7] Durgun, İ. & Vatansever, O. & Ertan, R. & Yavuz, N. (2014). Experimental comparison of composite part manufacturing methods used in the automotive industry, *Engineering and Machine*, 55(649), 58-63.
- [8] Gülcan, E. (2019). Examination of the Physical Properties of Carbon Woven Fabric Reinforced Composite Materials, Uludağ University Institute of Science, Textile Engineering Master Thesis, Department, Bursa (2019).
- [9] Kamiya, R. et al. (2000). Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review. *Composites science and technology*, 60(1), 33-47.
- [10] Kiasat, M.S. & Sangtabi, M.R. (2015). Effects of fiber bundle size and weave density on stiffness degradation and final failure of fabric laminates, *Composites Science and Technology*, 111, 23-31.

- [11] Kitagawa, Y. & Arai, M. & Yoshimura, A. & Goto, K. (2022). Prediction of transverse crack multiplication of CFRP cross-ply laminates under tension-tension fatigue load, *Advanced Composite Materials*, 1-18.
- [12] Korkmaz, N. (2014). A Study on production of composite materials containing carbon fiber reinforced woven fabric and determination of mechanical properties, Master Thesis, Institute of Science.
- [13] Nicoletto, G. & Riva, E. (2004). Failure mechanisms in twill-weave laminates: FEM predictions vs. experiments, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 787-795.
- [14] Shimokawa, T. & Kakuta, Y. & Kogo, Y. (2007). Carbon plain-weave fabric low-temperature vacuum cure epoxy composite: static and fatigue strength at room and high temperatures and practicality evaluation, *Journal of Composite Materials*, 41, 18.
- [15] Tugan, A. (2021). Examination of the performance properties of hybrid woven fabrics, Institute of Science and Technology.
- [16] Turhan, E. (2011). Examination of mechanical properties of composite structures obtained from carbon fiber in 1x1 weave structure, Master Thesis, Institute of Science and Technology.
- [17] Tursun, H. (2019). Development of material models for use in finite element analysis of fiber reinforced polymer composite Materials, Master Thesis, Institute of Science.
- [18] Virgil'ev, Yu S. & Kalyagina, I. P. (2004) Carbon-carbon composite materials. *Inorganic Materials*, 40 (1), 33-49.
- [19] Wang, Z. & Xie, H. & Luo, Q. & Li, Q. & Sun, G. (2021). Optimization for formability of plain woven carbon fiber fabrics, *International Journal of Mechanical Sciences*, 197.
- [20] Yanen, C. & Solmaz, M.Y. (2016) The production of layered hybrid composites as individual armor material and investigation of their ballistic performance, *ECJSE*.
- [21] Zhang, J. & Lin, G. & Vaidya, U. & Wang, H. (2023). Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications, *Composites Part B : Engineering*, 250.
- [22] Zhou, G. & Sun, Q. & Meng, Z. & Li, D. & Peng, Y. & Zeng, D. & Su, X. (2021). Experimental investigation on the effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors of carbon/epoxy woven composites, *Composite Structures*, 257.
- [23] Zhu, C. & Zhu, P. & Liu, Z. (2019). Uncertainty analysis of mechanical properties of plain woven carbon fiber reinforced composite via stochastic constitutive modeling, *Composite Structures*, 207, 684-700.
- [24] Soydan, A. S., & Var, C. (2024). Assessment of a unique reinforcement construction on mechanical behaviour of composite structures. *The Journal of The Textile Institute*, 115(3), 341-349.
- [25] Yang, T., Hu, L., Xiong, X., Wang, Y., Wang, X., Petrů, M., ... & Militký, J. (2021). A comparison of fabric structures for carbon fiber reinforced composite: Laminated and orthogonal woven structures. *Polymer Composites*, 42(10), 5300-5309.
- [26] Sun, Z., Zheng, P., Chen, C., Dong, Z., Chen, F., & Ma, P. (2025). Mechanical properties of carbon fiber composites with various wear characteristics during knitting process. *Composites Part B: Engineering*, 291, 112010.

Research Article

Effects of Invasive Plants(*Xanthium spinosum*, *Xanthium strumarium* and *Phragmites australis*) on Rhizobacteria Density

Şeyma Çankaya Kılıç¹ , İdris Bektaş^{2,*} , Dudu Duygu Kılıç³  and Burak Sürmen⁴ 

Received: 03.02.2025

Accepted: 11.06.2025

^{1,2,3}Department of Biology, Faculty of Science, Amasya University, 05000 Amasya, Türkiye;

¹seyma.cankaya.ca@gmail.com, ²idris.bektas@amasya.edu.tr, ³duygu.kilic@amasya.edu.tr

⁴Department of Biology, Faculty of Science, Karamanoglu Mehmet Bey University, 70100 Karaman, Türkiye; buraksurmen@gmail.com

*Corresponding author

Abstract: This study investigated whether certain invasive plant species affect the densities of soil bacteria essential for plant growth in agricultural regions. In this study, the densities of nitrogen-fixing (NF), phosphate-solubilizing (PS), and siderophore-producing bacteria (SPB) were assessed in the rhizospheres of the invasive plants *Xanthium spinosum*, *Xanthium strumarium*, and *Phragmites australis* in wheat cultivation areas of Çorum, Turkey. The microbial densities in the rhizospheres of these invasive plants were then compared to those found in the rhizospheres of wheat. The research findings indicated that the rhizosphere microbial density of invasive plants varied according to plant type and localit, with these variations between the wheat rhizosphere soil and those of other plant types at the same location showing statistical significance($p \leq 0.05$). However, when comparing the biochemical properties of invasive plants and wheat rhizosphere soil, no statistically significant difference was observed. The results suggest that invasive plants such as *X. spinosum*, *X. strumarium*, and *P. australis* reduce the microbial density of NFB, PSB, and SPB in environments with similar soil properties. Nonetheless, further research is necessary to deepen the analysis of the relationship between plant species and soil structures to better understand the mechanisms behind the decline in bacterial density.

Keywords: invasive plants; rhizosphere bacteria; xanthium spinosum; xanthium strumarium; phragmites australis

Araştırma Makalesi

Bazı İstilacı Bitkilerin (*Xanthium spinosum*, *Xanthium strumarium* ve *Phragmites australis*) Kök Bakterileri Yoğunlukları Üzerine Etkileri

Özet: Bu çalışmanın amacı, bazı istilacı bitki türlerinin tarımsal bölgelerde bitki büyümesi için gerekli olan belirli toprak bakterilerinin yoğunluklarını etkileyip etkilemediğini araştırmaktır. Bu çalışmada, Türkiye'de Çorum ilinde, buğday ekim alanlarında görülen istilacı bitkiler *Xanthium spinosum*, *Xanthium strumarium* ve *Phragmites australis* 'in rizosfer toprağında azot bağlayıcı (NF), fosfor çözücü (PS) ve siderofor üreten bakterilerin (SPB) yoğunlukları belirlenmiştir. Bu istilacı bitkilerin rizosferindeki mikrobiyal yoğunluklar daha sonra buğday bitkisinin rizosfer toprağındaki aynı özellikteki bakteri yoğunluğu ile karşılaştırılmıştır. Araştırma bulguları, istilacı bitki-

lerin rizosfer mikrobiyal yoğunluğunun bitki türüne ve lokaliteye göre değiştiğini ve bu mikrobiyal yoğunluğun buğday rizosfer toprağı arasında aynı lokasyon içinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir ($p \leq 0.05$). Bununla birlikte, istilacı bitkiler ile buğday rizosfer toprağının biyokimyasal özellikleri karşılaştırıldığında, istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Çalışma sonucunda, *X. spinosum*, *X. strumarium* ve *P. australis* gibi istilacı bitkilerin benzer toprak özelliklerine sahip ortamlarda bitki gelişimi için önemli olan NFB, PSB ve SPB'nin mikrobiyal yoğunluğunu azaltabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, bakteri yoğunluğundaki düşüşün arkasındaki mekanizmaları daha iyi anlamak için bitki türlerinin ve toprak yapılarının analizini derinleştirmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: istilacı bitkiler; rizosfer bakterileri; *xanthium spinosum*; *xanthium strumarium*; *phragmites australis*

1. Introduction

The introduction of non-native plant species poses a significant challenge in the context of global human-induced environmental changes. The invasion of various plant species substantially reduces the diversity and abundance of plant and animal populations [1]. Additionally, invasive plants can disturb the activity, biomass, and composition of soil bacteria and other microorganisms, thereby affecting critical ecological processes such as organic matter decomposition and nutrient cycling [2]. Therefore, understanding the interactions between invasive plants and soil is crucial for identifying the mechanisms of infestation [3]. Invasive plant species release chemicals, such as phenolics, hydroxamic acids, and short-chain fatty acids, which exhibit inhibitory activity against non-adapted plant species [4]. These chemicals can significantly affect important soil microorganisms. Plant growth-promoting bacteria (PGPB) directly affect plant growth and soil fertility protection through various mechanisms, such as nitrogen fixation, phosphorus solubilization, iron chelation, and phytohormone production. Nitrogen-fixing (NF) bacteria form symbiotic relationships with different plants and aid in atmospheric nitrogen fixation. The ability of bacteria to solubilize phosphate is a significant feature of plant phosphate nutrition. Siderophores, low-molecular-weight iron-chelating secondary metabolites produced by diverse groups of microorganisms, contribute to iron scavenging under iron-limited conditions. Siderophores produced by various bacteria support plant growth by supplying iron to plants [5]. A study was observed that *Alliaria petiolata*, the most invasive plant in North America, suppressed the mycorrhizal fungi of native plants [6]. This negative impact on the fungi was attributed to the presence of various flavonoids and other compounds manufactured by *Alliaria petiolata*. Based on field research, it has been found that the invasive plant *Reynoutria japonica* negatively impacts soil microbial groups and processes such as C and N mineralization [7]. Conversely, some studies have shown that *Solidago canadensis*, another invasive plant, influences the structure of soil nitrogen-fixing bacteria and enhances soil nitrogen availability, thus aiding in its spread [8]. In Çorum, Turkey, *X. spinosum*, *X. strumarium*, and *P. australis* are the most aggressive and successful invaders. In a study was identified phytotoxic compounds from *X. spinosum*, including xanthatin, 1 α ,5 α -epoxyxanthatin, 4-epiisoxanthanol, 4-epixanthanol, loliolide, and dehydrovomifoliol [9]. The other study was identified cytotoxic compounds from *X. strumarium*, including squalene, xanthatin, stigmaterol, and β -sitosterol-O-glucoside [9]. Moderate cytotoxic alkaloids, including phranisines, N-p-coumaroyl serotonin, and N-p-coumaroyl tryptamine, have been extracted from the roots of *Phragmites australis* [11]. However, limited information is available on how invasive plant species alter the microbiological structure of soil. Therefore, it is particularly important to investigate whether invasive plant species impact the populations of soil bacteria.

The primary objective of this study was to evaluate the density of bacterial populations present in the rhizospheres of invasive plant species. Additionally, this study compared the microbial density associ-

ated with invasive plant species to that found in the wheat rhizosphere. By analyzing these two distinct environments, we aimed to gain insights into how invasive plants influence microbial communities in soil, potentially affecting ecological balance and agricultural practices. This study provides important information on the interactions between invasive species and soil health, with implications for environmental management and crop production. We hypothesized that the bacterial populations in wheat rhizosphere soil differ among the rhizospheres of *X. spinosum*, *X. strumarium*, and *P. Australia*. The soil bacterial population will generally be lower in the rhizospheres of *X. spinosum*, *X. strumarium*, and *P. australis* than in wheat rhizospheres.

2. Materials and Methods

The invasive species *X. spinosum* (Asteraceae), *X. strumarium* (Asteraceae), and *P. australis* (Poaceae) were collected from five different locations in wheat fields located in Çorum province (Table 1). *Xanthium spinosum* is a vertically growing, rigid, highly branched annual plant, reaching lengths of 30–100 cm and occasionally reaching 150 cm. The stems are ribbed, yellowish or gray-brown, and thinly hairy. *Xanthium strumarium* is an annual plant that typically grows 30–100 cm in height. It features erect, branched stems that are often speckled with purple and adorned with short white hairs scattered along the surface [12]. *Phragmites australis* typically reaches heights of 2–4 m. Its leaves are 20–50 cm long and 2–7 cm wide. During late summer, the tassels are striking dark purple, approximately 20–30 cm long [13](Figure 1).

Table 1. Invasive plant location and location coordinates using rhizosphere soil in Corum

Locality Number	Location Coordinates	Variety of Species	Location
Locality 1	40°26'54"N-34°53'17"E	<i>Phragmites australis</i>	Wheat in the field
Locality 2	40°32'31"N-34°56'10"E	<i>Phragmites australis</i>	wheat field border
Locality 3	40°32'38"N-34°59'27"E	<i>Xanthium spinosum</i>	Wheat in the field
Locality 4	40°32'33"N-34°59'20"E	<i>Xanthium spinosum</i> + <i>Xanthium strumarium</i>	Wheat field border
Locality 5	40°32'52"N-34° 59'11"E	<i>Xanthium strumarium</i>	Wheat in the field



Figure 1. Above ground parts of the invasive plant species used in this study: A) *X. spinosum*; B) *X. strumarium*; C) *P. australis*.

2.1. Soil Sampling

Soil samples were collected from the rhizospheres of both the invasive plant species and wheat plants from each of the five wheat planting locations. Soil samples were randomly collected from the rhizosphere region of each plant at a depth of 20 cm [14]. Three replications were performed at each location. The rhizosphere soils were sifted using a 2-mm mesh and transported to the laboratory in May 2022. The rhizosphere soil was stored at 4°C for one day to isolate bacteria and to determine its biochemical properties.

2.2. Isolation of Bacteria

2.2.1. Soil Preparation by Dilution

The bacterial strains from rhizosphere soil samples were isolated using dilution plate techniques [15]. To isolate bacteria from soil, 10 g of each soil sample was suspended in 90 mL of 0.85% m/V NaCl, agitated at 120 rpm for 30 min, diluted 1:10, and stored at 4°C. Subsequently, a dilution series of 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , and 10^{-5} were prepared.

2.2.2. Isolation of Phosphate-Soluble Bacteria

100 µL of each dilution was applied to NBRIP agar plates with the following composition per liter: 10 g glucose, 5 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 5 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.25 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.2 g KCl, 0.1 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, and 1.5% agar, pH 7. After 10 days, bacterial colonies around the clear halo zone were counted using a colony counter. After 10 days, bacterial colonies with clear transparent zones around the periphery were counted. This indicates that the bacteria were able to solubilize phosphate, as evidenced by the formation of a clear zone around the colony. This method is commonly used to quantify the phosphate-solubilizing bacteria (PSB) population in soil or other samples.

2.2.3. Isolation of Nitrogen-Fixing Bacteria

The bacteria were isolated using Döbereiner nitrogen-free agar medium, which comprised 5.0 g malic acid, 5 g $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$, 0.4 g $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0.2 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.1 g NaCl, 0.02 g $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0.01 g FeCl_3 , 0.002 g $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.05 g/L bromothymol blue, and 15.0 g/L agar-agar at pH 7.0. After inoculating soil with 100 µl of dilutions, the samples were incubated at 30°C for 72 h on N-free agar (NFA) in triplicate. After 72 h of incubation, we meticulously tallied the individual bacterial colonies that transitioned from yellow to a distinct bluish hue. This process allows us to accurately assess nitrogen-fixing bacterial counts.

2.2.4. Isolation of Siderophore-Producing Bacteria

Siderophore-producing microorganisms were counted using Chrome Azurol S (CAS) medium plates. A 100 µl dilution of the sample was inoculated onto the plates, which were then incubated at 37 °C for 72 h [16]. After the incubation period, the bacterial isolates that caused a color change in the medium from blue to orange-yellow were carefully counted. All bacterial colony-forming units were determined using the following formula:

$$\text{Colony Forming Unit (CFU)} \text{ g}^{-1} = \text{number of colonies} \times \text{dilution factor} \quad (2.1)$$

The log CFU/mL was calculated using:

$$\text{Log} \left(\frac{\text{CFU}}{\text{ml}} \right) = \text{log}_{10} \frac{\text{CFU}}{\text{dilution factor} \times \text{volume (ml) of culture plated}} \quad (2.2)$$

2.3. Statistical Analysis

The statistical analysis of the data was performed using SPSS 20.0 software. An independent samples t-test was specifically employed to ascertain the presence of statistically significant differences between the bacterial counts and in the dataset and their mean values ($p \leq 0.05$).

3. Results and Discussion

Soil plays a vital role in supporting microbial life in the environment. Many studies have shown that the interaction between plant species and microbial life is influenced by the combination of plant species and soil physicochemical properties, such as soil pH. Our findings suggest that specific invasive plant species have a significantly adverse impact on soil bacterial diversity. Comprehensive soil analyses conducted at each locality, no statistically significant differences in the biochemical values between the invasive plant and the rhizosphere soil of the wheat plant in the same locality were revealed during these analyses. This suggests that the biochemical compositions of the invasive plant and the rhizosphere soil of the wheat plant are similar, indicating a potential lack of significant impacts on soil biochemistry by the invasive plant in this specific context (Table 2). The bacteria in the rhizosphere soil samples of invasive plants exhibited lower population densities than those present in the non-invasive plant *Triticum aestivum*. This was determined by counting the bacteria in Petri dishes, as illustrated in Figure 2. Invasive plant species in all localities showed a significant difference in bacterial density in the rhizosphere soil compared with the bacterial density in wheat plant rhizosphere soil at the same locality. A significant difference was observed in the population of phosphate solubilizing, nitrogen-fixing, and siderophore-producing bacteria between the invasive plant rhizosphere and *Triticum aestivum* rhizosphere soil ($p \leq 0.05$).

In various locations, the populations of phosphate-solubilizing bacteria (PSB) in soil samples from the rhizosphere of the invasive plant, ranged from 3.00 to 5.86 Log CFU/g. In the rhizospheres of *Triticum aestivum*, the population of PSB ranged from 6.33 to 7.65 Log CFU/g. In comparisons between invasive plants and *Triticum aestivum*, statistical analysis revealed a significant difference in the numbers of PSB (phosphate-solubilizing bacteria) in the rhizosphere soil of the invasive plants compared to those in the wheat rhizospheres. This difference was found to be statistically significant in each locality ($p \leq 0.05$). The number of nitrogen-fixing bacteria (NFBs) isolated from the rhizosphere soil of the invasive plant in each locality was statistically different from that of the wheat plant in the same locality. This suggests that the presence of invasive plants may indeed have a notable impact on the nitrogen-fixing bacteria (NFB) microbial composition of the soil. In the rhizospheres of the control plant *Triticum aestivum* at locality 1, the highest number of nitrogen-fixing bacteria (NFB) (7.33 Log CFU/gr) was identified. Conversely, the rhizosphere soil of the invasive plant species *Xanthium spinosum* at locality 3 had the lowest number of NFBs (5.63 Log CFU/gr).

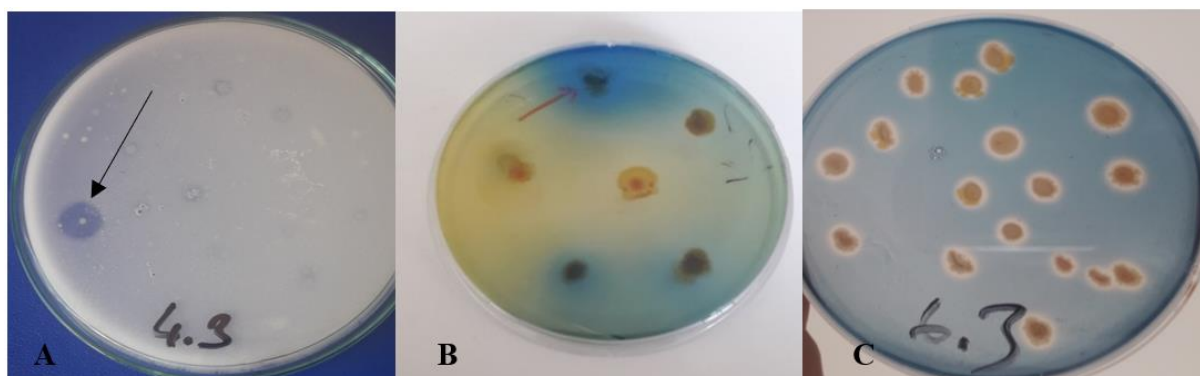


Figure 2. Bacteria isolated from rhizosphere soils of invasive plants (A:PSB,B:NFB,C:SPB)

The proportions of siderophore-producing bacteria (SPB) in the rhizospheres of invasive and the *Triticum aestivum* plants were determined. The SPB population densities in each locality were significantly different based on the wheat varieties ($p \leq 0.05$). The siderophore-producing bacteria counts ranged from $\log_{10} 3.66$ to $\log_{10} 5.66$ cfu g⁻¹ in the rhizosphere soils of invasive plants. In wheat rhizosphere soil, this number varied between 6.33 and 7.52 in $\log_{10}$ scale. These results show that the proportion of endophytic bacteria colonizing the roots of invasive plants tended to decrease (Table 2). When the biochemical properties of the soils were analyzed, we found that there were differences between them. However, these differences were not statistically significant compared with the biochemical properties of wheat rhizosphere soil from the same locality. The pH of wheat rhizosphere soil varied between 7.10 and 7.40, whereas the pH of invasive plant rhizosphere soil varied between 7.08 and 7.30. The highest potassium content (225.22 mg/kg) was found in the fifth locality, while the lowest content (110.11 mg/kg) was found in the third locality. In the invasive plant rhizosphere soil, these ratios ranged between 111.83(locality 1) and 220.7 mg/kg (locality 1). In the rhizospheres of wheat plants, the highest level of phosphorus (16.25 mg/g) was determined at locality 2, whereas in the rhizospheres of invasive plants, the highest level was 16.15 mg/g, also at locality 2. In the same locality, the nitrogen values in the wheat plant and invasive plant rhizosphere soil were comparable.

Table 2. Effects of the invasive species *X. spinosum*, *X. strumarium*, *P. australis*, and *Triticum aestivum* on PSB, NFB, and SPB, which are considered as biochemical properties of soil

Location	Species	PSB	NFB	SPB	Rhizosphere Soil Properties					
		Log CFU/gr ±SE	Log CFU/gr ±SE	Log CFU/gr ±SE	pH	Lime	Potassium (mg/kg)	Phosphorus (mg/g)	Organic Matter (%)	Nitrogen (%)
1	<i>Triticum aestivum</i>	6.33±0.88 ^a	7.33±0.33 ^a	6.33±0.33 ^a	7.10±0.5 ^a	0.36±0.008 ^a	112.5±3.73 ^a	16.06±0.66 ^a	1.36±0.16 ^a	0.17±0.11 ^a
	<i>Phragmites australis</i>	3.00±0.57 ^b	4.33±0.33 ^b	3.66±0.33 ^b	7.08±0.88 ^a	0.37±0.003 ^a	111.83±4.57 ^a	15.76±0.43 ^a	1.39±0.29 ^a	0.18±0.15 ^a
2	<i>Triticum aestivum</i>	7.65±0.53 ^a	6.43±0.14 ^a	7.03±0.20 ^a	7.26±0.3 ^a	1.35±0.005 ^a	122.4±2.26 ^a	16.25±0.106 ^a	1.46±0.16 ^a	0.14±0.13 ^a
	<i>Phragmites australis</i>	4.33±0.00 ^b	5.03±0.42 ^b	4.46±0.45 ^b	7.21±0.12 ^a	1.33±0.002 ^a	121.8±6.66 ^a	16.15±0.20 ^a	1.49±0.29 ^a	0.16±0.08 ^a
3	<i>Triticum aestivum</i>	6.84±0.75 ^a	6.98±0.44 ^a	7.52±0.34 ^a	7.27±0.12 ^a	0.16±0.002 ^a	110.11±6.33 ^a	6.54±0.916 ^a	1.41±0.03 ^a	0.08±0.01 ^a
	<i>Xanthium spinosum</i>	5.16±0.66 ^b	5.63±0.17 ^b	5.16±0.34 ^b	7.30±0.45 ^a	0.20±0.001 ^a	114.8±5.32 ^a	6.15±0.252 ^a	1.46±0.09 ^a	0.06±0.05 ^a
4	<i>Triticum aestivum</i>	7.04±0.55 ^a	7.18±0.14 ^a	6.83±0.45 ^a	7.26±0.42 ^a	1.18±0.025 ^a	118.37±22.89 ^a	6.206±0.326 ^a	1.49±0.32 ^a	0.14±0.22 ^a
	<i>Xanthium strumarium</i>	5.86±0.74 ^b	5.32±0.28 ^b	5.14±0.32 ^b	7.20±0.11 ^a	1.21±0.013 ^a	120.8±5.32 ^a	6.26±0.452 ^a	1.40±0.25 ^a	0.16±0.25 ^a
5	<i>Triticum aestivum</i>	7.23±0.35 ^a	6.45±0.34 ^a	7.23±0.34 ^a	7.46±0.19 ^a	15.59±0.027 ^a	225.22±9.14 ^a	10.025±1.196 ^a	0.43±0.03 ^a	0.04±0.01 ^a
	<i>Xanthium strumarium</i>	5.20±0.36 ^b	5.17±0.30 ^b	5.66±0.85 ^b	7.42±0.24 ^a	15.45±0.042 ^a	220.7±6.41 ^a	9.254±0.965 ^a	0.41±0.15 ^a	0.06±0.21 ^a

*Values represent the mean of 3 replications. Means followed by different letters in each locality and column are significantly different at $p \leq 0.05$. (PSB, phosphate solubilizing bacteria; NFB, nitrogen-fixing bacteria; SPB, siderophore-producing bacteria)

Soil microorganisms, including bacteria, fungi, and archaea, play crucial roles in promoting plant growth in agricultural fields. These microorganisms contribute to various key processes, such as nutrient cycling, where they help in the process of decompose organic matter, thereby making essential nutrients like nitrogen, phosphorus, and potassium more available to plants. They also enhance soil structure and health by forming symbiotic relationships with plant roots, such as mycorrhizal associations that improve water and nutrient uptake. In addition, certain soil microbes can suppress plant diseases by outcompeting harmful pathogens or producing natural antibiotics. Overall, the presence and diversity of soil microorganisms are vital for optimizing plant health and increasing agricultural productivity. This study investigated the influences on soil microbial activity of three invasive plant species: *X. spinosum*, *X. strumarium*, and *P. australis*. The results were compared with those of the cultivated plant *Triticum aestivum*. The study conducted a comprehensive analysis demonstrating that microbial densities were significantly negatively impacted by the presence of invasive species, exhibiting distinct differences when compared with the effects observed in wheat cultivation. The research highlighted how these invasive species disrupt the balance of microbial communities in the soil, leading to varied ecological outcomes that could have implications for soil health and agricultural productivity. In this study, we observed that the presence of this specific invasive plant species adversely affects the densities of soil bacteria within the same ecosystem. This negative impact may be linked to the competitive and antagonistic interactions between various invasive plant species. These interactions can disrupt the natural balance of soil microbiota, leading to reduced bacterial populations essential for maintaining soil health and fertility. Consequently, our findings suggest that the complex dynamics among different invasive plants can significantly influence the overall microbial community structure in soil, thereby affecting ecological functions. The relationship between invasive species diversity and soil microbial diversity can be attributed to the ways in which invasive species alter the physicochemical properties of soil. For instance, when invasive plants or organisms establish themselves in a new environment, they modify factors such as soil pH, nutrient levels, moisture content, and organic matter composition. These changes can, in turn, affect the microbial communities in the soil, potentially leading to shifts in microbial diversity and function. However, it is important to note that not all studies agree on this topic. Some studies have demonstrated that the introduction of invasive species does not significantly affect the physicochemical properties of soil. In these cases, invasive species may coexist with native flora and fauna without substantially altering the soil environment. This discrepancy highlighted the complexity of ecological interactions and suggested that the impact of invasive species may vary depending on specific conditions and contexts. In our study, we obtained similar results. Therefore, invasive species diversity may not lead to changes in soil physicochemical properties through alterations in soil microbial diversity. The influence of invasive plant species on soil microbial diversity observed in this study could be linked to antagonistic interactions among various invasive plants, which impact the soil microbial community. This antagonism may manifest in several ways, such as competition for resources, the release of allelopathic compounds, or altering the environmental conditions within the soil, thereby creating a less hospitable habitat for native microbial populations. Consequently, these complex interactions may lead to microbial diversity shifts, potentially disrupting the ecological balance and function of soil ecosystems. Recent research has shown that phenolic compounds in invasive plants alter soil microorganism density and biochemical structure. Root secretion of secondary metabolites may play an important role as allelopathic agents and mediators in plant–soil microbial interactions, thereby potentially changing the rate of soil processes and microbial densities in soil [17]. The phytoxic compounds of *X. spinosum* were identified as xanthatin, 4-epiisoxanthanol[18], 1 α ,5 α -epoxyxanthatin, loliolide, and dehydrovomifoliol[19]. A similar type of toxic substance, xanthatin, has been identified in solvent extracts of *X. strumarium* leaves that is antagonistic to several bacteria and yeasts [20]. A study reported that gallic acid (3,4,5 trihydroxybenzoic acid), a chemical secreted by the roots of *P. australis*, causes cell death[21]. In line with our hypothesis, we found that invasive plants negatively affect soil bacteria. In our study, these compounds may have reduced the density of bacteria in the soil, and interactions may depend on the type of invader species. Invasive plants can alter soil bacterial density. Our study is consistent with previous findings regarding the effects of invasive plants on soil microbial biomass including reduced microbial biomass.

Acknowledgement

This study was supported by TUBITAK with project number 121Z738.

Conflict of Interest

The authors report no conflict of interest relevant to this article.

Research and Publication Ethics Statement

The authors declare that this study complies with research and publication ethics.

References

- [1] Stefanowicz, A. M., Stanek, M., Nobis, M., and Zubek, S. (2017). Few effects of invasive plants *Reynoutria japonica*, *Rudbeckia laciniata* and *Solidago gigantea* on soil physical and chemical properties. *Science of the Total Environment*, 574, 938–946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.120>
- [2] Zubek, S., Majewska, M. L., Błaszowski, J., Stefanowicz, A. M., Nobis, M., and Kapusta, P. (2016). Invasive plants affect arbuscular mycorrhizal fungi abundance and species richness as well as the performance of native plants grown in invaded soils. *Biology and Fertility of Soils*, 52(6), 879–893. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1127-3>
- [3] Burke, D. J., Carrino-Kyker, S. R., Hoke, A., Cassidy, S., Bialic-Murphy, L., and Kalisz, S. (2019). Deer and invasive plant removal alters mycorrhizal fungal communities and soil chemistry: Evidence from a long-term field experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 128, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.031>
- [4] Tharayil, N., Alpert, P., Bhowmik, P., and Gerard, P. (2013). Phenolic inputs by invasive species could impart seasonal variations in nitrogen pools in the introduced soils: A case study with *Polygonum cuspidatum*. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 858–867. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.016>
- [5] Kour, D., Rana, K. L., Kaur, T., Sheikh, I., Yadav, A. N., Kumar, V., and Saxena, A. K. (2020). Microbe-mediated alleviation of drought stress and acquisition of phosphorus in great millet (*Sorghum bicolor* L.) by drought-adaptive and phosphorus-solubilizing microbes. *Biocatalysis and agricultural Biotechnology*, 23, 101501.
- [6] Callaway, R. M., & Ridenour, W. M. (2004). Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(8), 436–443.
- [7] Bardon, C., Piola, F., Haichar, F. el Z., Meiffren, G., Comte, G., Missery, B., Balby, M., and Poly, F. (2016). Identification of B-type procyanidins in *Fallopia* spp. involved in biological denitrification inhibition. *Environmental Microbiology*, 18(2), 644–655. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13062>
- [8] Wang, C., Jiang, K., Zhou, J., and Wu, B. (2018). *Solidago canadensis* invasion affects soil N-fixing bacterial communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Science of the Total Environment*, 631–632, 702–713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.061>
- [9] Yuan, Z., Zheng, X., Zhao, Y., Liu, Y., Zhou, S., Wei, C., Hu, Y., and Shao, H. (2018). Phytotoxic compounds isolated from leaves of the invasive weed *Xanthium spinosum*. *Molecules*, 23(11). <https://doi.org/10.3390/molecules23112840>
- [10] Nibret, E., Youns, M., Krauth-Siegel, R. L., and Wink, M. (2011). Biological activities of xanthatin from *Xanthium strumarium* leaves. *Phytotherapy Research*, 25(12), 1883–1890. <https://doi.org/10.1002/ptr.3651>
- [11] Chen, Y., Li, L., Jiang, L. R., Tan, J. Y., Guo, L. N., Wang, X. L., Dong, W., Wang, W. B., Sun, J. K., and Song, B. (2022). Alkaloids constituents from the roots of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. with their cytotoxic activities. *Natural Product Research*, 36(6), 1454–1459. <https://doi.org/10.1080/14786419.2021.1888291>

- [12] Fan, W., Fan, L., Peng, C., Zhang, Q., Wang, L., Li, L., & Wu, C. (2019). Traditional uses, botany, phytochemistry, pharmacology, pharmacokinetics and toxicology of *Xanthium strumarium* L.: A review. *Molecules*, 24(2), 359.
- [13] Pyšek, P., Skálová, H., Čuda, J., Guo, W. Y., Doležal, J., Kauzál, O., Lambertini, C., Pyšková, K., Brix, H., and Meyerson, L. A. (2019). Physiology of a plant invasion: Biomass production, growth and tissue chemistry of invasive and native *Phragmites australis* populations. *Preslia*, 91(1), 51–75. <https://doi.org/10.23855/preslia.2019.051>
- [14] Rodríguez-Caballero, G., Caravaca, F., Alguacil, M. M., Fernández-López, M., Fernández-González, A. J., and Roldán, A. (2017). Striking alterations in the soil bacterial community structure and functioning of the biological N cycle induced by *Pennisetum setaceum* invasion in a semiarid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 109, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.012>
- [15] Al-Dhabaan, F. A. M., and Bakhali, A. H. (2017). Analysis of the bacterial strains using Biolog plates in the contaminated soil from Riyadh community. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(4), 901–906. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.043>
- [16] Milagres, A. M., Machuca, A., and Napoleao, D. (1999). Detection of siderophore production from several fungi and bacteria by a modification of chrome azurol S (CAS) agar plate assay. *Journal of Microbiological Methods*, 37(1), 1-6.
- [17] Callaway, R. M., Cipollini, D., Barto, K., Thelen, G. C., Hallett, S. G., Prati, D., Stinson, K., and Klironomos, J. (2008). Novel weapons: Invasive plant suppresses fungal mutualists in America but not in its native Europe. *Ecology*, 89(4), 1043–1055. <https://doi.org/10.1890/07-0370.1>
- [18] Marco, J. A., Sanz-Cervera, J. F., Corral, J., Carda, M., and Jakupovic, J. (1993). Xanthanolides from *Xanthium*: absolute configuration of xanthanol, isoxanthanol and their C-4 epimers. *Phytochemistry*, 34(6), 1569-1576.
- [19] Zhang, J., Zhao, R., Jin, L., Pan, L., and Lei, D. (2022). Xanthanolides in *Xanthium* L.: structures, synthesis and bioactivity. *Molecules*, 27(23), 8136. <https://doi.org/10.3390/molecules27238136>
- [20] Saha, D., Kumar, R., Ghosh, S., Kumari, M., and Saha, A. (2012). Control of foliar diseases of tea with *Xanthium strumarium* leaf extract. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011>

Araştırma Makalesi

Kaotik Sistemlerin Kontrolü için Bir Kullanıcı Grafik Arabirim Tasarımı

Usame Elhüseyyan ¹ , Mustafa Türk ^{2,*}  ve Vedat Çelik ³ 

Gönderim: 21.05.2025

Kabul: 12.06.2025

¹Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye; 222113117@firat.edu.tr

^{2,3}Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye; 2mturk@firat.edu.tr, 3celik@firat.edu.tr

* Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışmada, farklı özelliğe ve dinamiğe sahip 21 kaotik sistemin, klasik PID, Doğrudan Geri Beslemeli Kontrol, Pasif Kontrol ve Kayan Kipli Kontrol gibi 4 farklı kontrol yöntemi ile her bir sistemin kontrolü sağlanmıştır. Bu çalışmada, MATLAB/SIMULINK ve Grafik Kullanıcı Ara Birim araç kutusu ile bir kullanıcı ara birimi tasarlanmış ve 84 farklı uygulama gerçekleştirilerek uygulanan kontrol yöntemiye göre oturma zamanı, kalıcı durum hatası, maksimum aşma gibi sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak seçilen kaotik sisteme en iyi performansa sahip kontrol yönteminin bulunması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablolar yardımı ile incelenebilmesi için ayrıntılı veriler içerecek şekilde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: kaos; kaos kontrol; kullanıcı grafik arabirimi; MATLAB

Research Article

A Graphical User Interface Design for the Control of Chaotic Systems

Abstract: In this study, the control of 21 chaotic systems with different characteristics and dynamics was achieved using five different control methods: classical PID, Direct Feedback Control, Passive Control ve Sliding Mode Control. A graphical user interface was designed using MATLAB/SIMULINK and the Graphical User Interface Toolbox. Through 84 different applications, performance metrics such as settling time, steady-state error, and maximum overshoot were compared based on the applied control method, aiming to determine the control technique that delivers the best performance for the selected chaotic system. The results were presented with detailed data in tables for thorough analysis.

Keywords: chaos; chaos control; graphic user interface; MATLAB

1. Giriş

Kaos, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde gözlemlenen temel özelliklerinden biri olarak, deterministik olmalarına rağmen öngörülemezlik ve karmaşıklık taşıyan bir fenomendir. Kaotik sistemler, pozitif Lyapunov üstelleri ile karakterize edilen başlangıç koşullarına aşırı duyarlılık, aperiyojiklik ve ergodiklik gibi özellikleri nedeniyle mühendislik, biyoloji ve ekonomi gibi farklı disiplinlerde yoğun şekilde incelenmektedir [1-3]. Tarihsel olarak kaotik davranış, özellikle mühendislik, elektronik, iletişim sistemlerinde kaotikliğin kontrol edilmesi önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Başka bir deyişle yaklaşık 20. yüzyılın sonlarına kadar dinamik sistemlerde istenmeyen bir durum olarak kabul edilmiş ve o davranışı bastırmak amacıyla parametre ayarlama tekniğine başvurarak kontrolü gerçekleştirilmiştir [4]. Kaotik osilasyonlar elektrik devrelerinde istenmeyen titreşimlere yol açarken, biyolojik sistemlerde düzensiz kalp atışlarına veya tedarik zincirlerinde tahmin edilemez dalgalanmalara neden olabilir. Ancak veri şifreleme, haberleşme ve biyomedikal mühendisliği gibi alanlarında 1990'lar- dan sonra hızlı gelişimi kaotik sinyallerin kullanım potansiyeli ortaya çıkarmıştır [5-12], bu da kaos kontrolün önemli bir araştırma alan haline getirmiştir. Ott, Grebogi ve Yorke (OGY) tarafından 1990'de önerilen parametrik pertürbasyon temelli kontrol yöntemi kaos kontrolünde bir dönüm noktası olarak sayılmaktadır. OGY yöntemi, kaotik sistemlerde bulunan hassas duyarlılığı kullanarak küçük parametre ayarlamalarıyla hedef periyodik orbitlere stabilize edilebileceğini teorik ve deneysel olarak kanıtlamıştır [4]. OGY yöntemini takiben, kaotik sistemlerin kontrolü sadece periyodik orbitlerle sınırlı kalmayıp, sabit denge noktalarının stabilizasyonu için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir [13-18].

Güncel literatürde, kaotik sistemlerin kontrol çalışmaları çoğunlukla tek bir kontrol yöntemi veya tek bir sistem tipi üzerinde gözlemlenmektedir. Bu durum, kontrol yöntemlerinin performansını sistemin derecesi, boyutu veya çekici yapısı gibi faktörlerin etkilendiğine dair sistematik bir karşılaştırma eksikliğine yol açmaktadır. Literatürde tek bir çalışma kapsamında bu kadar fazla sisteme ve kontrol stratejisine yer verilmiş bir çalışma bulunmamakla birlikte genel olarak kontrol simülasyonlarının çoğu komut satırı tabanlı araçlarla gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışma, literatürdeki bu boşlukları doldurmaya yönelik kullanıcı dostu bir grafik arayüz (GUI), MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı dinamiklere sahip 21 kaotik sistemin (tek çekici, çoklu çekici, dört boyutlu, otonom ve non-otonom yapılar dahil) sabit denge noktalarının stabilizasyon kontrolü üzerine kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Bu sistemler, dört farklı kontrol yöntemi (pasif kontrol, doğrudan geri besleme, klasik PID, Kayan kipli kontrol) ile kontrol edilmiş ve performansları aşma, oturma zamanı, kalıcı durum hatası ve RMS hatası gibi kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda her bir kontrol yöntemin farklı sistem yapılarına göre avantajları ve dezavantajları sunulmuştur. Ayrıca, bu çalışma kullanıcıların parametre optimizasyonu ve sonuç görselleştirme süreçlerini azaltmaya yönelik genişletilebilir.

Bu çalışmada, Bölüm 2'de kullanılan kaotik sistemlerin matematiksel modelleri ve onların temel kavramları tanıtılmıştır ve ardından bu sistemlerin kontrolüne yönelik uygulanacak kontrol yöntemlerinin teorik temelleri açıklanmıştır. Bölüm 3'te GUI mimarisi ve simülasyon altyapısı detaylandırılmıştır. Son olarak Bölüm 4'te deneysel sonuçlar ve performans analizi sunulmuştur ve gelecekte yapılabilecek ek geliştirilmeler hakkında öneriler sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kaotik Sistemler

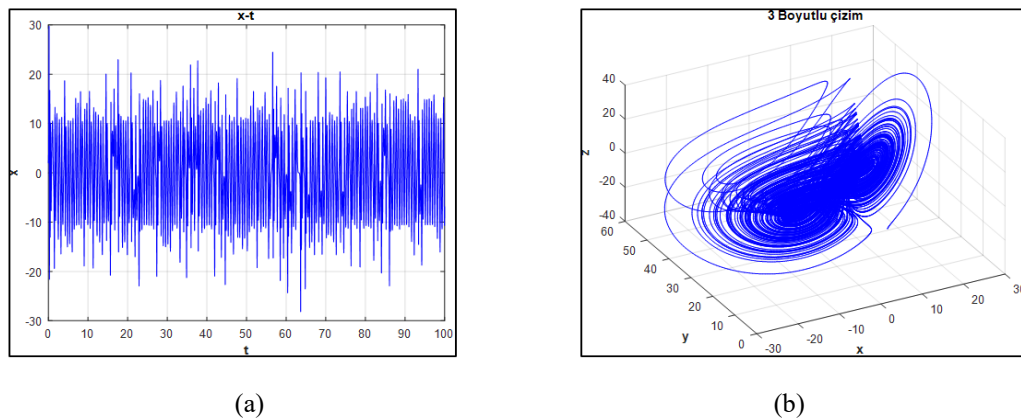
Bu çalışmada, Otonom, otonom olmayan, yüksek dereceli ve çoklu çekerli kaotik 21 farklı sistem seçilmiştir. Genel olarak literatürde yoğun olarak kullanılan Chua, Lorenz, Duffing, Lorenz-Stenflo, Lü, Chen, Rossler ve çoklu çeker oluşturan Four-wings gibi bilinen sistemler tercih edilmiştir [5-9]. Bu bölümde, modellenmesi gerçekleştirilen her bir kaotik sınıfa ait sistemlerden bir tanesine temel özelliklerinden bahsedilmiştir.

2.1.1. Otonom Sistemler: Chen Kaotik Sistemi

Otonom kaotik sistemler, dış kuvvetleri olmayan ve kendi dinamiklerinde bağımsız değişken içermeyen kaotik sistemlerdir. Buna örnek olarak Van der Pol, Chen, Chua, Lorenz, Lu, Rossler, T Koatik Sistem ve Dynamo disc sistemleri verilebilir. Bunlardan biri olan Chen sistemin matematiksel modeli Denklem (2.1)'de verilmektedir [5].

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= (c - a)x + cy - xz \\ \dot{z} &= -bz + xy\end{aligned}\quad (2.1)$$

Denklem (2.1) ile gösterilen Chen kaotik sistemi bu parametreler altında $a = 35, b = 3, c = 28$ Şekil 1'de gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfıra eşitleyerek, denge noktaları $E_1 = (0, 0, 0), E_2 = (-7.9373, -7.9373, 21)$ ve $E_3 = (7.9373, 7.9373, 21)$ olarak bulunur.



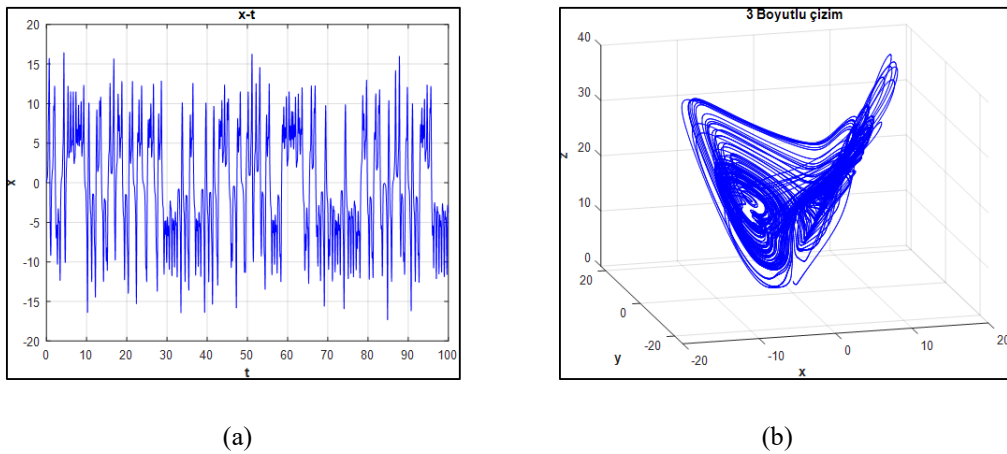
Şekil 1. Chen kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.1.2. Otonom Olmayan Sistemler: Zorlanmış Lorenz Kaotik Sistemi

Otonom olmayan kaotik sistemler, açıkça zaman değişkenine bağlı sistemler olup otonom sistemlere kıyasla daha karmaşık ve öngörülmez sistemlerdir. Buna örnek olarak otonom olmayan Chua, Değişken parametrelili Van der Pol, Duffing, Zorlanmış Lorenz kaotik sistemleri verilebilir. Bu bağlamda matematiksel olarak Zorlanmış Lorenz kaotik sistemin modeli Denklem (2.2)'de verilmektedir [10].

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \sigma(y - x) \\
 \dot{y} &= -xz + r(1 + \epsilon \cos(wt))x - y \\
 \dot{z} &= xy - bz
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Denklem (2.2) ile gösterilen Zorlanmış Lorenz kaotik sistemi, $\sigma = 10, r = 20, \epsilon = 0.5, w = 19.2, b = 8/3$ parametreleri altında Şekil 2’de gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfıra eşitleyerek, denge noktaları $E_1 = (0, 0, 0), E_2 = (-7.1181, -7.1181, 19)$ ve $E_3 = (7.1181, 7.1181, 19)$ olarak bulunur.



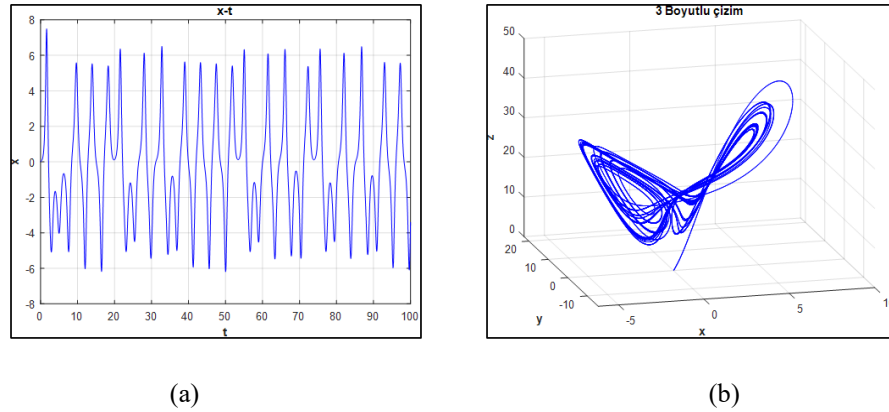
Şekil 2. Zorlanmış Lorenz kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.1.3. Yüksek Dereceli Kaotik Sistemler: Lorenz Stenflo Kaotik Sistemi

Dördüncü mertebeden kaotik sistemler, mertebesi daha düşük kaotik sistemlere kıyasla daha zengin bir davranış sergiler. Bu sistemler, faz uzayları daha karmaşık olup hiperkaos ve çoklu çekiciler gibi dinamik özellikler oluşturulmaktadır. Bu sistemler, birden fazla Lyapunov üsteline sahip olduklarından dolayı yüksek derecede öngörülmez olur ve bu sayede güvenli iletişim, şifreleme alanlarında çalışmaları yoğunlaşmaktadır [5]. Buna örnek olarak Dört Boyutlu Hiperkaotik Sistem, Dört Çekicili, Dört Kanatlı, Hiperkaotik Chen, Lorenz Stenflo kaotik sistemler verilebilir. Bunlardan biri olan Lorenz Stenflo kaotik sistemin matematiksel modeli Denklem (2.3)’te verilmektedir [10].

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= a(y - x) + dw \\
 \dot{y} &= cx - xz - y \\
 \dot{z} &= xy - bz \\
 \dot{w} &= -x - aw
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Denklem (2.3) ile gösterilen Lorenz Stenflo kaotik sistemi, $a = 1, b = 0.7, c = 26, d = 1.5$ parametreleri altında Şekil 3’te gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfıra eşitlenerek, denge noktaları $E_1(0, 0, 0, 0), E_2(2.5652, 6.4129, 23.5, -2.5652)$ ve $E_3(-2.5652, -6.4129, 23.5, 2.5652)$ olarak bulunmaktadır.



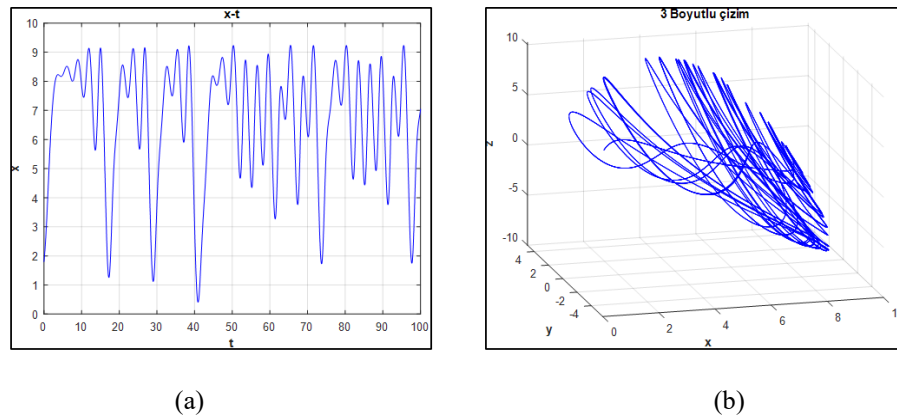
Şekil 3. Lorenz Stenflo kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.1.4. Tekli ve Çoklu Çekicili Kaotik Sistemler

Kaotik sistemler farklı bağlamlarda incelenebilen ve denge noktaları ile dinamik yapılarına göre farklı çekici türleri sergileyebilir. Bu sistemler genellikle tekli çekicili veya çoklu çekicili olarak sınıflandırılmaktadır. Tekli çekicili sistemler, yörüngeler belirli bir çekiciye yönelirken, çoklu çekicili sistemlerde başlangıç koşullarına bağlı farklı çekicilere ulaşılabilir. Bu bağlamda, tekli çekicili kaotik sistemlere örnek olarak New Jerk, Proposed Jerk ve 3 Boyutlu Jerk sistemler verilebilirken, Çoklu çekici sistemler kapsamında ise, üç farklı çekiciye sahip bir sistem ve bir boyutlu Çoklu Çekici sistemler verilebilir. Bu bağlamda matematiksel olarak 3 Boyutlu Jerk kaotik sistemin modeli Denklem (2.4)'te verilmiştir [12].

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= ax - by - z + cxy - p(x^2 + y^2)\end{aligned}\quad (2.4)$$

Denklem (2.4) ile gösterilen 3 Boyutlu Jerk kaotik sistemi, bu parametreler $a = 7.5, b = 4, c = 0.03, p = 0.9$ altında Şekil 4'te gösterildiği üzere kaotik davranış sergilemektedir. Sistem dinamiği sıfıra eşitleyerek, denge noktaları $E_1(0, 0, 0)$ ve $E_2(8.3333, 0, 0)$ olarak bulunmaktadır.



Şekil 4. Üç boyutlu Jerk kaotik sistemine ait (a) x-durum değişkeni, (b) Üç boyutlu gösterimi

2.2. Kaos Kontrol Yöntemleri

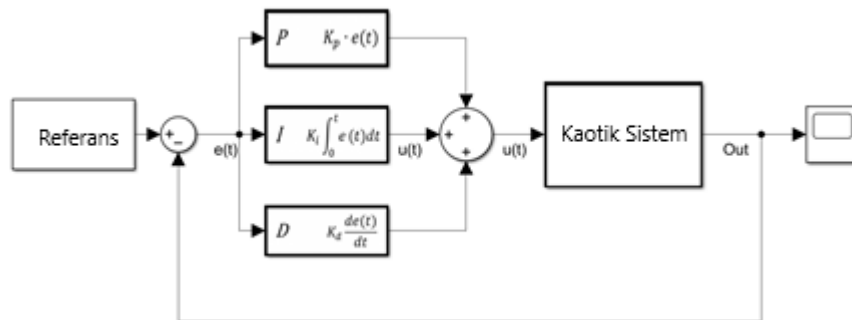
Kaotik sistemler karmaşıklık derecesi belirlemede yardım eden yöntemlerden biri Lyapunov üstelidir. Farklı Lyapunov üstel derecesi olan kaotik sistemlere PID, doğrudan geri besleme kontrol, pasif kontrol, genişletilmiş durum gözlemcisi tabanlı kontrol ve kayma kipli kontrol yöntemlerin tanıtımı yapılmıştır.

2.2.1. Klasik PID Kontrolü

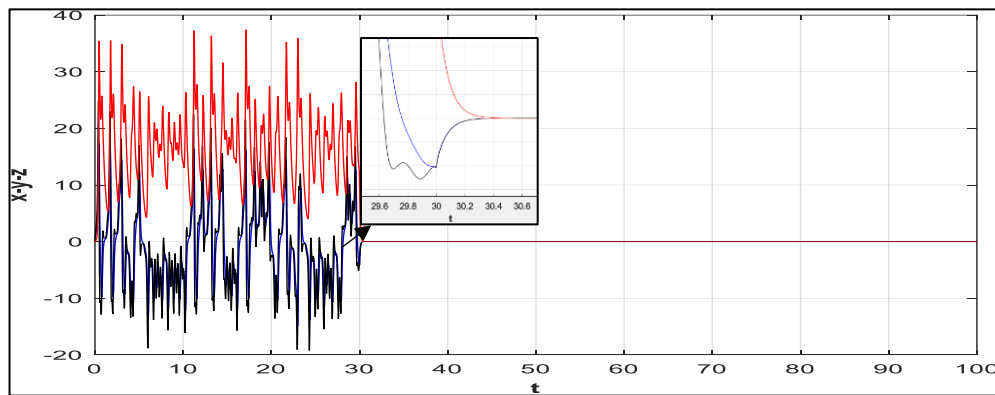
PID kontrol yöntemi, k_p , k_i ve k_d kontrol parametre ayarı yaparak hatanın sırasıyla oransal, integral ve türevsel olarak Denklem (2.5)'de gösterildiği gibi kontrol sinyali üretir [12].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Zorlanmış Lorenz kaotik sistemi üzerinde PID kontrol yönteminin uygulamasına ait Simulink modeli, Şekil 5'de gösterilmiştir. Kontrol sinyali $t = 30sn$ 'de aktifleştirilmiş kontrol sonucu elde edilen sistem davranışı Şekil 6'da verilmiş ve bu şekillerden elde edilen kontrol sonuçları da ileriki kısımlarda ve [19]'da ayrıntılı olarak irdelenmiştir.



Şekil 5. PID Kontrol Modeli



Şekil 6. Zorlanmış Lorenz kaotik sisteminin PID kontrol sonucu

2.2.2. Doğrudan Geribeslemeli Kontrol

Doğrudan geribesleme kontrolü, basit yapısından dolayı diğer kontrol yöntemlere kıyasen daha kolay tasarlanabilir olup çok tercih kazanan bir yöntemdir [14]. Genel itibarı ile doğrudan geribesleme kontrolün asıl çalışma prensipi mevcut çıkış sinyalinin, hedeflenen referans değeri çıkartılıp bir kazanç sabitine çarptıktan sonra sisteme eklenmesiyle gerçekleşmektedir. Ancak, doğrudan geribesleme kontrolü sistemin jacobian matrisi üzerine tasarlanır ve lokal kararlılığı sağlayan doğrusal kontrol yasaları üzerine kurulmaktadır [14]. Bu yöntem ayrıntılı bir şekilde Denklem (2.1) ile verilen Chen kaotik sistem üzerinde anlatılmıştır. Chen kaotik sisteme kontrol sinyali $u_1 = -k_1(x - \bar{x})$, $u_2 = -k_2(y - \bar{y})$, $u_3 = -k_3(z - \bar{z})$ ekleyerek Denklem (2.6)'de gösterilen forma dönüşmektedir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) - k_1(x - \bar{x}) \\ \dot{y} &= (c - a)x + cy - xz - k_2(y - \bar{y}) \\ \dot{z} &= -bz + xy - k_3(z - \bar{z})\end{aligned}\quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da bulunan kontrol kazançları, $k_1 = k_2 = k_3 = k$ kabul edilerek sistemin Jacobi matrisi Denklem (2.7)'te gösterildiği gibi bulunur.

$$J = \begin{bmatrix} -k - 35 & 35 & 0 \\ -\bar{z} - 7 & 28 - k & -\bar{x} \\ \bar{y} & \bar{x} & -k - 3 \end{bmatrix}\quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'deki $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, denge noktaları temsil etmektedir. Denge noktası $E_1 = (0,0,0)$ olarak seçilmiş olup ve jacobı matrisi Denklem (2.8)'te gösterilmiştir.

$$J_{E_1} = \begin{bmatrix} -k - 35 & 35 & 0 \\ -7 & 28 - k & 0 \\ 0 & 0 & -k - 3 \end{bmatrix}\quad (2.8)$$

Bu doğrultuda, bu eşitliği $|I\lambda - J_{E_1}| = 0$ sağlayarak Denklem (2.9) ile ifade edilen karakteristik denkleme ulaşılır.

$$\lambda^3 + 10\lambda^2 + 3k\lambda^2 - 714\lambda + 3k^2\lambda + 20k\lambda + k^3 + 10k^2 - 714k - 2205\quad (2.9)$$

Ardından, Denklem (2.9)'i bu formata $\lambda^3 + C_1\lambda^2 + C_2\lambda + C_3$ dönüştürerek Denklem (2.10) bulunur.

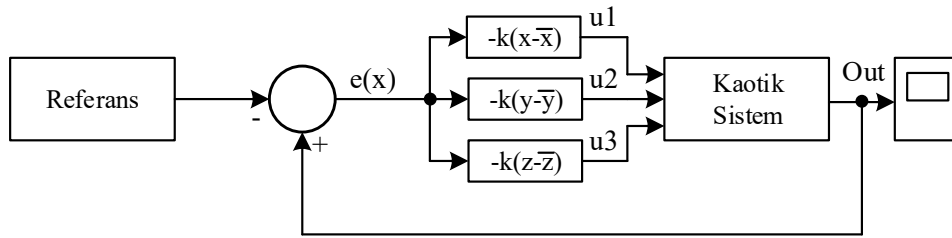
$$\lambda^3 + (3k + 10)\lambda^2 + (-714 + 3k^2 + 20k)\lambda + k^3 + 10k^2 - 714k - 2205\quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da kazanç sabiti k , Denklem (2.11)'de gösterilen Routh–Hurwitz kriterin iki şartı sağlayacak şekilde seçildiğinde sistemin özdeğerleri negatif bölgede olur ve başka bir deyişle sistem

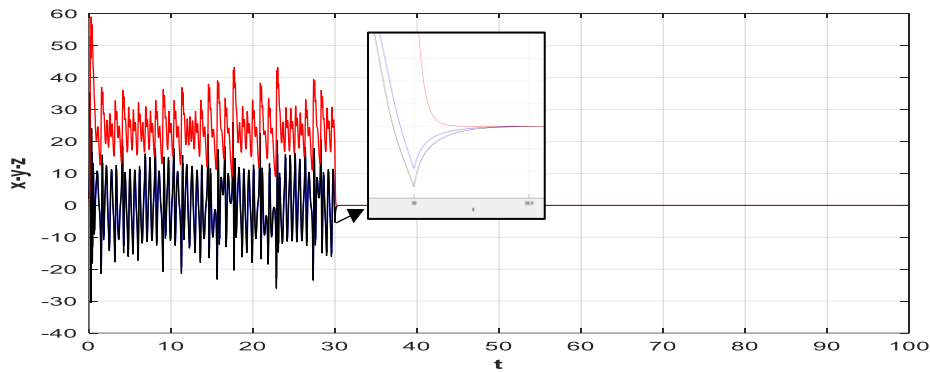
kararlı hale gelir. Bu analiz E_1 denge noktası için yapılmış ve kontrol kazancı $k > 24$ olacağını belirtilmiştir. Sistemin diğer denge noktaları E_2 , E_3 için aynı analizi yaparak ve her biri için uygun k kazancı belirledikten sonra, tüm durumları kapsayabilen en uygun k seçilir. Bu durumda da $k = 34$ olarak ayarlanmıştır.

$$\begin{aligned} C_1 > 0, C_2 > 0, C_3 > 0 \\ C_1 C_2 > C_3 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Chen kaotik sistemi üzerinde Doğrudan Geribesleme kontrol yönteminin uygulamasına ait Simulink modeli, Şekil 7’de gösterilmiştir. Kontrol sinyali $t = 30sn$ ’de aktifleştirilmiş olup sonucu Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Doğrudan geribeslemeli kontrol modeli



Şekil 8. Chen kaotik sistemin doğrudan geribesleme kontrol sonucu

2.2.3. Pasif Kontrol

Pasif kontrol yönteminde kontrol edilecek sistemin iç dinamikleri kullanılarak gerekli kontrol sağlanır. Bu kontrol yöntemi Lyapunov ve geri beslemeyi esas olarak almaktadır [15-16]. Genel olarak kontrol edilecek sistem Denklem (2.12) ile gösterilen forma getirilerek kontrol sağlanır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Burada durum değişkeni $x \in R^n$, giriş sinyali $u \in R^n$ ve çıkış sinyali $y \in R^m$ olup sistemin $f(x)$ ve $g(x)$ fonksiyonları düzgün vektor alanları olarak tanımlanmakta olup, $h(x)$ pürüzsüz bir haritalama fonksiyondur [8-9]. Minimum fazlık kriteri sağlandığında pasiflik şartları uygun bir kontrol sinyali seçerek sağlanır [10]. Denklem (2.13) ile tanımlanan kontrol sinyali pasiflik şartlarını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

$$u = a(z, y)^{-1} \left[-b^T(z, y) - \frac{\partial}{\partial z} W(z) p(z, y) - ky + v \right] \quad (2.13)$$

Pasiflik kriteri : Aşağıdaki iki koşula sağlayan bir sistem pasif bir sistemdir:

$f(x)$ ve $g(x)$ var olup düzgün vektor alanları olmalı, $h(x)$ pürüzsüz fonksiyon haritalama olmalıdır[10].

Denklem (2.14) ile ilişkin olarak, tüm $t \geq 0$ için $b \geq 0$ ve $\rho \geq 0$ gerçekteğerleri bulunmalıdır.

$$\int_0^t u^T(\tau) y(\tau) d\tau \leq b + \rho \int_0^t y^T(\tau) y(\tau) d\tau \quad (2.14)$$

Pasif kontrol yöntemi Denklem (2.3)'te belirlenen Lorenz Stenflo kaotik sistem üzerinde uygulanarak kontrol yöntemi verilmiştir. Yöntemin ilk adımlarında kontrol sinyalinin hangi durum değişkenine ekleneceğini belirlemek için $y = x_1$ olarak varsayılır ve geri kalan durum değişkenleri $z = \phi(x)$ şeklinde yazılarak, durum değişkenleri $z_1 = x_2$, $z_2 = x_3$, $z_3 = x_4$ olarak belirlenerek sistem Denklem (2.15) ile gösterilen matematiksel forma dönüştürülür.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= cy - yz_2 - z_1 \\ \dot{z}_2 &= yz_1 - bz_2 \\ \dot{z}_3 &= -y - az_3 \\ \dot{y} &= a(z_1 - y) + dz_3 + u \end{aligned} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15)'i, Denklem (2.16) ile kıyaslayarak kontrolsüz kısmın dinamikleri $f_0(z)$ Denklem (2.17), çıkış değişkenlerin etkisi $p(z, y)$ Denklem (2.18), $b(z, y)$ ve $a(z, y)$ sırasıyla Denklem (2.19) ve Denklem (2.20)'te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= f_0(z) + p(z, y)y \\ \dot{y} &= b(z, y) + a(z, y)u \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$f_0(z) = \begin{bmatrix} -z_1 \\ -bz_2 \\ -az_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$p(z, y) = \begin{bmatrix} c - z_2 \\ z_1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$b(z, y) = a(z_1 - y) + dz_3 \quad (2.19)$$

$$a(z, y) = 1 \quad (2.20)$$

Sistemin sıfır dinamiğinin Lyapunov anlamında kararlılığı test etmek için, z değişkeninin enerjisini temsil eden pozitif tanımlı fonksiyon Denklem (2.21)'de tanımlanmıştır.

$$W(z) = 1/2(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2) \quad (2.21)$$

$W(z)$ 'in türevi ise, Denklem (2.22)'de gösterildiği gibi $\dot{W}(z) < 0$ sonucuna varılmıştır ve bu sayede, kontrolsüz kısmın dinamikleri $f_0(z)$, çıkış $y = 0$ tutulduğunda, başlangıç koşullarına bakılmaksızın iç dinamiklerin asimptotik olarak denge noktasına yakınsadığını belirlenir.

$$\dot{W} = \frac{dW(z)}{dt} = \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) = [z_1 \quad z_2 \quad z_3] \begin{bmatrix} -z_1 \\ -bz_2 \\ -az_3 \end{bmatrix} = -(z_1^2 + bz_2^2 + az_3^2) \leq 0 \quad (2.22)$$

Pasiflik kriterinin ikinci şartını sağlamak için Denklem (2.21)'i içeren ve pozitif tanımlı genel depolama fonksiyonu Denklem (2.23)'te tanımlanmaktadır.

$$V(z, y) = W(z) + 1/2y^2 \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'ün türev alma işlemleri Denklem (2.24)-(2.26) ile verilmiştir.

$$\frac{d}{dt}V(z, y) = \frac{\partial W(z)}{\partial z} \dot{z} + y\dot{y} \quad (2.24)$$

$$\frac{d}{dt}V(z, y) = \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) + \frac{\partial W(z)}{\partial z} p(z, y)y + yb(z, y) + ya(z, y)u$$

$\partial W(z)/\partial z f_0(z) \leq 0$ olduğundan Denklem (2.24), Denklem (2.25) ile yeniden düzenlenmiştir.

$$\frac{d}{dt}V(z, y) \leq \frac{\partial W(z)}{\partial z} p(z, y)y + yb(z, y) + ya(z, y)u \quad (2.25)$$

Denklem (2.13) ile gösterilen kontrol sinyali, Denklem (2.25)'deki yerine yerleştirilerek Denklem (2.26) oluşur.

$$\frac{d}{dt}V(z, y) \leq -ky^2 + vy \quad (2.26)$$

Denklem (2.26), Denklem (2.27) forma getirilir, ardından $V(z_0, y_0) = \rho$ ve $V(z, y) > 0$ doğrultusunda Denklem (2.28) ile pasiflik kriterin ikinci şartı sağlanır.

$$V(z, y) - V(z_0, y_0) \leq \int_0^t v(\tau)y(\tau)d\tau - \int_0^t ky(\tau)^2d\tau \quad (2.27)$$

$$\int_0^t v(\tau)y(\tau)d\tau + \rho \geq \int_0^t ky(\tau)^2d\tau + V(z, y) \geq \int_0^t ky(\tau)^2d\tau \quad (2.28)$$

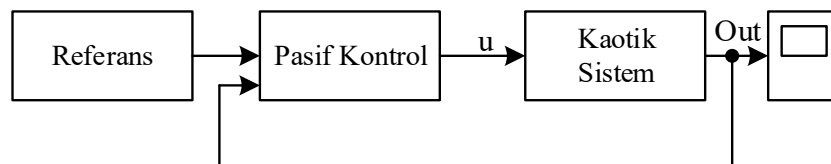
Veriler sonucunda kontrol sinyali Denklem (2.29) ve Denklem (2.30) ile verilmiştir. Kontrol sinyali Denklem (2.3)'e eklenip dinamikleri sıfıra eşitlenerek değeri Denklem (2.31)'de verilmiştir.

$$u = -(a + c)z_1 + (a - k)y - (d + 1)z_3 + v \quad (2.29)$$

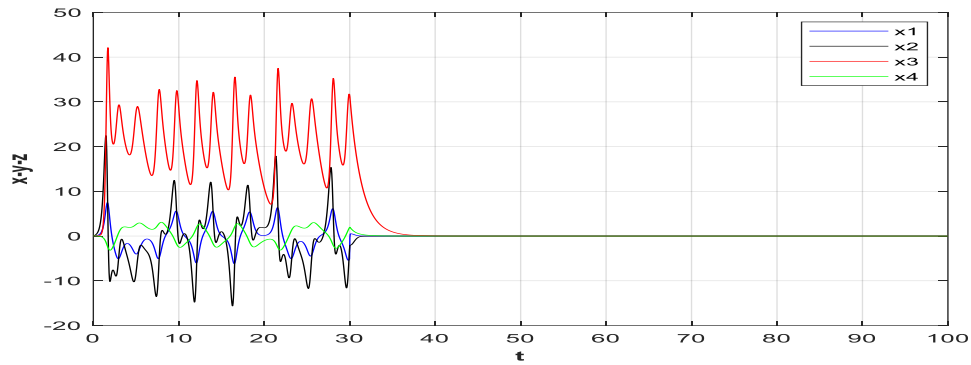
$$u = -(a + c)x_2 + (a - k)x_1 - (d + 1)x_4 + v \quad (2.30)$$

$$v = \alpha x_1^* + cx_2^* + x_4^* \quad (2.31)$$

Pasif kontrol Simulink modeli ve t=30s anında devreye alınan kontrolörün sonucu sırasıyla Şekil 9'da ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Pasif Kontrol Modeli



Şekil 10. Lorenz Stenflo kaotik sistemin pasif kontrol sonucu

2.2.4. Kayan Kipli Kontrol

Kayan Kipli Kontrol (KKK), doğrusal olmayan sistemlerde kullanılan kontrol yöntemlerinden öne çıkan ve oldukça etkin bir yöntem olarak bilinmektedir [17-18]. KKK yöntemi adını oluşturduğu kayma yüzeyinden almaktadır. KKK yönteminde oluşturulan kayma yüzeylerinin özelliklerine göre sınıflandırılmakta olup, bu çalışmada doğrusal kayma yüzeyi kullanılmıştır. KKK yöntemi, sistemin hareketini oluşturulan kayma yüzeyine çeker ve bu yüzeyin üzerinde kalmasını sağlar böylelikle sistem istenilen denge noktasına yönlendirilir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y + u_1 \\ \dot{y} &= z + u_2 \\ \dot{z} &= ax - by - z + cxy - p(x^2 + y^2) + u_3\end{aligned}\quad (2.32)$$

Sistemin denge noktası (x_d, y_d, z_d) olarak tanımlandığında, hata değişkenleri $e_1 = x - x_d$, $e_2 = y - y_d$ ve $e_3 = z - z_d$ olur ve $y_d = z_d$, $ax_d - px_d^2 = 0$ doğrultusunda, sistemin hata dinamiği Denklem (2.33) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= e_2 + y_d + u_1 \\ \dot{e}_2 &= e_3 + z_d + u_2 \\ \dot{e}_3 &= -pe_1^2 - pe_2^2 + ce_1e_2 + e_1(a + 2px_d + cy_d) + e_2(-b - 2py_d + cx_d) - e_3 + u_3\end{aligned}\quad (2.33)$$

Denklem (2.33)'ün doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenleri, sırasıyla Denklem (2.34) ve Denklem (2.35) ile gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 + y_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 + z_d \\ (a + 2px_d + cy_d) & (-b - 2py_d + cx_d) & -1 \end{bmatrix}\quad (2.34)$$

$$\eta(e_1, e_2, e_3) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -pe_1^2 - pe_2^2 + ce_1e_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Kontrol sinyali $u = [u_1, u_2, u_3]^T$, doğrusal olmayan terimleri yok edecek şekilde tasarlanıp Denklem (2.36)'de gösterilmiştir.

$$u = -\eta(e_1, e_2, e_3) + Bv \quad (2.36)$$

Oluşturulacak kayma yüzeyi $s = Ce = 0$ olarak tanımlanır ve sistemin bu yüzeyin üzerinde kalması için $\dot{s} = 0$ koşulun sağlanması gerekmektedir. Bunu takiben $\dot{s} = C\dot{e}$ Denklem (2.37)'de gösterildiği gibi bulunmuştur.

$$\dot{s} = C(Ae + \eta(e_1, e_2, e_3) + u) = 0 \quad (2.37)$$

Bu doğrultuda, u kontrol sinyali Denklem (2.37)'e eklenerek Denklem (2.38) ve eşdeğer kontrolü temsil eden Denklem (2.39) bulunur.

$$\dot{s} = C(Ae + Bv) = 0 \quad (2.38)$$

$$v = -(CB)^{-1}CAe \quad (2.39)$$

Sistemin kapalı çevrim dinamiğini temsil eden Denklem (2.40)'ın B matrisi ve PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) yöntemiyle elde edilen C matrisi, özdeğerler negatif olacak şekilde $B = [1 \ 1 \ 1]^T$, $C_1 = [812.3034 \ 564.3370 - 278.2805]$ ve $C_2 = [-994.2287 \ 908.4396 \ 77.0270]$ sırasıyla E_1 ve E_2 için tasarlanmıştır. Elde edilen özdeğerler de sırasıyla $eig_1 = \{-11.6899 \ 0 - 4.08\}$, $eig_2 = \{-104.058 \ 0 - 14.3699\}$ elde edilir [11].

$$\dot{e} = [I - B(CB)^{-1}C]Ae \quad (2.40)$$

Böylelikle sistem kayma yüzeyinin üzerinde kalmasını sağlayan eşdeğer kontrol sinyaline ulaşılmış olup sistemin kayma yüzeyine ulaşmaya sağlayan anahtarlama kontrolü Denklem (2.41) ile tanımlanan Lyapunov fonksiyonun kararlılığına bağlıdır.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (2.41)$$

Burada V pozitif tanımlı bir fonksiyon olup türevi ise Denklem (2.42)'deki koşulu sağlandığında sistem kararlı ve yakınsama davranışı tanımlar.

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} < 0 \quad (2.42)$$

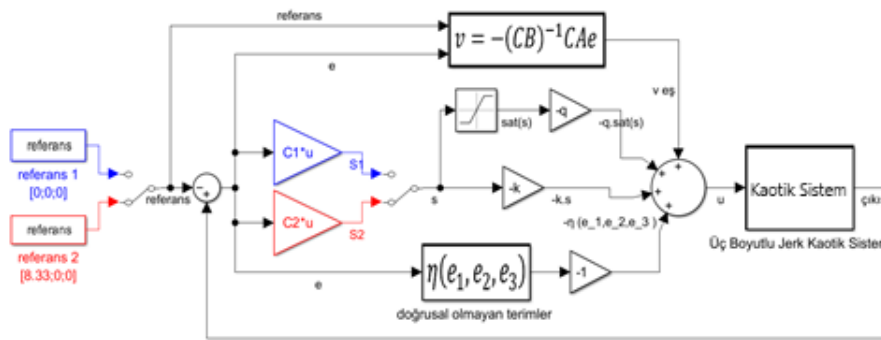
$\dot{s} = C\dot{e}$ denklemi kararlılığını koruyarak üstel hızda yakınsayacağını garanti etmek için Denklem (2.29), Denklem (2.43) ile yeniden tasarlanmıştır.

$$C(Ae + Bv) = -Ks - q\text{sign}(s) \quad (2.43)$$

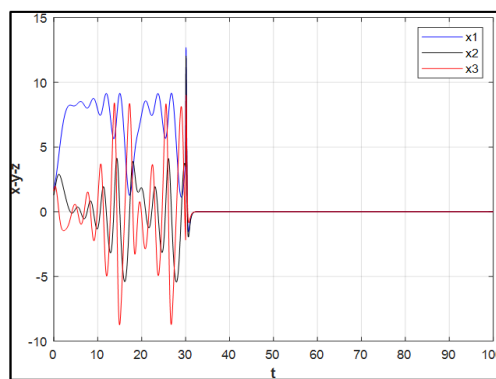
Bu takiben genel bir kontrol sinyali Denklem (2.44)'de verilmiştir.

$$v(t) = -CB^{-1}[CAe + Ks + q\text{sign}(s)] \quad (2.44)$$

Şekil 11'de gösterilen Simulink modelinde sign fonksiyonun oluşturduğu titreşimleri azaltmak için sat fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca, $t = 30\text{sn}$ 'de devreye alınan kontrolörün sonucu ve sistem davranışı Şekil 12'de verilmiştir.



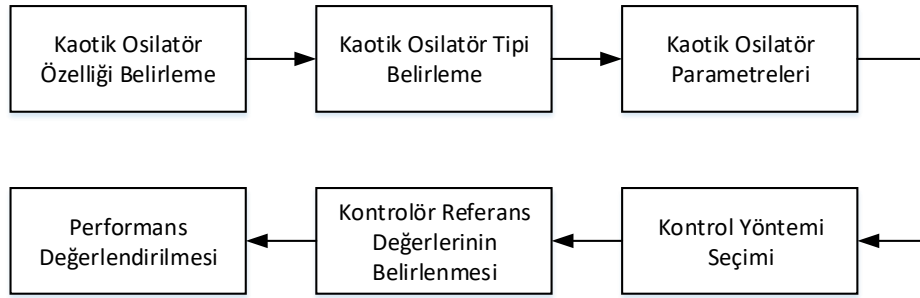
Şekil 11. Kayan Kipli Kontrol modeli



Şekil 12. Üç boyutlu Jerk kaotik sistemin Kayma Kipli Kontrol sonucu

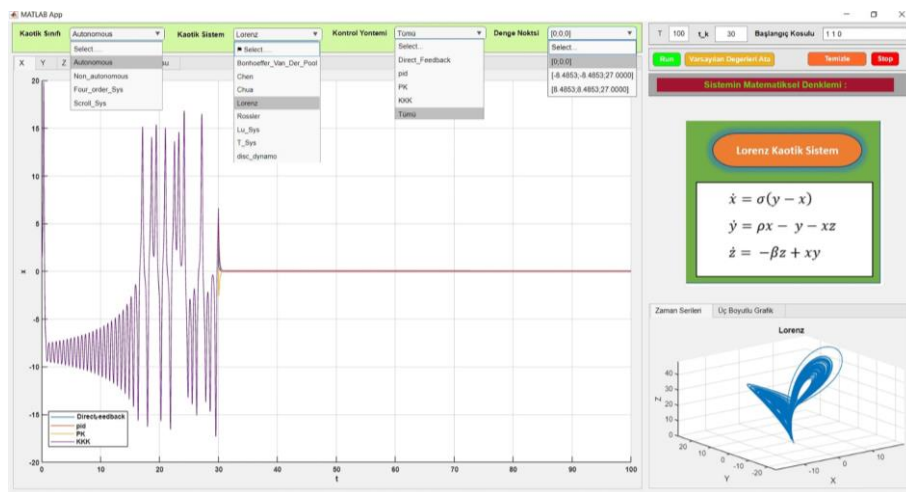
3. Yöntem

Bu çalışmada, bahsi geçen kaotik sistemlerin kontrolü için farklı kontrol yöntemlerinin uygulanmasına ve bu yöntemlerin performanslarının karşılaştırılmasına olanak sağlayan bir arayüz gerçekleştirilmiştir. MATLAB App Designer kullanarak gerçekleştirilen bu kullanıcı arayüzü, kontrol yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmek için kullanıcı dostu bir ortam sunmaktadır. Geliştirilen arayüze ait blok diyagramı ve sistemin çalışma mantığı Şekil 13’de gösterilmiştir.



Şekil 13. Arayüze ait çalışma mantığı.

- Kaotik Osilatör Özelliği Belirleme : Ana kaotik sınıfın seçilmesini sağlar.
 - Kaotik Osilatör Tipi Belirleme : Belirlenen kaotik sınıfa ait spesifik bir sistem seçilmesine olanak tanır.
 - Kaotik Osilatör Parametreleri: Seçilen osilatöre ait başlangıç şartlarının belirlenmesi.
 - Kontrol Yöntemi : ilgili sistem üzerine uygulanacak kontrol yönteminin belirlenmesini sağlar. Ayrıca, farklı kontrol yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla “Tümü” seceneği kullanılarak gerçekleşir.
 - Kontrolör Referans Değerlerinin Belirlenmesi : Seçilen referans değerlerin ulaşılması için kontrolör parametrelerinin belirlenmesi.
- Gerçekleştirilen arayüze ait MATLAB ekran görüntüsü ise Şekil 14’de verildiği gibidir.



Şekil 14. Gerçeklenen arayüzün görünümü.

Simülasyon sonuçları ise, kontrol edilen sistemin durum değişkenlerinin grafiklerini görselleştirmek amacıyla bir tap grubu içerisinde x, y, z, w olmak üzere eksenler yerleştirilmiştir. Ayrıca farklı bir sekmede, sistem üzerine uygulanan kontrolün performans kriter değerlerini içeren bir tablo bulunmakta olup Şekil 15’de görseli verilmiştir. Arayüzün sol alt köşesinde ise, sırasıyla seçilen sistemin matematiksel denklemlerini içeren bir görsel ile kontrolsüz sistemin zaman serilerinin ve faz portrelerinin görselleri yer almaktadır.

Kontrol Edilen Sistem	Kontrol Yöntemi	Aşma (x)	Aşma (y)	Aşma (z)	Yerleşme Süresi (x)	Yerleşme Süresi (y)	Yerleşme Süresi (z)	RMS Hatası (x)	RMS Hatası (y)	RMS Hatası (z)
Lorenz	Direct_Feedback	0	0	0	0.6440	0.7390	0.3570	0.1549	0.1549	0.1549
Lorenz	pid	0	0	0.4957	0.8230	0.8790	7.9770	0.1947	0.1947	0.1947
Lorenz	PK	2.5351	0	0	0.7120	0.8430	2.4990	0.1161	0.1161	0.1161
Lorenz	KKK	0	0	0	0.6680	1.0110	1.2710	0.0385	0.0385	0.0385

Şekil 15. Arayüz tablo görseli.

Genel olarak arayüzün tasarımı dinamik yapıda yapılmıştır örneğin (Kaotik sınıfı seçimine bağlı, kaotik system dropdown bileşenleri ayarlanır). Aynı şekilde kaotik sınıfı ile denge noktası çalışmaktadır. Böylelikle, kullanıcının hataya düşmesini önlenilmiş olup kaotik sistemin ve kontrol yöntemin seçimi yaparak istenilen kaotik sistemin kontrolü inceleyebilecektir. Arayüzün arka planında ise seçime bağlı olarak 84 tane Simulink modeli bulunmakta ve seçilen parametrelere/kaotik osilatöre/kontrol yöntemine göre bir tanesi çalışmaktadır. Karşılaştırma amaçlı kontrol yöntemi ‘tümü’ olarak seçildiğinde bir döngü ile sırasıyla seçilen sisteme ait Simulink moduleri çalışacak şekilde ayarlanmıştır.

4. Sonuç ve Tartışma

Genel olarak çeşitli kaotik sistemler üzerine çeşitli kontrol yöntemleri uygulamasında GUI tarafından üretilen kontrol değerlendirme sonuçları belirlenmiş olan performans kriterlerine göre değerlendirilebilir. Burada sadece otonom sistemler için elde edilen sonuçlar Tablo 1 yardımı ile irdelenmiş ve tüm elde edilen performans tabloları ile birlikte gerçekleştirilen arayüze ait kodlar [19]’da verilmiştir. Tablo 1’e örnek olarak Doğrudan Geribesleme Kontrol yöntemi için, aşma ve RMS hatasını en düşük değer ve kararlılık için ideal olarak bulunmuştur. PID ise, yerleşme süresi ve kalıcı durum hatası açısından öne çıkar, ayrıca hızlı ve hassas kontrol sağlamaktadır. Pasif kontrol yöntemi basit yapısı, düşük maliyeti ve enerji verimliliği nedenleriyle yüksek olmayan denge noktalarında stabilizasyon gereken uygulamalarda tercih edilebilir. Ancak genel performans açısından daha zayıftır bulunmuştur. Kayma kipli kontrol ise, performans değerlendirmesinde farklılık göstermekte olup özel durumlarda tercih edilebilir.

Tablo 1. Otonom Kaotik sistemler kontrol performans kriterleri (x)

Sistem	Kontrol Yöntemi	Aşma(x)	Yerleşme Süresi(x)	RMS Hatası(x)	KD Hatası (x)
Bonhoeffer Van Der Pool (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	0	0.809	0.0671	0
	PID	0.0031	0.173	0.0306	0.003
	PK	0.5276	7.8	0.0761	0
	KKK	1.0598	3.904	0.5537	0
Chen (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	0	0.462	0.077	0
	PID	$2.34 \cdot 10^{-4}$	0.231	0.1489	$2.33 \cdot 10^{-4}$
	PK	0	0.138	0.0568	0
	KKK	0	1.345	0.046	0
Chen (-7.9373, -7.9373, 21)	Doğrudan Geribesleme	1.398%	0.175	0.0511	0
	PID	0%	0.154	0.0198	0.0077
	PK	0.3901%	0.351	0.0599	0
	KKK	18.4261%	3.379	0.1256	0
Chen (7.9373, 7.9373, 21)	Doğrudan Geribesleme	0.2301%	0.146	0.1831	0
	PID	0.1031%	0.254	0.278	0.0082
	PK	0.5284%	0.464	0.1734	0
	KKK	16.6636%	1.862	0.3082	0.0003
Chua (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	0	0.45	0.0477	0
	PID	0.0028	0.464	0.0454	0.0027
	PK	0.3471	2.409	0.0717	0
	KKK	0.0014	0.446	0.0329	0
Chua (1.5,0,-1.5)	Doğrudan Geribesleme	0.0285%	0.491	0.007	0
	PID	0%	0.245	0.0055	0.0191
	PK	0%	3.12	0.137	0
	KKK	0%	0.161	0.0052	0
Chua (-1.5,0,1.5)	Doğrudan Geribesleme	1.2287%	0.333	0.0901	0
	PID	1.6897%	0.526	0.0853	0.0245
	PK	78.47%	3.469	0.1484	0
	KKK	0%	1.905	0.2291	0
Lorenz (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	0	0.644	0.1549	0
	PID	0	0.823	0.1947	0.0814
	PK	2.5351	0.712	0.1161	0
	KKK	0	0.668	0.0385	0
Lorenz (-8.4853, -8.4853, 27)	Doğrudan Geribesleme	0.2097%	0.242	0.3015	0
	PID	1.0023%	0.888	0.4576	0.0813
	PK	47.2735%	2.762	0.2574	0

	KKK	153.639%	1.401	0.489	0
Lorenz (8.4853, 8.4853, 27)	Doğrudan Geribesleme	3.1975%	0.262	0.0259	0
	PID	3.0113%	0.588	0.0686	0.2441
	PK	7.6234%	2.17	0.1208	0
	KKK	5.5125%	1.243	0.0495	0
Rossler (0.0070, -0.0351, 0.0351)	Doğrudan Geribesleme	0.007	0.09	0.0247	0
	PID	0.0066	0.317	0.0441	0.0146
	PK	1.9896	34.092	0.6436	0
	KKK	0.007	10.058	0.1034	0
Rossler (5.6930, -28.4649, 28.4649)	Doğrudan Geribesleme	0%	0.104	0.045	0
	PID	9.6638%	56.573	0.1055	0.4368
	PK	117.5511%	42.046	3.5509	0.0001
	KKK	84.1864%	3.032	0.6134	0
Lu_Sys (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	0	0.517	0.164	0
	PID	0	0.523	0.228	0.0029
	PK	0	0.195	0.1559	0
	KKK	0	0.275	0.1933	0
Lu_Sys (8.0697, 8.0697, 22.2)	Doğrudan Geribesleme	$8.10 \cdot 10^{-4}\%$	0.169	0.0288	0
	PID	0%	0.379	0.0372	0.0973
	PK	$2.49 \cdot 10^{-6}\%$	0.116	0.0285	0
	KKK	$1.77 \cdot 10^{-4}\%$	1.565	0.1781	0
Lu_Sys (-8.0697, -8.0697, 22.2)	Doğrudan Geribesleme	0.1448%	0.169	0.2751	0
	PID	1.1661%	0.564	0.4189	0.0916
	PK	0.1142%	0.196	0.283	0
	KKK	0%	1.229	0.6694	0
T_Sys (0,0,0)	Doğrudan Geribesleme	0	7.479	0.0343	$3.21 \cdot 10^{-11}$
	PID	0.0003	0.12	0.0025	$2.73 \cdot 10^{-4}$
	PK	0	0.917	0.0082	0
	KKK	0.8388	1.427	0.0357	0
T_Sys (-2.8234, -2.8234, 2.8234)	Doğrudan Geribesleme	0.9062%	0.65	0.0775	0
	PID	0.0905%	0.348	0.0576	0.0026
	PK	0.1676%	2.036	0.1543	0
	KKK	1.9009%	1.834	0.122	0
T_Sys (2.8234, 2.8234, 13.2857)	Doğrudan Geribesleme	0.5359%	0.52	0.1008	0
	PID	0.1099%	0.354	0.0626	0.0031
	PK	0.1774%	2.074	0.1707	0
	KKK	15.0872%	1.552	0.1016	0
Dis c	Doğrudan Geribesleme	0%	0.083	0.0161	$2.00 \cdot 10^{-15}$

Disc Dy- namo	PID	0.1002%	0.296	0.0281	$1.00 \cdot 10^{-3}$
	PK	56.8002%	4.621	0.0458	0
	KKK	23.9138%	0.135	0.0076	0
	Doğrudan Geribesleme	0%	0.071	0.0084	$2.00 \cdot 10^{-15}$
	PID	0.1002%	0.248	0.0145	$1.00 \cdot 10^{-3}$
	PK	28.1911%	3.947	0.0277	$5.33 \cdot 10^{-15}$
	KKK	8.6057%	0.228	0.0068	$4.00 \cdot 10^{-15}$

Otonom kaotik sistemlerin kontrol performans değerlendirmesi doğrultusunda, Doğrudan Geribesleme Kontrol yöntemi için, aşma ve RMS hatasını en düşük değer ve kararlılık için ideal olarak bulunmuştur. PID ise, yerleşme süresi ve kalıcı durum hatası açısından öne çıkar, ayrıca hızlı ve hassas kontrol sağlamaktadır. Pasif kontrol yöntemi basit yapısı, düşük maliyeti ve enerji verimliliği nedenleriyle yüksek olmayan denge noktalarında stabilizasyon gereken uygulamalarda tercih edilebilir. Ancak genel performans açısından daha zayıftır bulunmuştur. Kayma kipli kontrol ise, performans değerlendirilmesinde farklılık göstermekte olup özel durumlarda tercih edilebilir.

Otonom olmayan kaotik sistemler kontrol performans değerlendirmesi için elde edilen veriler doğrultusunda, Doğrudan Geribesleme aşma ve kalıcı hata yönünden kontroller arasında idal bir performans sunmaktadır. PID kontrolü ise, yerleşme süresi ve kalıcı hata açısından tercih edilebilir bir performans vermektedir. Pasif kontrol ve kayma kipli kontrol yöntemleri aşma ve yerleşme süresi bakımından uygun çıkmamıştır. Ayrıca bazı sistemlerde iyi çalışmalar bile genellikle genel olarak diğer yöntemlere göre daha zayıf performans göstermektedirler.

Çok boyutlu kaotik sistemlerin kontrol performans değerlendirmesi bulunan sonuç değerlere göre, Doğrudan Geribesleme öne çıkmakta olup özellikle aşma, kalıcı hata ve RMS hata değerleri açısından en iyi sonuç vermektedir. PID kontrolü, yerleşme süresi açısından öne çıkarken, kalıcı hata ve aşma değerleri bazen yüksek bulunmuştur. Bu nedenle, hızlı cevap gerektiren uygulamalarda PID, daha hassas kontrol gerektiren uygulamalarda Doğrudan Geribesleme tercih edilmelidir. Pasif kontrol yöntemi basit yapısı, düşük maliyeti ve enerji verimliliği nedenleriyle yüksek olmayan denge noktalarında stabilizasyon gereken uygulamalarda daha etkili bulunmuştur. KKK Kontrol yöntemi belirli eksenlerde kısmen başarılı bulunmuştur., ancak genelde denge noktasının işaretine ve eksene bağlı olarak tutarsızlığı ispat edilmiştir, bu nedenle bazı durumlar haric, kontrolör arasında son mertebede yer almaktadır.

Tekli ve Çoklu Çekerli kaotik sistemler kontrol performans değerlendirmesi için elde edilen veriler doğrultusunda, PID kontrol yöntemi düşük aşma ve hızlı yerleşme yönünden öne çıkmaktadır..

Gelecekte yapılacak çalışmalar için şu öneriler sunulabilir:

- Hibrit kontrol yöntemleri: PID ve KKK gibi yöntemlerin güçlü yönlerini birleştiren algoritmalar geliştirilebilir.
- Yüksek mertebe Kayma Kipli Kontrol: Titremeyi azaltmak için süper-büküm (super-twisting) algoritmaları kullanılabilir.

- Mutlak aşma metriğinin standartlaştırılması: Küçük denge noktalarında daha gerçekçi değerlendirme için bu metriğin kullanılması önerilir.
- Gerçek zamanlı uygulamalar: Hızlı yerleşme süresi gereken sistemlerde kontrol yöntemlerinin gerçek zamanlı performansı test edilmelidir.
- Verileri genişleterek her performans kriteri için, optimizasyon tabanlı parameter ayarlanması sağlanabilir.

Sonuç olarak, kaotik sistemlerde kontrol yöntemi seçimi, sistemin dinamik özelliklerini ve hedeflenen kriterleri (aşma toleransı, hız, hassasiyet) dikkate alarak yapılmalıdır. Bu çalışma, mühendislerin uygulamalarda sistemin gereksinimlerine uygun yöntemi seçmelerine yardımcı olacak çıkarımlar sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu yöntemlerin özelleştirilmiş uygulamalarını ve hibrit stratejileri destekleyebilir.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder. Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Usame ELHÜSEYYAN'ın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder

Kaynaklar

- [1] N. Wang, C. Li, H. Bao, M. Chen and B. Bao, "Generating Multi-Scroll Chua's Attractors via Simplified Piecewise-Linear Chua's Diode," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 66, No. 12, pp. 4767-4779, 2019, doi:10.1109/TCSI.2019.2933365.
- [2] J. Gleick, *Chaos: Making a New Science*. New York, NY, USA: Penguin, 2008.
- [3] G. Chen and S. Dong, "From Chaos to Order: Perspectives, Methodologies, and Applications". Singapore: World Scientific, 1998.
- [4] E. Ott, C. Grebogi, and J. A. Yorke, "Controlling chaos", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 64, No. 11, pp. 1196–1199, Mar. 1990, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1196>.
- [5] G. Chen, T. Ueta, "Yet another chaotic attractor", *Int J Bifur Chaos* Vol.9, No.7, pp.1465-1466, 1999, doi:10.1142/S0218127499001024.
- [6] Q. Lai, B. Norouzi, F. Liu, "Dynamic analysis, circuit realization, control design and image encryption application of an extended Lü system with coexisting attractors, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 114, pp. 230-245, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.07.011>.
- [7] Xiong, L., Qi, L., Teng, S. "A simplest Lorenz-like chaotic circuit and its applications in secure communication and weak signal detection". *Eur. Phys. J. Spec. Top.* Vol.230, pp.1933–1944, 2021,

- doi: Eur. Phys. J. Spec. Top. (2021) 230:1933–1944 <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00177-y>.
- [8] J. Hou and S. Ma, "Chaos Control in a Class of Fractional-order Stochastic Lorenz System," 2012 Fifth International Workshop on Chaos-fractals Theories and Applications, Dalian, China, pp. 241-244, 2012, doi: 10.1109/IWCFTA.2012.58.
- [9] H. Nijmeijer and H. Berghuis, "On Lyapunov control of the Duffing equation," IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 42, no. 8, pp. 473–477, Aug. 1995, doi: 10.1109/81.404059.
- [10] R. Saravanan, O. Narayan, K. Banerjee, J. K. Bhattacharjee, "Chaos in periodically forced Lorenz System", Physical Review A, Vol.31, pp.520-522, 1984, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.520>.
- [11] Z. Cangtao, C.H. Lai, M.Y. Yu, "Chaos, bifurcation and periodic orbits of the Lorenz–Stenflo system", Phys Scr, Vol.55, pp. 394-402, 1997, doi: 10.1088/0031-8949/55/4/003.
- [12] S. Yan, J. Wang, L Li, "Analysis of a new three-dimensional jerk chaotic system with transient chaos and its adaptive backstepping synchronous control", Integration, Vol. 98, 102210, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102210>.
- [13] R.P. Borase, D.K. Maghade, "A review of PID control, tuning methods and applications". Int. J. Dynam. Control, Vol. 9, pp.818–827, 2021, doi:10.1007/s40435-020-00665-4.
- [14] C. Novara, L. Fagiano, M. Milanese, "Direct feedback control design for nonlinear systems", Automatica, Vol.49, No.4, pp. 849-860, 2013, doi:<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.002>.
- [15] D. Qi, G. Zhao and S. Yunzhong, "Passive control of Chen chaotic system," Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788), Vol.2, pp. 1284-1286, China, 2004, doi:10.1109/WCICA.2004.1340844.
- [16] L. Caina and C. Baotong, "Passive Control of Uncertain Linear Systems with Time-Varying Delay in States," 2006 Chinese Control Conference, Harbin, China, 2006, pp. 16-20,
- [17] J. M. Nazzal, A. N. Natsheh, "Chaos control using sliding-mode theory", Chaos, Solitons & Fractals, Vol.33, No. 2, pp.695-702, 2007, doi:10.1016/j.chaos.2006.01.071.
- [18] R. K. Moghaddam; M. Rabbani, "Back-Stepping Sliding-Mode Control," in Methods of Developing Sliding Mode Controllers: Design and Matlab Simulation , IEEE, pp.123-149, 2025.
- [19] Kaynak Dosyalar, <https://drive.google.com/file/d/1jw8Jqq73CoCobUflzSd7ta7kMrkcOyQo/view?usp=sharing> (Erişim Tarihi: 21.05.2025)

Research Article

Design and Finite Element Analysis of 2.5D Lattice Structures for Internal Air-Cooled Gas Turbine Blades

Mustafa Güven Gök^{1,*}  and Halil İbrahim Kurt² 

Received: 20.02.2025

Accepted: 12.06.2025

¹Department of Metallurgical and Materials Engineering., Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye; mggok@gantep.edu.tr

²Department of Mechanical Engineering, Samsun University, Samsun, Türkiye; hiakurt@gmail.com

*Corresponding Author

Abstract: Making lightweight designs without changing the properties of materials is very important for aviation. In addition, effective cooling of metallic jet engine parts operating at high temperatures, such as gas turbine blades, is necessary to increase the efficiency of the engine and extend the service life of the gas turbine blade. In this regard, in parallel with the developments in additive manufacturing, lattice structures that provide both significant weight reduction and large surface area for effective cooling have recently started to be a hot topic. In this study, square, triangular and hexagonal 2.5D lattice structures were designed for the internal air-cooled gas turbine blade and analyzed by the finite element method. A conventional gas turbine blade with air cooling channels was used as a reference. The results showed that up to 17.14% weight reduction and up to 93.43% air cooling surface area increase can be achieved in the gas turbine blade thanks to lattice designs. When the results of maximum stress, FOS and deformation in turbine blades, as well as weight reduction and surface area increase, were evaluated together, it was concluded that the most suitable 2.5D lattice design was hexagonal.

Keywords: lattice structure; turbine blade; inconel 718; finite element analysis; mechanical properties; weight reduction

Araştırma Makalesi

Dahili Hava Soğutmalı Gaz Türbini Kanatçıkları için 2.5D Kafes Yapılarının Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi

Özet: Malzeme özelliklerini değiştirmeden hafif tasarımlar yapmak, havacılık için çok önemlidir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda çalışan metal jet motoru parçalarının, örneğin gaz türbini kanatçıklarının etkili bir şekilde soğutulması, motor verimliliğini artırmak ve gaz türbini kanatçıklarının ömrünü uzatmak için gereklidir. Bu bağlamda, eklemeli imalat alanındaki gelişmelerle paralel olarak, hem önemli ölçüde ağırlık azaltımı sağlayan hem de etkili soğutma için büyük yüzey alanı sunan kafes yapılar, son zamanlarda oldukça popüler bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, iç hava soğutmalı gaz türbini kanatçıkları için kare, üçgen ve altıgen 2.5D kafes yapıları tasarlanmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Hava soğutma kanallarına sahip geleneksel bir gaz türbini kanadı referans olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, kafes tasarımları sayesinde

gaz türbini kanadında %17,14'e kadar ağırlık azaltımı ve %93,43'e kadar hava soğutma yüzeyi artışı sağlanabileceğini göstermiştir. Maksimum gerilme, güvenlik faktörü (FOS) ve deformasyon gibi sonuçlar ile birlikte ağırlık azaltımı ve yüzey alanı artışı değerlendirildiğinde, en uygun 2.5D kafes tasarımının altıgen olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahatar Kelimeler: kafes yapısı; türbin kanatçığı; inconel 718; sonlu elemanlar analizi; mekanik özellikler; ağırlık azaltımı.

1. Introduction

The demand for air transportation, which is one of the fastest transportation methods in the world, is constantly increasing. Past oil crises, fuel prices, declining fuel stocks, and increasing environmental concerns have drawn the attention of the aviation industry to the need for reasonable use of fuel [1], [2]. Fuel consumption directly affects cargo and passenger demand through operational costs and thus prices. Airlines, aware of the consequences of market loss due to rising prices and inability to compete, are more willing than ever to cut fuel costs. Fuel is such a huge cost for airlines that it is the focus of industry-wide effort to find ways to improve efficiency [3], [4]. A focus on fuel efficiency makes both business and environmental sense, as aviation fuel typically accounts for more than 25% of airline costs and more than 97% of airline CO₂ emissions. For this reason, it is very important to use lighter materials in aircraft to reduce weight in air transport [5], [6], [7].

A jet engine, also known as a gas turbine engine, is an aviation machine that compresses air from the atmosphere and burns it with jet fuel. The gases emerging as a result of this combustion are rapidly thrown out, and a reverse thrust occurs, and with this thrust, the vehicle to which the engine is connected is provided to move. A jet engine consists of an air inlet, a compressor, combustion chambers, outlet turbine and nozzle sections [8], [9], [10]. The air-inlet is the part that allows the required air to enter the engine and is shaped considering the performance of the aircraft at the front. This section is designed in different ways, taking into account that the aircraft flies below the speed of sound and above the speed of sound. The basis of the jet engine is the high temperature and pressure turbine blade unit, which converts the expansion energy of the combustible gases into torque. A turbine blade of a jet engine is a component that performs the jet engine turbine section. These turbine blades are exposed to extremely high temperatures as well as pressure when the engine is running. The turbine blades should be made from the materials with complex figure, high surface quality and accuracy, and heat resistant. The production cost of this component increased so. The machining of the turbine blade materials is difficult and, they can be manufactured from high quality materials. These materials should exhibit relatively high strength, creep, fatigue and corrosion resistance in extreme conditions. For this purpose, nickel-based materials such as Inconel and Waspaloy have high thermal resistance [11], [12], [13], [14], [15]. It is well known that the Ni-based alloys have anti-corrosion and thermal stability and display good mechanical properties under high temperature, and the machining of the alloys has posed considerable challenges due to rapid work hardening and low thermal conductivity. The improving of machining efficiency, the reducing of cutting forces, 5-axis machines with high-performing cutting tools and high part precision are the main challenges in jet engine turbine blades. The process efficiency of turbines is well known to rise with the inlet temperature of the turbine. The improving engines of the turbine activate at very high temperatures and in parallel high pressure rates. If the turbine inlet temperature rises, the transferred heat to turbine blade increases, the blades attain a metal temperature and the metal tends to creep. The current design rules require the modification of internal air cooling channels to decrease the creeping of the blade and advance functional life. It is well known that the geometry of these internal cooling channels is quite complicated [16], [17]. The cooling degree which may be obtained in turbine blades with basic internal air-cooling is achieved with small quantities of cooling air for good cooling.

The design of the cooling performance of internal air-cooled turbine blades affects the properties and quality where both aerodynamic and geometric variables are considered [18]. The coefficient of a high internal heat-transfer, a minimum cooling flow, the cooling air pressure drop and a large internal cooled surface area are the necessary and compulsory requirements to good and productive cooling in turbine blades [18], [19].

To find the creep-rupture failure life of the gas turbine blade, it is investigated at a very high inlet temperature using the parameter model of Larson-Miller. This model studies the temperature and thermal stress distribution inside the turbine blade with the cooling channel geometry [20]. To predict the electrical conductivity of nickel-based Inconel 718 alloy, the serial electrical conductivity model and Wiedemann-Franz Law are used [21]. The maximum cutting temperature is directly related to the electrical conductivity of the surface conductive active medium coating and decreases with the increase of conductivity. The turbine blades are modelled and simulated with Solidworks software [22]. Three types of materials, Inconel 625, Palladium and Titanium alloys, tested and discussed. It is reported that the Inconel 625 is the most suitable among the three compositions. It is declared that the fuel efficiency advanced with the increase in the compressor pressure ratio and fuel cell electric power [23]. In a different study, a jet hybrid engine having a solid oxide fuel cell coupled with a fan was investigated [24]. The performance of solid oxide fuel cell advanced and also it is noted that the weight optimization and thermodynamic design must be done to enhance the practical application of the engine. The fracture on the turbine blades is studied by Balli [25]. The losses of the material, cracks and deformation were observed on the surface of the blades. These can be attributed to the repeated loads and thermal fatigue.

On the other hand, materials with lattice structures come to mind when weight reduction and more surface area for effective cooling are needed. Periodically repeating unit cell elements in space form lattice structures. Lattice structures can also be divided into two classes as 3D and 2.5D. If a periodic pattern is created in the 2D plane and then extruded in one direction, a lattice structure called 2.5D is formed. In recent years, thanks to the important developments in additive manufacturing technologies, lattice structures have also gained importance. In this way, it is possible to produce metals with a very sensitive and high resolution micro-sized lattice structure. Previous studies have shown that the mechanical properties of metals with lattice structure produced by the additive manufacturing method can be easily controlled [26], [27], [28], [29], [30].

In this study, square, triangular and hexagonal 2.5D lattice structures were designed for the internal air-cooled gas turbine blade and analyzed by the finite element method. The main purpose of the study was to reduce the turbine blade weight, save material and increase the surface area of the internal air-cooling channels. A conventional gas turbine blade with internal air-cooling channels was used as a reference. In this way, the most suitable lattice structure in terms of mechanical properties, internal cooling channel surface area and total blade weight will be selected from the designs.

2. Material and Methods

2.1. Design Of 2.5D Lattice Structures For Internal Air-Cooled Gas Turbine Engines

The primary aim of this study is to reduce the weight and increase the surface area of internal air channel of conventional internal air-cooled gas turbine blades. For this aim, square, triangular and hexagonal shaped 2.5D lattice structures were created inside a conventional gas turbine blade having simple cylindrical air-cooling channels as seen in Figure 1.

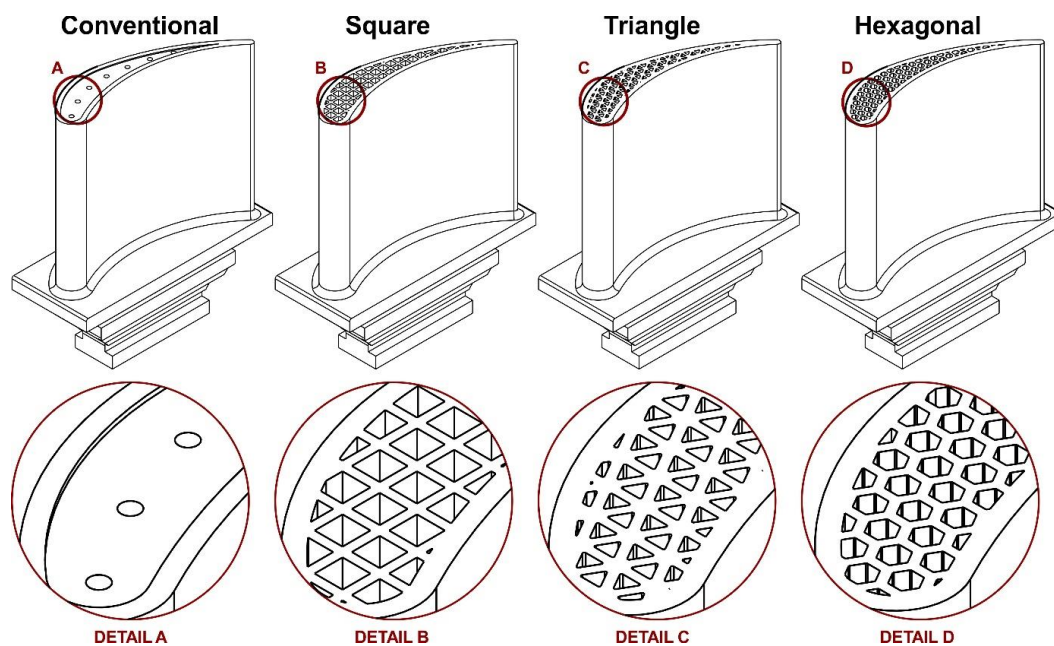


Figure 1. Conventional turbine blade having internal air cooling channels. Square, triangle and hexagonal 2.5D lattice designs for turbine blades.

3D models of all designs were made in SolidWorks software. Then, 2.5D lattice structures were created on these 3D models using Creo Parametric software. Conventional turbine blade had 8 cooling channels with 2 mm diameter. One of the ones closer to the trailing edge had a diameter of 1 mm. In the same way in all designs, a channel was created for the passage of cooling air in the turbine platform and dovetail. In all designs, 2.5D lattices with a wall thickness of 1 mm extended from the platform of the turbine blade to its tip (80 mm). In addition, the shell thickness was 2 mm. In the square design, the side length of a cell was 4 mm, and in the triangular design, both the base length and the height were 4 mm. In the hexagonal design, the diameter of the circle was 4 mm. In this way, as can be seen in detail in Figure 1, 2.5D lattice structures that will act as internal cooling in gas turbine blades were created.

2.2. Material Properties and Meshing

Inconel 718 (IN718) is the metallic material used in commercial turbine blades owing to its excellent mechanical properties at extreme temperatures, oxidation and corrosion resistance [31], [32], [33], [34]. In addition, since it is suitable for production with the additive manufacturing method, the properties of IN718 material were used in this study (Table 1).

Table 1. Physical and mechanical properties of Inconel 718 [31], [33].

Density	8.19 g/cm ³
Melting Temperature	1430 °C
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Tensile Yield Strength	1100 MPa
Tensile Ultimate Strength	1375 MPa

Turbine blades designed using SolidWorks and Creo Parametric software were imported into the Static Structural module of the finite-element analysis (FEA) software (ANSYS® Workbench). Then,

meshing was performed using tetrahedron meshes, thus the turbine blades divided into infinite elements (Figure 2 (a)). As can be seen in Table 2, the number of nodes and elements of each turbine blade were different, as their geometries were different in each design. Moreover, resolution level was 5th and adaptive sizing was used. Additionally, element size was selected as default.

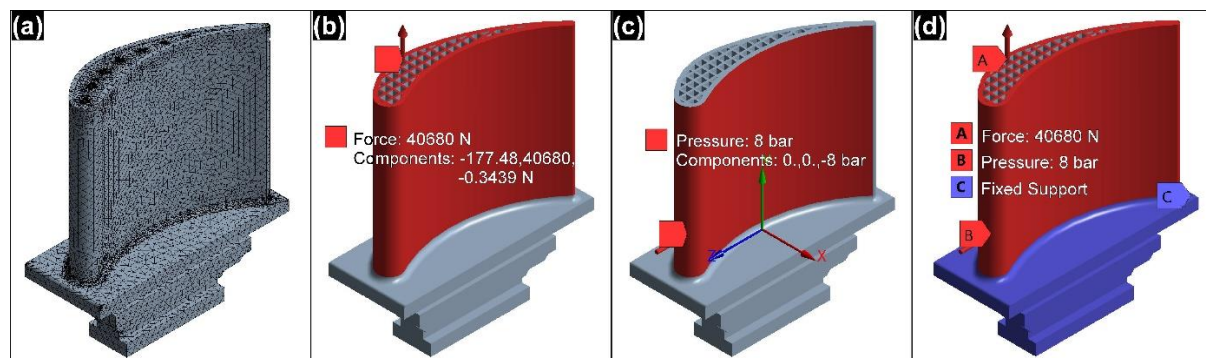


Figure 2. (a) finite element model of turbine blade, definition mechanical loads on turbine blade: (b) resultant of axial, tangential and centrifugal forces, (c) pressure acting on turbine blade and (d) application of force, pressure and fixed support on turbine blade.

Table 2. The number of mesh nodes and elements.

Design	Nodes	Elements	Algorithm
Conventional	345625	239563	Tetrahedrons
Square	488456	310842	
Triangle	932418	617292	
Hexagonal	537544	340888	

2.3. Boundary Conditions and Analysis

In this study, as mentioned above, static structural analysis of turbine blades was carried out using Ansys software. As seen in Figure 2(a), three axial forces act on the turbine blade. These are the centrifugal force (resultant: 40680 N) acting along the Y axis, the tangential force (177.48 N) acting along the Z axis and the axial force (0.3439 N) acting along the X axis [35], [36]. These forces were applied to all surfaces of the turbine blade (surfaces of the leading edge, pressure side, trailing edge, vacuum side and tip). Also, in this study, pressure (8 bar) was applied to the surfaces of leading edge and pressure side of the turbine blade due to the turbine pressure (Figure 2 (c)). The resultant of the forces and the pressure applied to the turbine blade can be seen in Figure 2 (d). The surface of the turbine blade platform and all surfaces of the dovetail were defined as fixed support (Figure 2 (d)). Ambient temperature was set to 1100 °C. Depending on the designs, the reductions in the total weight and the total increase in the surface area of the internal air-cooling zone of the turbine blades were calculated. In addition, the maximum equivalent (von-Mises) stress, stress safety factor and total deformation amount at the specified boundary conditions were estimated.

3. Results and Discussion

3.1. The Effect Of 2.5D Lattice Designs On Weight Reduction And Total Surface Area Of Turbine Blade

Thanks to the lattice structures, it is possible to control the mechanical properties of a material, to reduce its weight significantly and to increase the heat transfer as it provides a larger surface area [1]. As seen in Figure 3, a weight reduction between 7.56 % and 17.14 % has been achieved in the weight of the turbine blade having conventional cooling channels, thanks to 2.5D lattice designs.

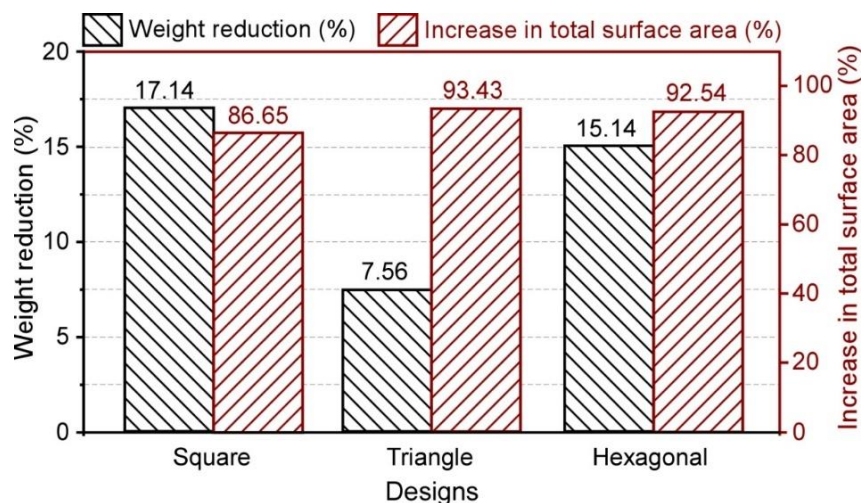


Figure 3. Rate weight reduction and increase in total surface area.

The biggest contribution to the weight reduction of turbine blade was in the square lattice design (17.14 %). In the hexagonal lattice design, there was a 15.14 % weight reduction. The least weight reduction (7.56 %) was in turbine blade with triangular lattice design. Alkebsi et al. [31] created 3D gyroid, primitive and diamond lattice structures in the turbine blade by making topology optimization and achieved a weight reduction between 33.41% and 40.32%. There were two reasons why the researchers achieved greater weight reduction than our study. The first of these was due to the weight of the turbine blade having lattice structure in proportion to the weight of the turbine blade without air cooling channel in the weight reduction calculation made by the researchers. The second was that the researchers created the same lattice structure in the dovetail of the turbine blade. However, in this study, when calculating the weight reduction, the weight of the turbine blades with lattice structure was proportioned to the weight of the conventional turbine blade with air channels, and the lattice structure was not created in the dovetail. Because there was an air channel in the dovetail of both conventional and 2.5D lattice structured turbine blades. For these reasons, the maximum weight reduction in this study was calculated as 17.14%. On the other hand, there has been an important increase in the total surface area of the air cooling zones of turbine blades having 2.5D lattice designs (Figure 3). As expected, increase of the total surface area was greatest in the triangular design (93.43 %) as it divided the area into smaller pieces. Moreover, due to its close packed geometric shape, the increase in total surface area of the turbine blade with the hexagonal lattice design (92.54 %) was almost the same as that of the triangular lattice design. Therefore, a more effective air cooling is expected due to this significant increase in the surface area of the internal air channels of the 2.5D lattice designed turbine blades.

3.2. The Effect Of Different 2.5D Lattice Designs On Equivalent (Von-Mises) Stress

In order to avoid permanent deformation of the turbine blade, the maximum equivalent (Von-Mises) stress value under static load must be lower than the yield strength value of IN718. On the other hand, safety factor defines the structural capacity of the system depending on the applied loads and is calculated as the ratio of the yield strength of the material to the Von-Mises stress that occurs in the system as a result of the applied load [37]. Equivalent (von-Mises) stress distributions and maximum values resulting from the load and pressure applied to the conventional and 2.5D lattice designed turbine blades were given in Figure 4. The distribution of the factor of safety (FOS) and its maximum values obtained as a result of the ratio of the yield strength of IN718 to the von-Mises stress formed on the turbine blade were shown in Figure 5.

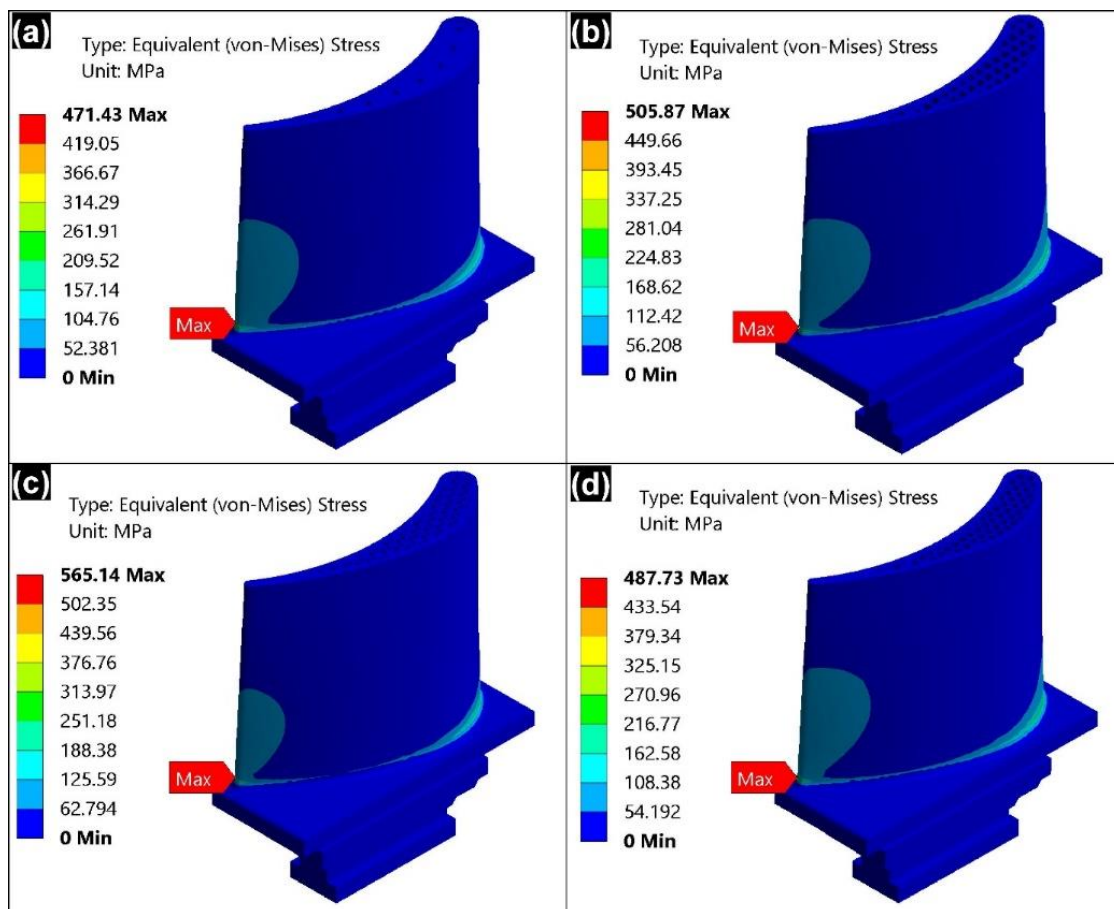


Figure 4. Equivalent stress distributions on the gas turbine blades. (a) conventional, (b) square, (c) triangle and (d) hexagonal.

As can be seen clearly in Figure 4, the maximum stress on all turbine blades occurred at the lowest point of the trailing edge (where the turbine platform intersects the trailing edge). It was normal for the maximum stresses to occur in this region. Because gas turbine blades had a geometry that narrowed the cross-sectional area towards the trailing edge. Because of this narrow cross-sectional area of the trailing edge, the stresses were concentrated here. While the maximum equivalent stress value in the conventional turbine blade was 471.43 MPa (Figure 4 (a)), it increased to 487.73 in the hexagonal design (Figure 4 (b)). These two values were very close to each other. On the other hand, the equivalent von-Mises stress values for square and triangular designs were 505.87 MPa (Figure 4 (c)) and 565.14 MPa (Figure 4 (d)), respectively. The maximum von-Mises stress values in turbine blades were lower than yield

strength of IN718 (1100 MPa). Therefore, it was safe to use 2.5D designs in turbine blades, as can be seen from the FOS distributions given in Figure 5. The minimum FOS values for conventional, square, triangular, and hexagonal designs were 2.33, 2.17, 1.95, and 2.26, respectively. As expected, the minimum FOS occurred in the region of the turbine blade where the maximum stress was observed, and the FOS values of the conventional (2.33) and hexagonal (2.26) designs were very close to each other. The lowest FOS value was observed in the triangular turbine blade (1.94). This was thought to be due to the excessive stress concentration occurring at the narrow-angled edges of the triangular design. Chintala and Gudimetla [38], obtained a FOS value of around 1.77 for titanium alloy turbine blade, despite applying a lower load than the loads applied in this study, not applying pressure and not using any air cooling channel. The main reason for this was that the yield strength (830 MPa) of the titanium metal chosen by the researchers was lower than the yield strength of the IN718 alloy. Therefore, both the materials and designs used in this study were suitable for the actual working conditions of internal air-cooled gas turbine blades. According to the equivalent von-Mises and FOS values, the most suitable 2.5D lattice design for internal air-cooled gas turbine blades was hexagonal.

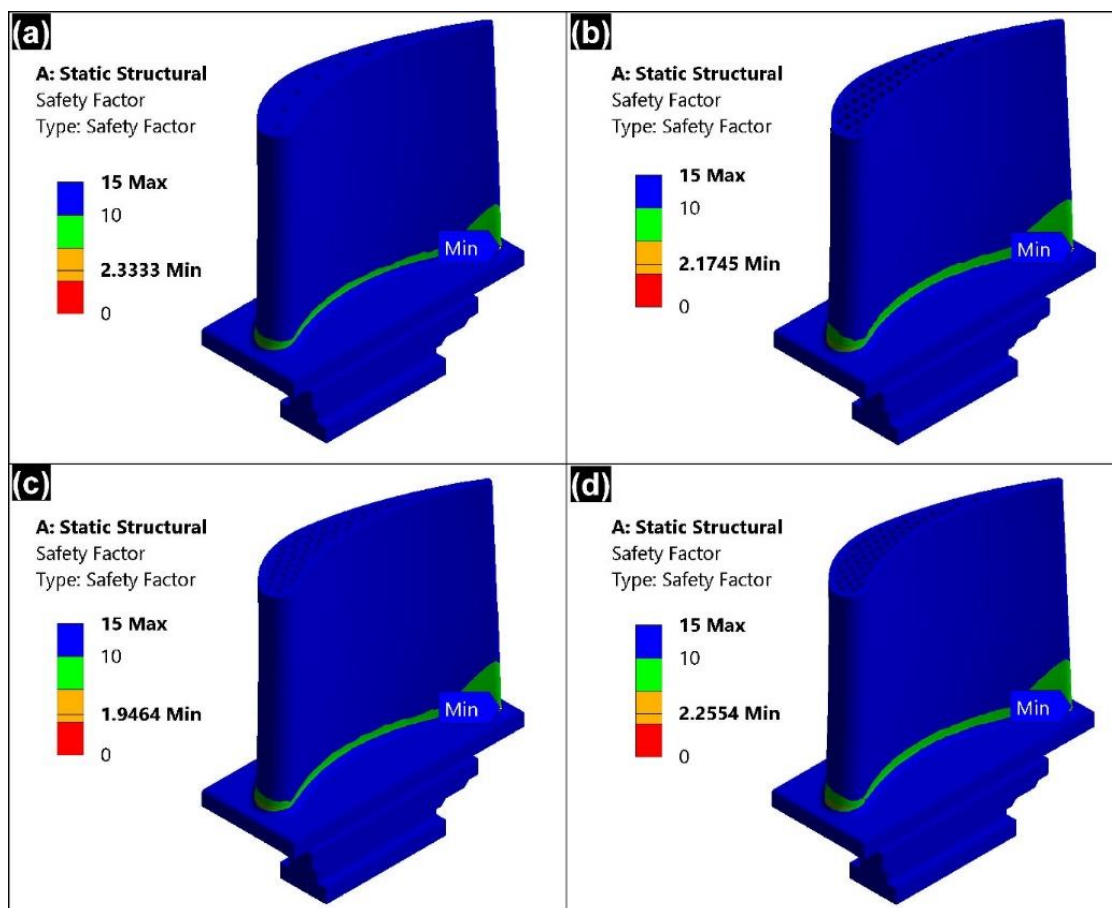


Figure 5. FOS distributions on the gas turbine blades. (a) conventional, (b) square, (c) triangle and (d) hexagonal.

3.3. The Effect Of Different 2.5D Lattice Designs On Deformation Of Turbine Blade

The maximum deformation values of turbine blades and their distributions were given in Figure 6. The maximum and minimum values were represented by the red and blue contours, respectively. Obviously, the maximum deformation in all turbine blades occurred at the top end of the trailing edge (free end of the blade). Because this region was the farthest point in the same direction from both the fixed

support and the region where the maximum stresses (see Figure 4) occurred. The maximum deformation at the top end of the trailing edge of the turbine blade decreased towards the leading edge and became minimal as it approached the turbine platform. The maximum deformation amounts at this region were between 0.123 mm and 0.146 mm. Aniekan et al. [35] designed gas turbine blades from IN738 and U500 materials, which do not have air cooling channels, and analyzed them by using finite element method. According to the results they obtained, they showed that 0.162 mm and 0.121 mm total deformation occurred in turbine blades with IN738 and U500 materials, respectively. Therefore, it was concluded that the total deformation values obtained in this study were also compatible with the literature. Therefore, when the gas turbine blades with 2.5D lattice design examined in this study were evaluated in terms of maximum equivalent stress, FOS and total deformation, they were safe to use in jet engines as a potential gas turbine blade.

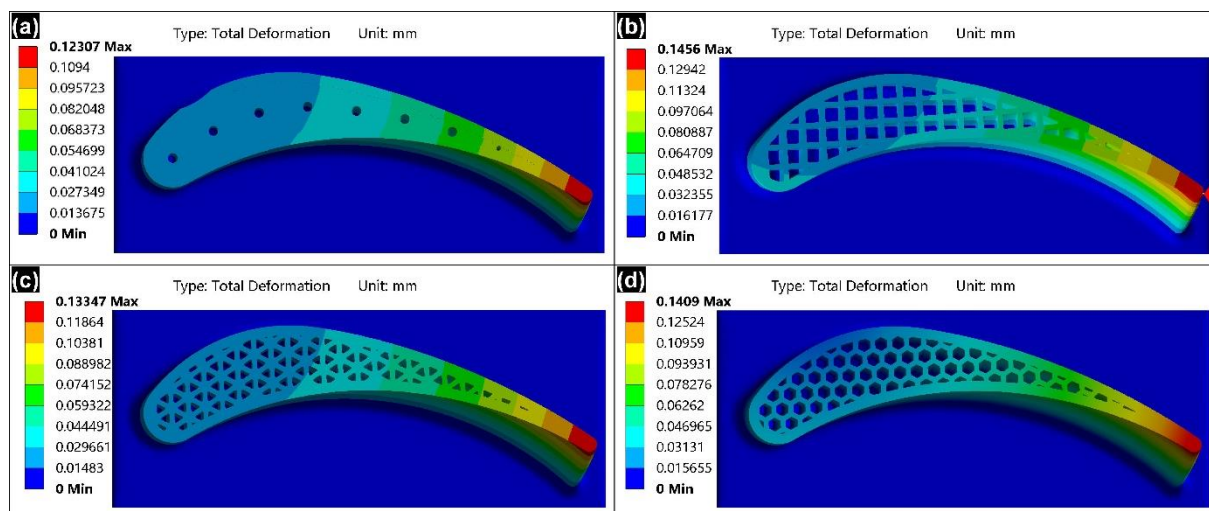


Figure 6. Total deformation distributions on the gas turbine blades. (a) conventional, (b) square, (c) triangle and (d) hexagonal.

4. Conclusions

In this study, the design and numerical analysis of 2.5D lattice structures for internal air-cooled gas turbine blades were carried out. The conventional turbine blades having air cooling channels and newly designed turbine blades having 2.5D lattice structures were analyzed by using Ansys software. Inconel 718 were used as the turbine blade material. Important results are listed in the following items.

1. Thanks to the lattice designs, a reduction between 7.56% and 17.14% had been achieved in the weight of the turbine blade having conventional air-cooling channels. The weight reduction was 15.14% in the hexagonal design.
2. An increase of 86.65% to 93.43% was achieved in the total surface area of the air cooler section of the turbine blade. The increase in surface area was 92.54% thanks to the hexagonal design.
3. The maximum equivalent von-Mises stress occurred in all turbine blades were lower than the yield strength of IN718. The maximum stress value in the hexagonal design (487.73 MPa) was close to that of the conventional turbine blade (471.43 MPa). In addition, values of FOS for stress were higher than 1.95.
4. The maximum total deformations occurring in turbine blades were between 0.123 mm and 0.146 mm, and it was concluded that these results were compatible with the literature.

When weight reduction, increase in total surface area, maximum stress, FOS and deformation results were evaluated together, it was concluded that the most suitable 2.5D lattice design for internal air-cooled gas turbine blades was hexagonal.

Acknowledgment

The author(s) would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

The author(s) declare that there is no conflict of interest regarding this article.

Research and Publication Ethics Statement

The author(s) declare that this study complies with research and publication ethics.

References

- [1] I. Merzlikin, A. Zueva, S. Kievskaya, E. Shkoropat, and K. Popov, "The market of air transportation and cargo transportation in the investment strategy of transport enterprises," *Transportation Research Procedia*, vol. 63, pp. 1420–1430, 2022, doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.153.
- [2] J.-F. Cordeau, G. Laporte, J.-Y. Potvin, and M. W. P. Savelsbergh, "Chapter 7 Transportation on Demand," in *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, C. Barnhart and G. Laporte, Eds., Elsevier, 2007, pp. 429–466, doi: 10.1016/S0927-0507(06)14007-4.
- [3] T. Young, *Performance of the Jet Transport Airplane: Analysis Methods, Flight Operations, and Regulations*. Wiley, 2017.
- [4] K. Seymour, M. Held, G. Georges, and K. Boulouchos, "Fuel Estimation in Air Transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 88, p. 102528, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102528.
- [5] D. A. Senzig, G. G. Fleming, and R. J. Iovinelli, "Modeling of Terminal-Area Airplane Fuel Consumption," *Journal of Aircraft*, vol. 46, no. 4, pp. 1089–1093, 2009, doi: 10.2514/1.42025.
- [6] A. K. Kundu, *Aircraft Design*. in Cambridge Aerospace Series. Cambridge University Press, 2010. doi: 10.1017/CBO9780511844652.
- [7] A. F. Simões and R. Schaeffer, "The Brazilian air transportation sector in the context of global climate change: CO₂ emissions and mitigation alternatives," *Energy Conversion and Management*, vol. 46, no. 4, pp. 501–513, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.enconman.2004.06.017.
- [8] L. M. Amoo, "On the design and structural analysis of jet engine fan blade structures," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 60, pp. 1–11, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.paerosci.2012.08.002.
- [9] R. Royce, *The Jet Engine*, 5th Edition. Wiley, 2015.
- [10] Y. Kroyan, M. Wojcieszuk, O. Kaario, and M. Larimi, "Modeling the impact of sustainable aviation fuel properties on end-use performance and emissions in aircraft jet engines," *Energy*, vol. 255, p. 124790, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124790.
- [11] R. Viswanathan, D. Gandy, and K. Coleman (Eds.), *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*, Materials Park, OH: ASM International, 2004..
- [12] S. G. U. Chandrasekhar and L.-J. Yang, Eds., *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, vol. 1. Springer, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-2697-4.
- [13] J. R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*. ASM International, 1997.

- [14] K. K. Rathod, P. G. Patil, and P. R. Patel, "Heat Treatment of Steam-Turbine Rotor Blade by Induction Hardening," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 8, no. 3, pp. 694–697, 2017.
- [15] M. Y. Abdollahzadeh Jamalabadi, "Thermal radiation effects on creep behavior of the turbine blade," *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, vol. 12, no. 2, pp. 291–314, Aug. 2016, doi: 10.1108/MMMS-09-2015-0053.
- [16] T. Gibbons and I. G. Wright, "A review of materials for gas turbines firing syngas fuels," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, Tech. Rep., May 2009, doi: 10.2172/970884.
- [17] J.-C. Han, S. Dutta, and S. Ekkad, *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, 2nd ed. CRC Press, 2012. doi: 10.1201/b13616.
- [18] E. F. Schum, R. E. Oldrieve, F. S. Stepka, and L. F. P. Laboratory, "Fabrication and endurance of air-cooled strut-supported turbine blades with struts cast of X-40 alloy," National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C., Tech. Rep., 1956.
- [19] D. Cherrared, "Numerical simulation of film cooling a turbine blade through a row of holes," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1110–1120, 2017, doi: 10.18186/thermal.298609.
- [20] T. Verstraete, S. Amaral, R. Van den Braembussche, and T. Arts, "Design and Optimization of the Internal Cooling Channels of a High Pressure Turbine Blade—Part II: Optimization," *Journal of Turbomachinery*, vol. 132, no. 2, Apr. 2010, doi: 10.1115/1.3104615.
- [21] Q. Yin, Z. Liu, B. Wang, K. Ma, Y. Cai, and Q. Song, "Improving thermal conductivity of Inconel 718 through thermoelectric coupling to reduce cutting temperature," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 950–957, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.124.
- [22] M. Yadav, A. Misra, A. Malhotra, and N. Kumar, "Design and analysis of a high-pressure turbine blade in a jet engine using advanced materials," *Materials Today: Proceedings*, vol. 25, pp. 639–645, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.530.
- [23] M. Bahari, M. Rostami, A. Entezari, S. Ghahremani, and M. Etminan, "A comparative analysis and optimization of two supersonic hybrid SOFC and turbine-less jet engine propulsion system for UAV," *Fuel*, vol. 319, p. 123796, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123796.
- [24] Z. Ji, J. Qin, K. Cheng, S. Zhang, and P. Dong, "Performance assessment of a solid oxide fuel cell turbine-less jet hybrid engine integrated with a fan and afterburners," *Aerospace Science and Technology*, vol. 116, p. 106800, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ast.2021.106800.
- [25] O. Balli, "Turbine wheel fracture analysis of Jet Fuel Starter (JFS) engine used on F16 military aircraft," *Engineering Failure Analysis*, vol. 128, p. 105616, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.eng-failanal.2021.105616.
- [26] P. Jiang, M. Rifat, and S. Basu, "Impact of surface roughness and porosity on lattice structures fabricated by additive manufacturing – A computational study," *Procedia Manufacturing*, vol. 48, pp. 781–789, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.114.
- [27] M. G. Gok, "Creation and finite-element analysis of multi-lattice structure design in hip stem implant to reduce the stress-shielding effect," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 236, no. 2, pp. 429–439, 2022, doi: 10.1177/14644207211046200.

- [28] D. Kang, S. Park, Y. Son, S. Yeon, S. H. Kim, and I. Kim, "Multi-lattice inner structures for high-strength and light-weight in metal selective laser melting process," *Materials and Design*, vol. 175, p. 107786, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107786.
- [29] M. G. Gok and O. Cihan, "Numerical analysis of the use of different lattice designs and materials for reciprocating engine connecting rods," *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 3, pp. 123–134, May 2022, doi: 10.24200/sci.2022.59400.6216.
- [30] R. Alkentar, F. Máté, and T. Mankovits, "Investigation of the Performance of Ti6Al4V Lattice Structures Designed for Biomedical Implants Using the Finite Element Method," *Materials*, vol. 15, no. 18, p. 6335, Sep. 2022, doi: 10.3390/ma15186335.
- [31] E. A. A. Alkebsi, H. Ameddah, T. Outtas, and A. Almutawakel, "Design of graded lattice structures in turbine blades using topology optimization," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 34, no. 4, pp. 370–384, 2021, doi: 10.1080/0951192X.2021.1872106.
- [32] D. B. Witkin, D. Patel, T. V Albright, G. E. Bean, and T. McLouth, "Influence of surface conditions and specimen orientation on high cycle fatigue properties of Inconel 718 prepared by laser powder bed fusion," *International Journal of Fatigue*, vol. 132, p. 105392, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105392.
- [33] S. Hussain, W. A. W. Ghopa, S. S. K. Singh, A. H. Azman, and S. Abdullah, "Experimental and Numerical Vibration Analysis of Octet-Truss-Lattice-Based Gas Turbine Blades," *Metals*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/met12020340.
- [34] Y. Zhao, K. Li, M. Gargani, and W. Xiong, "A comparative analysis of Inconel 718 made by additive manufacturing and suction casting: Microstructure evolution in homogenization," *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101404, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101404.
- [35] A. Ikpe, O. Efe-Ononeme, and G. Ariavie, "Thermo-Structural Analysis of First Stage Gas Turbine Rotor Blade Materials for Optimum Service Performance," *International Journal Of Engineering & Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 118–130, 2018, doi: 10.24107/ijeas.447650.
- [36] O. Ononeme-Efe, A. Ikpe, and G. Ariave, "Modal Analysis of Conventional Gas Turbine Blade Materials (Udimet 500 and IN738) For Industrial Applications," *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 119–133, Aug. 2018, doi: 10.30931/jetas.452857.
- [37] S. Alsarayefi and B. Mohamad, "Effects of transient load on gas turbine blade stress and fatigue life characteristic," *International Journal of Mechanical Research and Applications in Engineering (IJMRAE)*, vol. 10, no. 1, pp. 37–44, 2018.
- [38] G. Chintala and P. Gudimetla, "Optimum Material Evaluation for Gas Turbine Blade Using Reverse Engineering (RE) and FEA," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1332–1340, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.413.

Research Article

Experimental Analysis of Single Propeller Scour Dynamics Near Vertical and Parallel Quay Walls

Erdal Kesgin^{1, *} , Rumeysa Kuzgun² , R. İlayda Tan Kesgin³  and Kadir Gezici⁴ 

Received: 24.02.2025

Accepted: 19.06.2025

¹Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, 34469, Maslak, Istanbul, Türkiye; kesgine@itu.edu.tr

²Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 34015, Zeytinburnu, Istanbul, Türkiye; rumeysa.kuzgun@stu.fsm.edu.tr

³Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 34015, Zeytinburnu, Istanbul, Türkiye; ritankesgin@fsm.edu.tr

⁴Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 25240, Yakutiye, Erzurum, Türkiye; kadirgezici@atauni.edu.tr

*Corresponding Author

Abstract: Ship propeller jet-induced scour while berthing and unberthing poses a significant threat to berth structure stability. With the increase in size and capacity of vessels, the propeller-generated flow interaction with seabed erosion is gaining significance for port facility management. The present investigation experimentally investigates single propeller jet-induced scour behavior around quay walls of various wall configurations. Flume experiments in the laboratory were conducted with the use of sand of median grain diameter $d_{50} = 1.2$ mm, 10 cm diameter propellers, and Froude numbers of 4.71 and 6.23. The role of rotational speed of the propeller, gap (G) vertically, and the propeller-wall distance were studied under conditions of unconfined (no-wall) and confined (parallel and vertical wall) cases. The results show that for unconfined cases, deeper gaps decrease scour depth and greater rotational speed increases it. In confined cases, deeper separation between the wall and the propeller decreases scour depth, and wall orientation significantly influences the scour profile. These kinds of results enhance understanding of the mechanisms of sediment transport near quay walls and allow for the development of predictive models for estimating scour.

Keywords: scour; erosion; propeller jet; quay wall; berthing structure.

Araştırma Makalesi

Dikey ve Paralel Yanaşma Yapıları Önünde Tekil Pervane Kaynaklı Oyulma Dinamiklerinin Deneysel Olarak Araştırılması

Özet: Yanaşma ve ayrılma sırasında gemi pervanelerinin oluşturduğu jet akımları, yanaşma yapılarının stabilitesini ciddi şekilde tehdit edebilir. Giderek artan gemi boyutları ve kapasiteleriyle birlikte, pervane kaynaklı akımlar ile deniz tabanı erozyonu arasındaki etkileşimin anlaşılması, liman altyapısının korunması açısından kritik hale gelmiştir. Bu çalışma, çeşitli duvar konfigürasyonları altında tekil pervane jetlerinin oluşturduğu oyulma desenlerini deneysel olarak incelemektedir. Deneyler, ortalama

tane çapı $d_{50} = 1,2$ mm olan kum kullanılarak, 10 cm çapında pervaneler ve 4,71 ile 6,23 arasında değişen Froude sayılarıyla gerçekleştirilmiştir. Duvar bulunmayan (yapısız) ve duvar bulunan (dikey ve paralel) koşullar altında; pervane dönüş hızı, dikey boşluk (G) ve pervane-duvar mesafesinin oyulma üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, yapısız durumda pervane ile yatak arasındaki mesafe arttıkça oyulma derinliğinin azaldığını; dönüş hızı arttıkça ise oyulmanın derinleştiğini göstermektedir. Yapılı koşullarda ise pervane-duvar mesafesi arttıkça oyulma derinliği azalmış, duvar yöneliminin de oyulma profili üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, rıhtım duvarları yakınında oluşan sediman taşınım mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sağlayarak oyulma tahmin modellerinin geliştirilmesine olanak sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: oyulma; erozyon; pervane jeti; rıhtım duvarı; yanaşma yapısı.

1. Introduction

Vessels are utilized as transportation vehicles in the seas for various purposes. Over time, with increasing demands and expectations for further growth in the future, the capacity, size, and technology of vessels are continuously evolving. During berthing and unberthing maneuvers, the high-speed water jets generated by vessel propellers can cause significant damage to port infrastructure. The erosion caused by propeller jets near berth structures can compromise the stability of these structures.

Water jets, generated during vessel berthing and unberthing, contribute to scouring and sediment accumulation mechanisms, leading to significant damage in navigation channels, seabeds, port slopes, quay walls, and piles. These effects can pose serious risks to port structures. A study conducted in United Kingdom's ports indicated that 42% of major ports experienced seabed scouring due to propeller effects, with 29% of these cases requiring urgent remedial measures [1].

With the increasing demands and advancing technologies, vessel sizes are also growing, leading to more powerful propellers and stronger jet flows. Various types of vessels, during their berthing and unberthing maneuvers, generate high-velocity jet flows from their propellers, which mobilize the seabed material, resulting in scouring or sediment deposition on the seabed.

The Propeller-generated submerged jet flows can reach extremely high velocities, depending on the vessel and propeller characteristics. These powerful jets can cause significant erosion, posing serious risks to port structures. At the propeller outlet, flow velocities can reach up to 11-12 m/s, with bed shear velocities as high as 3-4 m/s [2]. When these high-speed jets interact with quay structures, they can dislodge seabed materials, leading to scouring or sediment deposition. Over time, these processes can compromise the stability and integrity of port infrastructure.

To determine the amount of erosion caused by the flow from vessel propellers and to identify the influencing parameters, both experimental and numerical methods have been employed in the literature. Initial studies focused on the scouring mechanisms under unrestricted conditions, where no berth structure was present under the influence of a circular wall jet or propeller jet [3-8]. Later studies, however, investigated scouring under restricted conditions, considering the presence of berth structures of different types and positions and analyzing the effects of the jet mechanism in such cases [9-15]. Some of these studies are summarized below. In his experimental study, [3] investigated the

extent of local scouring around vertical piles under the influence of a wall jet flow, considering them as an open berth structure. The study aimed to identify the characteristic parameters that play a significant role in the scouring mechanism. Two different experimental setups were used: one examining scour hole development without any structure, and the other focusing on local scour around a vertical cylindrical pile caused by a circular wall jet. [3] classified two primary mechanisms influencing the development of scour holes around the vertical pile: the structure mechanism and the jet diffusion mechanism. They concluded that the structure mechanism was primarily driven by the presence of the pile itself, while the jet diffusion mechanism was more influenced by the propeller jet flow. In the structure mechanism, the flow impinging on the pile generates a strong downward flow in front of the structure. The horseshoe vortex effect, which occurs near the seabed, creates a swirling flow structure, leading to scouring at the base of the pile. This type of scouring mechanism is similar to the scour mechanism observed around bridge piers.

[4] conducted an experimental study to investigate the scouring effects caused by a propeller jet in the absence of berth structures. Their findings highlighted the temporal development of the scour hole under the influence of propeller jet flow, concluding that the densimetric Froude number is the most critical factor influencing scour hole formation. Building on this, [16] developed a two-dimensional scour model to predict scour profiles for both single and twin-propeller vessel systems using the Gaussian normal probability distribution. Their experimental study examined both configurations, testing two different propeller types. The vertical distance between the propeller axis and the seabed (G) was set at 27.5 mm and 55 mm, with experiments conducted at rotation speeds of 500 and 700 rpm. The results revealed that propeller jet scour profiles can be categorized into three distinct regions: a small scour hole located beneath or just behind the propeller, a larger scour hole in front of the propeller, and a sedimentation or deposition zone further downstream.

The erosion caused by a single propeller has been extensively studied by researchers such as [17-20]. Experimental studies have demonstrated that the location of maximum scour (X_{mu}) is closely related to the propeller gap (G) [21]. In recent decades, numerous studies have focused on the scour mechanisms induced by single propeller jet flows near quay walls and berthing structures [5, 9, 11, 13, 22, 23]. [9] investigated scour development under both unconfined conditions and scenarios involving quay walls, proposing a predictive formula for estimating the maximum scour depth based on the distance between the propeller and the wall (X_w). [11] conducted experimental studies on scour formation at the toe of quay walls, considering the influence of rudders on scour patterns. [24] further explored the effects of key parameters such as propeller-to-wall distance (X_w), propeller diameter (D_p), rotational speed (n , rpm), and gap (G) on scour profiles in both confined and unconfined conditions.

This study presents a novel experimental investigation of single-propeller-induced scour by comparing unconfined conditions with two distinct quay wall configurations: vertical and parallel. Laboratory tests were conducted using sand with a median grain size of 1.2 mm. The research also examines variations in scour characteristics resulting from single jet flow generated by a 10 cm diameter propeller considering different propeller rotational speeds and gap distances. Unlike previous studies that primarily focused on perpendicular wall interactions or twin-propeller systems, this research systematically analyzes the influence of wall orientation and propeller-to-wall distance on scour development.

The inclusion of parallel wall scenarios and detailed parametric evaluation fills a significant gap in the current literature. These findings offer valuable insights for designing safer berthing structures and improving predictive scour models.

2. Material and Methods

2.1. Experimental Setup

The experimental study was performed in a laboratory flume designed to simulate the effects of ship propeller jets on the seabed under both unconfined and confined flow conditions. As shown in Figure 1, the flume is located in the Hydraulics Laboratory of Istanbul Technical University and is equipped with transparent glass sidewalls. It measures 6.2 meters in length, 1.52 meters in width, and 1.2 meters in depth. For the experiments, a sand bed was installed at the base of the flume with dimensions of 2.0 m (length), 1.5 m (width), and 0.30 m (depth).

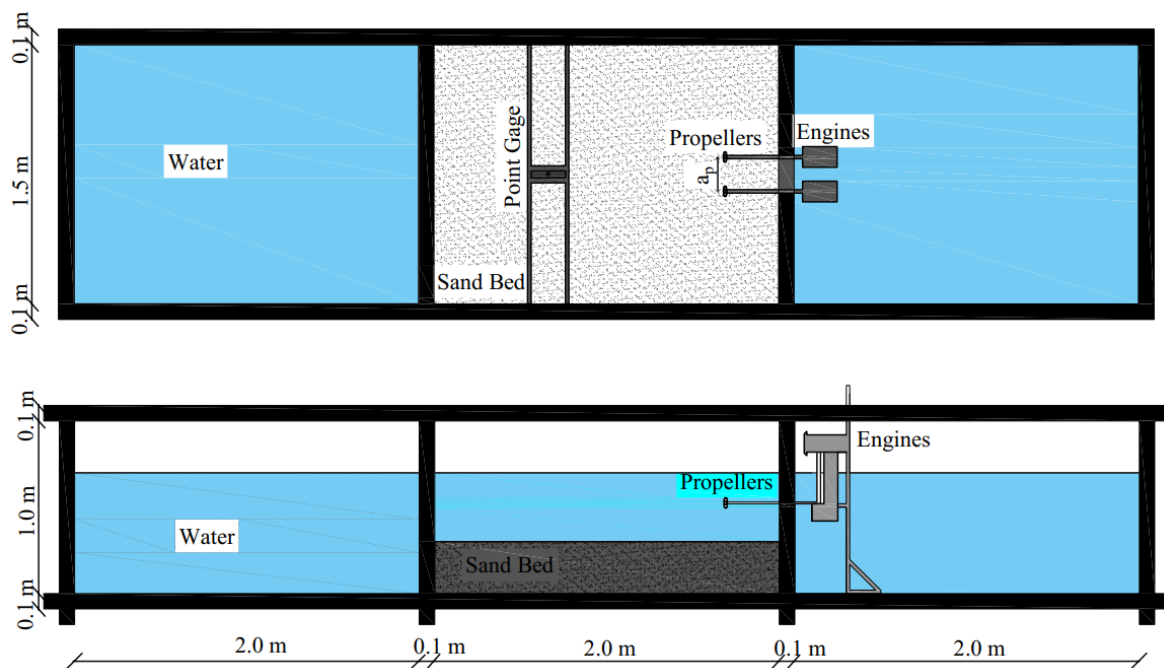


Figure 1. Experimental setup.

To allow for variation in experimental parameters, a specially designed acrylic-box system was mounted on a movable platform. This setup made it possible to adjust the vertical gap (G) between the propeller and the sand bed, as well as the horizontal positioning of the propeller relative to quay walls. As depicted in Figure 2, the system was flexible in both vertical and horizontal directions, enabling precise control over propeller elevation and lateral positioning.

A four-bladed Wageningen B-series propeller with a diameter of 10 cm was used in all experiments. The propellers were fabricated using 3D printing technology and constructed from PLA (Polylactic Acid) material. Experiments were conducted at two rotational speeds: 355 rpm and 470 rpm. The gap (G) between the propeller and the bed was set at two levels: 10 cm and 15 cm. Additionally,

the horizontal distances between the propeller and the quay walls were defined as multiples of the propeller diameter ($2D_p$, $3D_p$, and $5D_p$).

This configuration allowed the investigation of how variations in propeller speed, vertical gap, and distance to structural boundaries affect scour development. Further technical specifications and propeller design details can be referenced in [6].

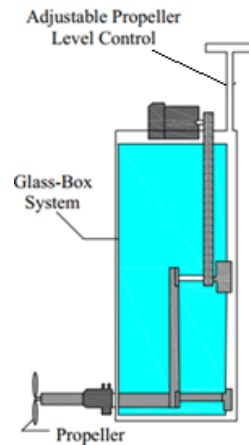


Figure 2. Propeller control system.

2.2. Methodology

Before starting the experiments, the sand bed was leveled using two fixed metal plates, and the propeller gap was adjusted to the desired condition. Subsequently, the flume was gradually filled with water from the network supply via a pipeline, ensuring that the water level in the channel reached the desired height ($h=0.7$ m) without disturbing the sand bed. In this state, the initial profile of the sand bed was measured, and the baseline profile was recorded. This equilibrium time was determined to be 150 minutes. At the end of this period, the propeller was stopped, and the sand bed profile was re-measured using a limnimetre to obtain the scour/deposition profile.

Additionally, a bypass system, consisting of pipelines passing underneath the sand bed and along both sides of the flume, was installed to prevent return flows within the experimental setup. The experiments with perpendicular walls were conducted using a plate measuring 1 m in height and 1.5 m in width, whereas for parallel wall experiments, a plate of 1 m in height and 3 m in width was used.

In this study, the experimental conditions listed in Table 1 were carried out under various conditions. In total, 4 experiments were conducted under the no-wall condition, while 12 experiments were performed for each of the vertical wall and parallel wall configurations, resulting in a total of 28 experimental tests. Furthermore, the distances between the propeller and the vertical (X_w) and parallel (Y_w) quay walls were also set at $2D_p$, $3D_p$, and $5D_p$.

Table 1. Experimental Conditions

Quay Wall	D _p (cm)	G (cm)	n (rpm)	(X _w , Y _w) (cm)	Experiment
No Wall	10	10	355	-	D-1
			470	-	D-2
		15	355	-	D-3
			470	-	D-4
Vertical Wall	10	10	355	2D _p	D-5
				3D _p	D-6
				5D _p	D-7
			470	2D _p	D-8
				3D _p	D-9
				5D _p	D-10
		15	355	2D _p	D-11
				3D _p	D-12
				5D _p	D-13
			470	2D _p	D-14
				3D _p	D-15
				5D _p	D-16
		10	355	2D _p	D-17
				3D _p	D-18
				5D _p	D-19
			470	2D _p	D-20
				3D _p	D-21
				5D _p	D-22
Parallel Wall	10	15	355	2D _p	D-23
				3D _p	D-24
				5D _p	D-25
			470	2D _p	D-26
				3D _p	D-27
		10	355	2D _p	D-28
				3D _p	D-28

2.3. Vertical and Parallel Walls

The presence of structural walls such as quay walls significantly alters hydrodynamic propeller jet stream behavior by enhancing near-bed levels of turbulence as well as shear stress, which in turn increases the likelihood of scour. In line with vessel berthing, quay walls can be perpendicular (vertical) or parallel to the axis of a propeller jet.

Within the experimental setup of this study, both wall orientations were tested systematically. Horizontal distances from the propeller to the quay wall were labeled as X_w for vertical setups and Y_w

for parallel setups, as shown in Figure 3. The distances were varied to represent diverse operational modes by setting them at 2, 3, and 5 times the propeller diameter ($2D_p$, $3D_p$, $5D_p$).

A review of the literature indicates that most of the earlier work has been concerned primarily with the effect of perpendicular quay walls, while research work with parallel wall arrangements is relatively limited. Furthermore, most of the earlier work has considered single-propeller systems alone. For example, [9] conducted experiments with a single propeller and a wall perpendicular to it, while [24] developed empirical correlations for predicting maximum scour depth as a function of propeller-wall distance for similar configurations. By contrast, studies examining parallel wall effects, such as those of [1], are comparatively limited in number.

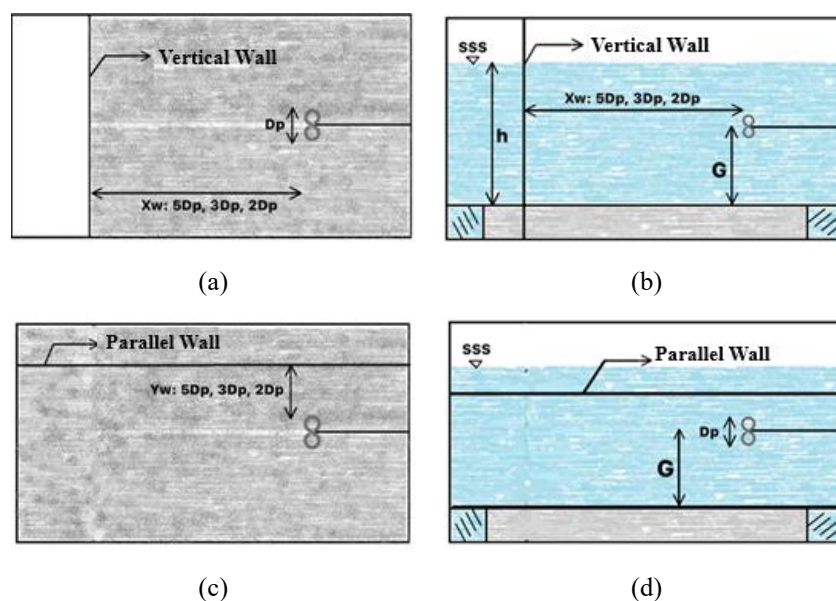


Figure 3. Quay wall positions with experimental parameters: a) vertical wall-plan view, b) vertical wall-side view, c) parallel wall-plan view, d) parallel wall-side view.

Moreover, the key experimental parameters used throughout this study are summarized in Table 2.

Table 2. Definition of Key Experimental Variables

Symbol	Unit	Description
D_p	cm	Propeller diameter
G	cm	Vertical gap between propeller and sand bed
n	rpm	Propeller rotational speed
X_w	cm	Horizontal distance from propeller to vertical wall
Y_w	cm	Horizontal distance from propeller to parallel wall
S_{max}	cm	Maximum scour depth
F_{rd}	—	Densimetric Froude number
X_{mu}	cm	Distance from propeller face to maximum scour location

3. Results and Discussion

3.1. No Wall Conditions

The development of the scour profile reached equilibrium conditions after a certain period, and the progression of the scour hole stabilizes. Beyond this point, no significant changes are observed in the development of the scour profile. Accordingly, after this period, the dimensions of the scour hole remain unchanged.

In this study, the duration during which the scour hole depth remains constant after reaching the maximum scour depth was determined by considering similar studies in the literature. Additionally, this duration was verified through a sample test. In similar conditions, [6, 13, 24] determined this period to be 150 minutes. It was also observed that when approximately 30% of this period had elapsed, more than 70% of the maximum scour depth (S_{max}) had been reached. This indicates that a significant portion of the scour hole development occurs within a relatively short time compared to the total experimental duration.

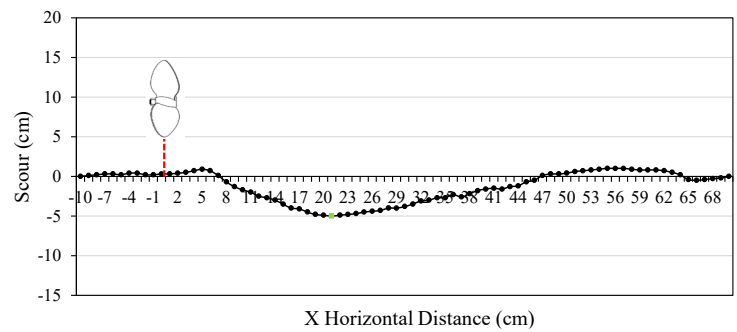
This period was measured considering that no changes occurred in the scour hole after reaching the maximum scour depth (with a tolerance of ± 1 mm), and scour profiles were obtained accordingly. A similar approach was adopted in the present study. The scour profile reaches equilibrium conditions within a specific period after the initiation of propeller rotation. To ensure validation, the experiments were repeated under identical conditions, and it was assumed that scour depth stabilized after 150 minutes. Within the scope of this study, scour profiles were obtained under different test conditions, and the final scour profile measurements at the end of the 150-minute period were analyzed.

As shown in Figure 4a, under the influence of a single propeller with a gap (G) of 10 cm and a rotational speed of 355 rpm, the maximum scour hole depth (S_{max}) was measured as 5 cm. Under the same conditions, when the propeller rotational speed increased (Figure 4b), S_{max} increased to 7 cm.

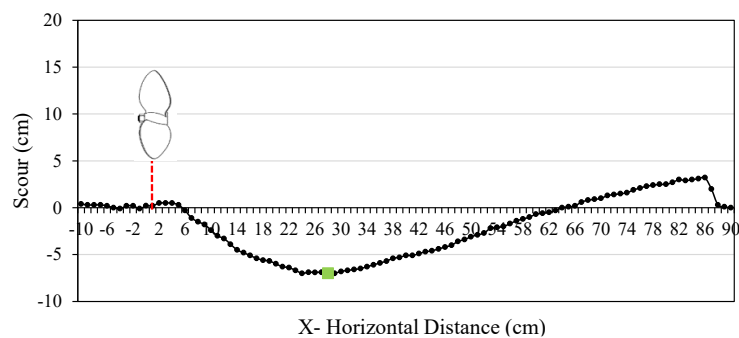
Similarly, in the scour hole profiles presented in Figures 4a and 4c, when the propeller gap was increased from $G = 10$ cm to $G = 15$ cm at the same rotational speeds, a decrease in scour hole depths was observed. As the scour hole depth decreased, the height of the accumulation zone formed behind the scour hole also decreased, whereas the scour width increased. Furthermore, as the propeller gap increased from $G = 10$ cm to $G = 15$ cm (e.g., Figures 4a and 4c), not only did the scour depth decrease, but the location of the maximum scour point also shifted further downstream, indicating a longer jet trajectory before maximum impact with the bed.

The scour profiles obtained from these four experiments under the influence of a single propeller jet effect also exhibit similarities to the scour profile reported by [4]. According to their findings, two distinct scour holes were observed: a smaller one directly beneath the propeller and a deeper, larger scour hole along the propeller axis.

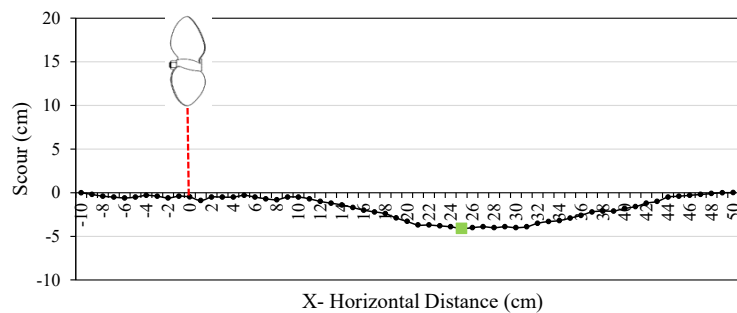
$$Fr_d = 2.1 \frac{G}{D_p} \quad (3.1)$$



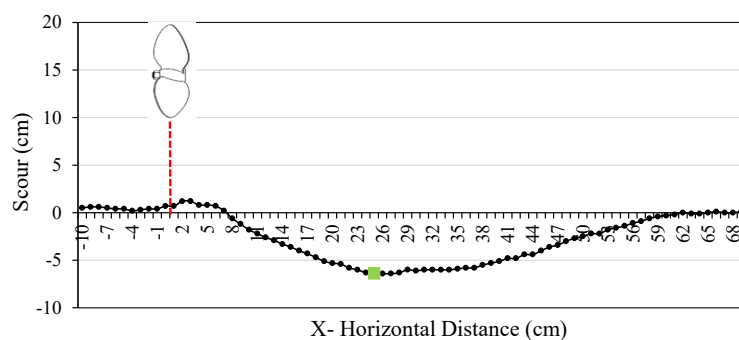
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4. The scour profile under the influence of a single propeller and the appearance of the scour formed at the end of the experiment: a) $G=10$, $n=355$ rpm, b) $G=10$, $n=470$ rpm, c) $G=15$, $n=355$ rpm, d) $G=15$, $n=470$ rpm

Furthermore, as observed in all four experiments, it was determined that the vertical distance of the propeller from the bed and the propeller rotational speeds significantly influence the maximum scour hole depth. [12] expressed the critical condition for the onset of scour under the influence of a single propeller in terms of the densimetric Froude number using Equation 3.1. In this study, experiments were initiated single propeller with diameter of and 10 cm (Figure 5). Accordingly, it was observed that the critical scour initiation expression provided by Tan and Yüksel (2018) is consistent with the experiments conducted in this study using different bed materials.

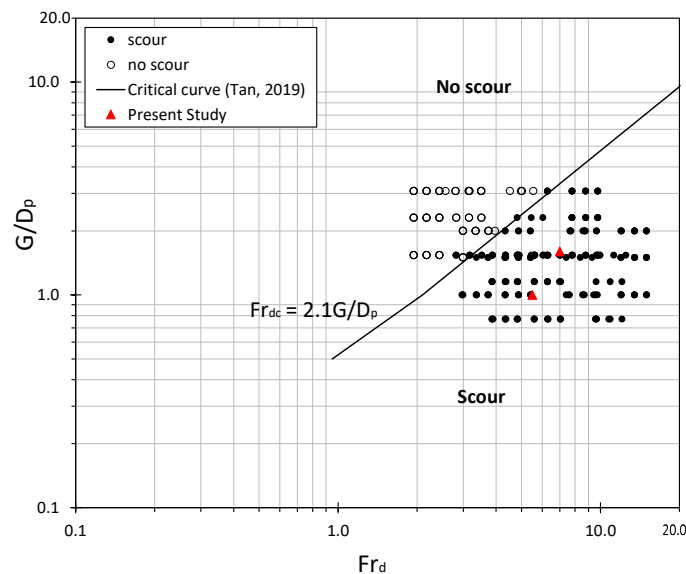


Figure 5. The occurrence of critical scour under the influence of a single propeller

[9, 12] presented different equations to determine the horizontal distance (X_{mu}) from the propeller face to the location of the maximum scour hole. In their study, [12] revised the equation provided by [9] (Equation 3.2) to better predict the location of the maximum scour hole over a wider range of densimetric Froude numbers (Fr_d). The revised form of the equation is given as follows:

$$\frac{X_m}{G^{0.09} D_p^{0.91}} = Fr_d^{0.724} \quad (3.2)$$

In this study, the distance from the propeller to the location of the maximum scour under the influence of a single propeller, in the absence of any structures, was measured. This value was also calculated using the equations proposed by [9,12]. The results are presented in Figure 6. It was observed that the measured values differed from the predicted values obtained from the two formulas and exhibited a scatter similar to the experimental results reported by [9].

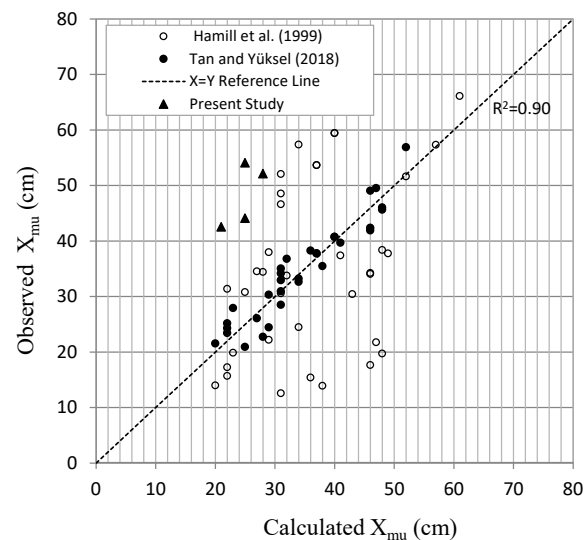


Figure 6. Comparison of the measured and maximum scour hole distance from the propeller face.

3.2. Vertical Wall Conditions

In this section, the experimental conditions were designed such that a berthing structure was placed in front of the single propeller, as specified in Table 1. The quay wall positioned directly opposite the single propeller jet stream confined the jet mechanism, leading to differences in the resulting scour profiles compared to those observed under unrestricted single propeller effects.

The location and magnitude of the maximum scour hole were found to vary depending on the presence or absence of the structure under identical conditions. The influence of the wall positioned in front of the propeller was further investigated by varying the distance between the propeller and the structure (X_w). In this study, the distances were set to $X_w = 2D_p$, $3D_p$, $5D_p$, where D_p represents the propeller diameter. For each distance setting, different propeller gaps ($G=10$ and 15) and rotational speeds ($n=355$ and 470 rpm) were tested. A total of 12 experimental sets were conducted to comprehensively evaluate the effect of these parameters on scour development.

The results of this investigation provide insights into how structural constraints influence scour mechanisms, highlighting the impact of wall proximity and propeller operational settings on scour formation. The scour profiles generated under the influence of the propeller jet with the presence of the wall were compared to those obtained under identical experimental conditions without the wall, as presented below. The comparison indicates that as the distance between the wall and the propeller increases, the maximum scour hole depth decreases. Furthermore, it was observed that the scour formation becomes more similar to the scour profile in the absence of the wall across all tested experimental conditions (Figures 7-10).

These findings suggest that the wall's proximity to the propeller significantly affects the scour characteristics. When the wall is positioned closer, the wall effect intensifies, leading to deeper scour holes. However, as the wall is moved further away, the flow pattern becomes less restricted, resulting in scour profiles that resemble those observed without the presence of a structure. This behavior was

consistently observed across all experimental scenarios, highlighting the influence of structural placement on scour development.

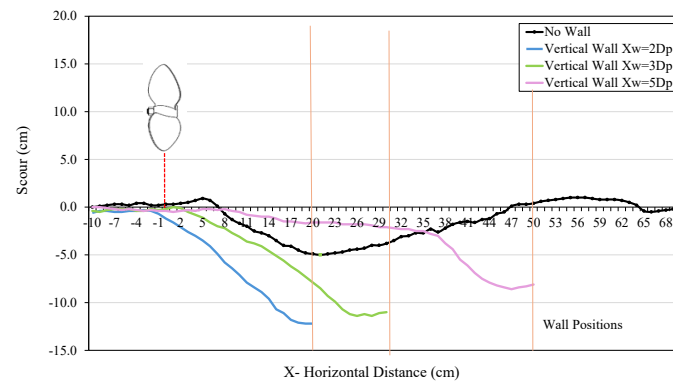


Figure 7. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 10$ cm, $n=355$ rpm).

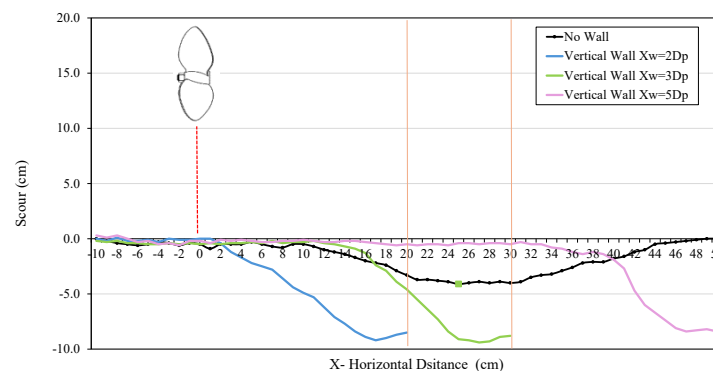


Figure 8. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 15$ cm, $n=355$ rpm).

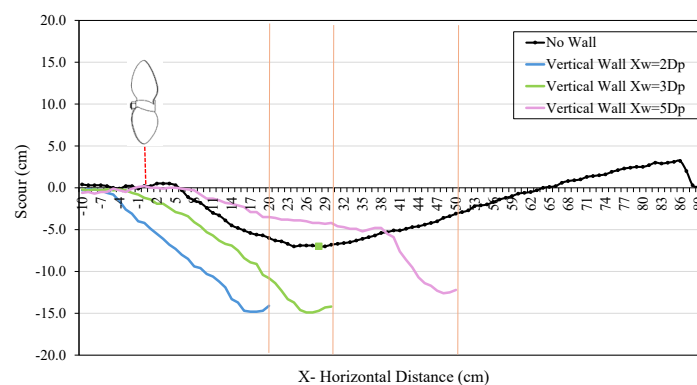


Figure 9. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 10$ cm, $n=470$ rpm).

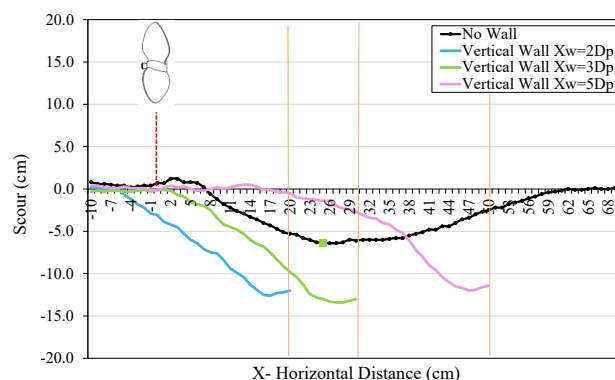


Figure 10. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 15$ cm, $n=470$ rpm).

3.3. Parallel Wall Conditions

The scour formation influenced by a wall structure positioned parallel to the single propeller axis was examined, as shown in Figures 11-14. The experiments were conducted for different distances between the wall and the propeller ($Y_w=2D_p, 3D_p, 5D_p$), with varying propeller gap values ($G=10$ and 15 cm) and rotational speeds ($n=355$ and 470 rpm). A total of 12 experimental conditions were tested to comprehensively analyze the effect of these parameters on the scour development.

In the no wall condition, the maximum scour depth (S_{max}) was found to be lower compared to cases where a wall was present. This trend was observed consistently across all tested wall positions. It was further observed that as the distance between the propeller and the wall increased, both the scour depth and the deposition height decreased. For example, at a distance of $2D_p$, the maximum scour depth was $=6.8$ cm, whereas at $3D_p$, it decreased to 3.8 cm.

Figure 12 presents a comparison between the no wall experiment and three different parallel wall placements relative to the propeller axis ($2D_p, 3D_p, 5D_p$). In this case, the propeller gap was set to 10 cm, and the rotational speed was 470 rpm.

In Figure 13, the no wall experiment is compared with the wall placed at different distances ($2D_p, 3D_p, 5D_p$). For these tests, the propeller gap was set to 15 cm, and the rotational speed was 355 rpm. Figure 14 presents the scour profiles for the no wall experiment and wall placements at $2D_p, 3D_p, 5D_p$ with a propeller gap of 15 cm and a rotational speed of 470 rpm. These results highlight the significant impact of wall placement on scour characteristics, emphasizing that greater distances between the propeller and the wall result in reduced scour depth and accumulation.

An analysis of the conditions illustrated in Figures 11-14 reveals that increasing the distance between the propeller and the seabed (G) results in a significant reduction in the maximum scour depth. This finding indicates that scour intensity decreases as the propeller is positioned further from the bed.

Furthermore, observations from Figures 11-14 show that higher propeller rotational speeds (rpm) lead to a corresponding increase in maximum scour depth. This trend underscores the direct relationship between propeller speed and the severity of scour formation.

As evident from these profiles, in the presence of a wall, the maximum scour occurs at the heel of the wall, resulting in greater scour depths compared to the no wall condition. This indicates that the presence of the wall intensifies the scour process due to the restricted flow conditions.

Furthermore, in cases where the ship propeller impacts the wall perpendicularly, it can be observed from the profiles that the jet flow impinging on the wall creates a more confined and concentrated scour effect. The interaction between the jet and the wall enhances the local turbulence and shear stress, leading to more pronounced scour formation in the vicinity of the wall compared to an unconfined scenario.

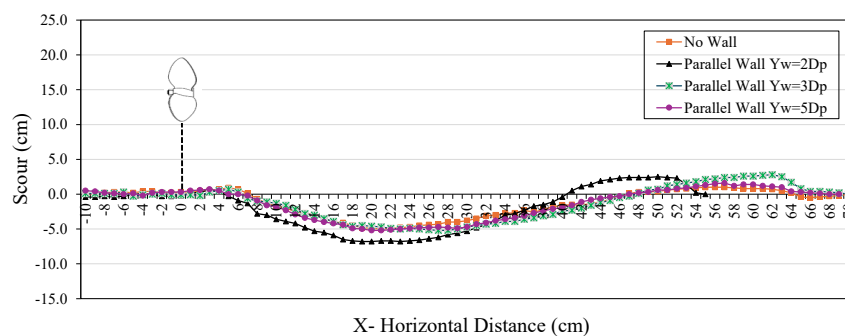


Figure 11. Comparison of the effects of no wall and parallel wall placement to the propeller axis on scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 10$ cm, $n=355$ rpm)

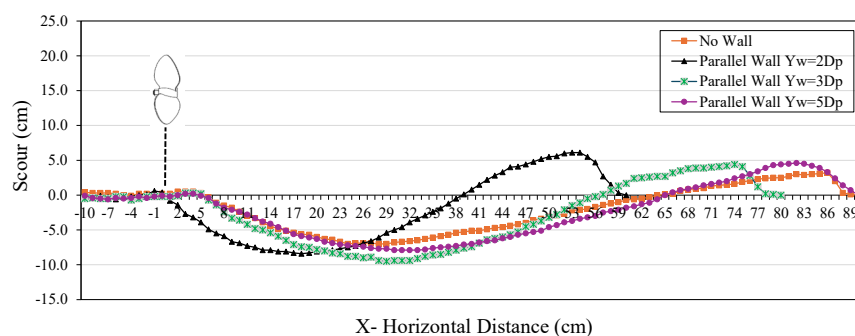


Figure 12. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 10$ cm, $n=470$ rpm)

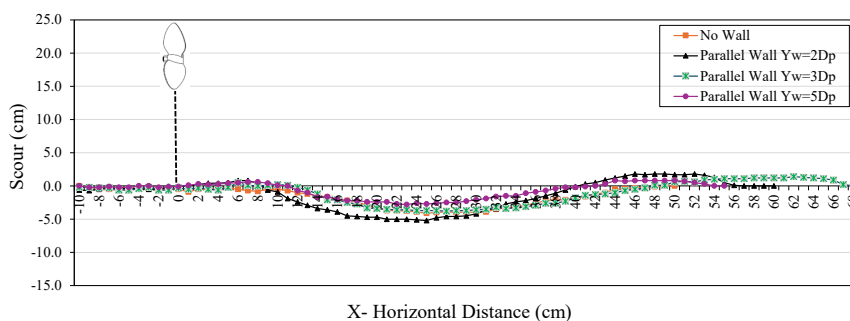


Figure 13. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 15$ cm, $n=355$ rpm)

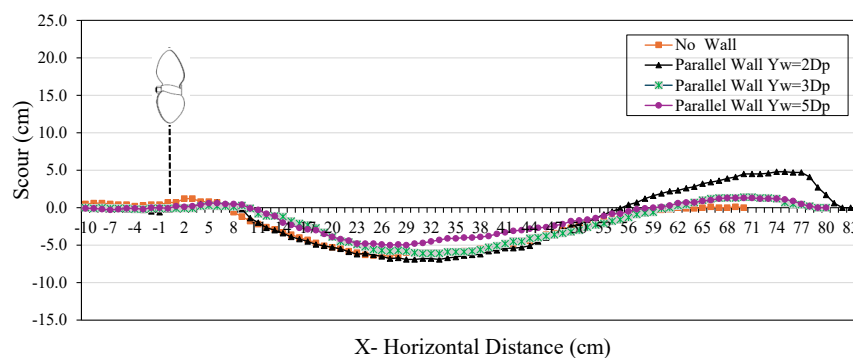


Figure 14. Comparison of scour profiles in front of a wall with unconfined (No-Wall) scour profiles under single propeller influence ($D_p = 10$ cm, $G = 15$ cm, $n=470$ rpm).

4. Conclusion

In this study, scour hole profiles generated by a 10 cm diameter Wageningen-B series ship propeller model at varying rotational speeds (355 and 470 rpm) and propeller-to-bed distances ($G = 10$ and 15 cm) were examined. Additionally, the scour mechanism induced by the ship propeller under different configurations, with and without the presence of a berthing structure, was investigated. For this purpose, the quay wall was positioned both perpendicular and parallel to the propeller axis. The effects of varying the distance between the structure and the propeller on scour hole formation were analyzed. This study aimed to determine how factors such as propeller rotational speed and propeller-to-bed distance influence scour under different berthing scenarios. In brief, the experimental findings can be summarized as follows:

- In the absence of a structure, the propeller gap and rotational speed were identified as critical parameters in scour formation. As the propeller-to-bed distance increased, the scour depth decreased, while higher rotational speeds resulted in deeper scour holes.
- When the quay wall was placed perpendicular to the propeller axis, the distance between the propeller and the wall significantly influenced the scour hole depth. It was found that as the distance increased, the depth of the scour hole in front of the wall decreased.
- The position of the propeller relative to the wall affected the scour profile. The development of the scour hole differed when the wall was placed parallel or perpendicular to the propeller axis.
- The experimental results for the parallel wall configuration demonstrated that the presence of a wall significantly increases the scour depth compared to the no-wall condition, with the maximum scour occurring at the heel of the wall due to flow confinement effects. Additionally, as the distance between the propeller and the wall increased, both the scour depth and deposition height decreased, indicating that greater separation reduces the impact of the propeller-induced flow on the seabed.

In addition to the findings obtained in this study, some recommendations are proposed for future research. This study considered a single bed material type and propeller diameter. Future studies could

expand the scope by testing different bed material grain sizes and propeller diameters. Future studies could also investigate combine configurations of these structures analyze the resulting scour patterns. These findings contribute valuable insights into the design of quay walls and berthing strategies, supporting the development of safer berthing zones and more efficient maintenance planning for port infrastructure.

Acknowledgment

The author(s) would like to thank the reviewers and editorial boards of the *International Journal of Pure and Applied Sciences*.

Conflict of Interest

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

Research and Publication Ethics Statement

The authors declare that they comply with all ethical standards.

References

- [1] Qurrain, R. (1994). Influence of the Sea Bed Geometry and Berth Geometry on the Hydrodynamics of the Wash from a Ship's Propeller. Northern, Ireland: The Queen's University of Belfast.
- [2] Longe J., Hebert P., and Byl R. (1987). Erosion problems at existing quay constructions due to bow thrusters and main propellers of ships when berthing or leaving. Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC).
- [3] Chin, C.O., Chiew, Y.M., Lim, S. Y. and Lim, F. H. (1996). Jet Scour around Vertical Pile. Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, 122 (2), 59-67.
- [4] Hong, J. H., Chiew, Y. M., and Cheng, N. S. (2013). Scour caused by a propeller jet. Journal of Hydraulic Engineering, 139(9), 1003-1012.
- [5] Wei, M., and Chiew, Y. (2018). Characteristics of Propeller Jet Flow within Developing Scour Holes around an Open Quay. Journal of Hydraulic Engineering, 144(7), 04018040.
- [6] Tan, R. (2019). Propeller Jet Induced Erosion around Pile Supported Berth Structures. PhD Thesis, Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye.
- [7] Tan R.İ., Kesgin E., Aksel M., and Kuzgun R. (2023). Numerical Investigation of Propeller Jet Flow for the Understanding of Scouring Mechanism. 11th International Conference on Scour and Erosion, Copenhagen, Denmark, 17-21 September 2023.
- [8] Kuzgun, R. (2024). Experimental Investigation of Seabed Scouring under Ship Propeller Jet Flow (in Turkish). Master's Thesis, Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, Istanbul, Türkiye.
- [9] Hamill, G. A., Johnston, H. T., and Stewart, D. P. (1999). Propeller Wash Scour Near Quay Walls. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 125, 170-175.
- [10] Abdi, A. A. (2018). Modeling and Analysis of Bridge Piles under Scour Effect (in Turkish). Master's Thesis. Akdeniz University.
- [11] Ryan D., Hamill G.A., and Johnston H.T. (2013). Determining propeller induced erosion alongside quay walls in harbours using artificial neural networks. Ocean. Eng., 59, 142–151.

-
- [12] Tan, İ. R., and Yüksel, Y. (2018). Seabed scour induced by a propeller jet. *Ocean Engineering*, 160, 132-142.
- [13] Yüksel, Y., Tan, R.İ., and Celikoglu, Y. (2018). Propeller Jet Scour Around a Pile Structure. *Journal of Applied Ocean Research*, 79,160-172.
- [14] Suljevic, A, and Kesgin, E. (2024). Experimental Study of Unconfined Twin Propeller Jet Scour. *Journal of Studies in Advanced Technologies*, 2(1), 33-41 (in Turkish).
- [15] Suljevic, A, and Kesgin, E. (2025). Twin propeller scour in noncohesive seabed with different quay wall configurations. *Ocean Engineering*, Vol.322, 120554.
- [16] Cui, Y., Lam, W. H., Zhang, T., Sun, C., and Hamill, G. (2019). Scour Induced by Single and Twin Propeller Jets. *Water*, 11(5), 1097.
- [17] Blaauw, H., and Kaa, E. (1978). Erosion of bottom and sloping banks caused by the crew race of maneuvering ships. in 7th International Harbours Congress. Antwerp, Belgium.
- [18] Chiew, Y. M., and Lim, S.Y. (1996). Local scour by a deeply submerged horizontal circular jet. *J. Hydraul. Eng*, 122, 529–532.
- [19] Hamill G.A., McGarvey, J.A. and Hughes D.A.B. (2004). Determination of the Efflux Velocity from Ship's Propeller. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering*, 157 (2), 83-91.
- [20] Lam, W., Hamill, G.A., Robinson, D.J. and Raghunathan, S. (2011). A Review of the Equations Used to Predict the Velocity Distribution Within a Ship's Propeller Jet. *Applied Ocean Research*, 38, 1-10.
- [21] Hamill, G.A. (1987). Characteristics of the Screw Wash of Maneuvering Ship and the Resulting Bed Scour, Ph.D. Thesis, Queen's University of Belfast, Northern Ireland, UK.
- [22] Wei M., Chiew Y., and Cheng N. (2020). Recent advances in understanding propeller jet flow and its impact on scour. *Physics of Fluids*, 32(10), 101303.
- [23] Fuehrer, M., and Römis, K., (1977). Propeller Jet Erosion and Stability Criteria for Bottom Protection of Various Constructions, In *Proceedings of PIANC*, Bulletin No.58
- [24] Yüksel Y., Tan R.I., and Celikoglu Y. (2019). Determining propeller scour near a quay wall. *Ocean Engineering*, 188, 106331.

Araştırma Makalesi

Üniversite Öğrencilerinin Eleştirel Düşünme Profillerinin k-Means Kümeleme Algoritması ile Analizi

Tuğba Tümen ^{1,*}  ve Ferhat Bahçeci ² 

Gönderim: 14.04.2025

Kabul: 19.06.2025

¹ Bitlis Eren Üniversitesi, Rektörlük Türk Dili Bölümü, Bitlis, Türkiye; ttumen@beu.edu.tr

² Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eğitim Bilimleri Bölümü, Elazığ, Türkiye;

ferhatbahceci@hotmail.com

*Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışma, üniversite öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimlerini analiz etmek amacıyla makine öğrenmesi yöntemlerinden k-Means kümeleme algoritması ve Elbow yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, 168 üniversite öğrencisine uygulanan eleştirel düşünme eğilimi ölçeği verileri analiz edilmiş ve öğrenciler benzer bilişsel özelliklerine göre kümelendirilmiştir. Elbow yöntemi ile optimum küme sayısı $k=5$ olarak belirlenmiş, ardından k-Means algoritması ile bu kümeler oluşturulmuştur. Analiz sonucunda, öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerinin homojen bir şekilde dağılmadığı, belirli düşünsel özelliklerde kümelendiği ve bazı bireylerin aykırı değerlere sahip olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, kümelerin oluşumunu etkileyen en belirleyici sorular ve düşük etkiye sahip ifadeler belirlenmiş, bu sorular üzerinden kümelerin yapısı yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular, öğrencilerin özgüven, planlı çalışma, veri toplama ve öz motivasyon gibi becerilerde farklılaşabildiğini göstermiştir. Kümeleme sonuçları, eğitim ortamlarında bireyselleştirilmiş öğrenme stratejileri geliştirmek ve öğrenci profillerine göre özelleştirilmiş eğitim uygulamaları tasarlamak için değerli bir temel sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, eleştirel düşünmenin ölçülmesinde yapay zeka destekli analizlerin kullanımına dair güçlü bir örnek teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: eleştirel düşünme; eğitimde yapay zeka; makine öğrenmesi

Research Article

Analysis of Critical Thinking Profiles of University Students with k-Means Clustering Algorithm

Abstract: This study aims to analyze university students' critical thinking dispositions using machine learning methods, specifically the k-Means clustering algorithm and the Elbow method. Data were collected from 168 university students through a critical thinking disposition scale, and students were clustered based on their cognitive similarities. The Elbow method determined the optimal number of clusters as $k=5$, and the k-Means algorithm was applied accordingly. The analysis revealed that students' critical thinking profiles were not homogeneously distributed; instead, they were concentrated within specific cognitive clusters, with some individuals exhibiting outlier characteristics. Furthermore, the most influential and least impactful items in forming the clusters were identified, offering insights into the structure of each cluster. The findings showed that students differed notably in competencies such as self-confidence, planning, data gathering, and self-motivation. The clustering results provide a valuable foundation for

developing personalized learning strategies and designing educational interventions tailored to student profiles. In this respect, the study presents a strong example of how AI-supported analysis can be effectively applied to the measurement and interpretation of critical thinking skills in education.

Keywords: critical thinking; artificial intelligence in education; machine learning

1. Giriş

Eleştirel düşünme, bireylerin bilgiye eleştirel bir bakış açısıyla yaklaşmasını, fikirleri analiz etmesini ve değerlendirmesini sağlayan temel bir zihinsel beceri olarak tanımlanabilir. Bu beceri, bireylerin etkili problem çözme ve karar verme süreçlerinde önemli bir rol oynar [1]. Literatürde eleştirel düşünme özelliklerini anlamaya ve gruplandırmaya yönelik çalışmalar, genellikle öğrenci davranışlarını anlamaya ve eğitim stratejilerini geliştirmeye odaklanmıştır [2,3]. Öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerinin öğrenci başarıları üzerindeki etkisi ve bu becerilerin, bireylerin akademik yaşamlarına gösterdiği katkı açısından birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çoğunlukla eleştirel düşünme eğilimlerinin ölçülmesi ve bireylerin farklı bilişsel kategorilere ayrılması üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmalar, eleştirel düşünmenin bireylerin çeşitli bölüm ve alanlardaki performansları üzerindeki etkisini anlamak açısından önem arz etmektedir [4]. Eğitim alanında, makine öğrenmesi algoritmaları ve yapay zeka yöntemleri, öğrencilerin özelliklerini gruplandırmak ve bu gruplar üzerinden çıkarımlar yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle k-Means algoritması, verilerin çok boyutlu uzaylarda benzerliklerine göre gruplandırılmasını sağlayarak, çalışma gruplarının özelliklerini anlamamıza olanak tanır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, Akdeniz Üniversitesi Eğitim Fakültesi birinci sınıf öğrencilerinin temel bilgisayar kullanımı bilgi düzeyleri, 56 çoktan seçmeli sorudan oluşan bir test ile değerlendirilmiş ve sonuçlar k-Means kümeleme algoritması kullanılarak analiz edilmiştir [5]. k-Means algoritması, verilerin hızlı ve etkili bir şekilde gruplandırılmasında önemli bir rol oynamaktadır [6]. Ayrıca bu algoritma, eğitim verilerinde gruplama ve örüntü tanıma için yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri, öğrencilerin özelliklerini belirlemek, eğitim mater yallerini kişiselleştirmek ve bireylerin gelişimine yönelik stratejiler oluşturmak amacıyla eğitim alanında kullanılmaktadır. Kayalı ve Savaş (2024), makine öğrenmesi algoritmaları ile öğrenci gruplarının davranış örüntülerini analiz etmiş ve bu gruplardan yola çıkarak bireyselleştirilmiş eğitim stratejileri geliştirilmesini önermiştir [8]. Benzer şekilde, k-Means algoritması ile eğitim verilerinin boyutu azaltılmış ve gruplama analizi ile öğrenci davranışlarının özellikleri ortaya konmuştur [9].

Eleştirel düşünme becerilerini ölçmeye ve geliştirmeye yönelik çalışmalar, bireylerin bilişsel kapasitelerini anlamak ve bu becerilerin çeşitli başarı alanları üzerindeki etkilerini araştırmak için sürekli bir gelişim göstermektedir. Eleştirel düşünme analiz, değerlendirme ve çıkarım gibi temel becerileri kapsayan bir düşünme süreci olarak tanımlanmış ve bu becerilerin bireylerin akademik performansları üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Ayrıca eleştirel düşünme testleri geliştirilerek bu becerilerin bireyler arasındaki farklılıklarının ölçülmesini sağlamıştır [10]. Bu testler, bireylerin problem çözme ve karar verme süreçlerindeki yetkinliklerini anlamaya olanak tanımıştır [11]. Mehmedoğlu ve Keleş (2016), eleştirel düşünme eğilimlerinin öğrencilerin akademik performansları ve sosyal becerileri üzerindeki etkisini incelemiş, bu becerilerin bireylerin sosyal yaşamda çatışma çözme becerilerini de geliştirdiğini ortaya koymuştur [12]. Bir başka çalışmada ise eleştirel düşünme eğilimlerini belirlemek amacıyla farklı öz-değerlendirme teknikleri kullanılmış ve bireylerin bu becerilerinin zaman içinde geliştirilebileceği gözlemlenmiştir [13]. Eleştirel düşünme eğilimi, bireylerin analiz, değerlendirme, yorumlama ve tartışma gibi becerileri kullanma yönelimlerini ifade eder. Bu eğilim, eleştirel düşünme becerilerinin ve bu becerilerin etkilediği diğer yetkinliklerin kullanımında ve gelişiminde önemli bir rol oynar. Demircioğlu (2012), Ricketts ve Rudd tarafından 2005 yılında geliştirilen Eleştirel Düşünme Eğilimi (EMI) Ölçeği'ni Türkçeye uyarlayarak geçerlik ve güvenirlik çalışmalarını yapmış ve faktör yapısını farklı değişkenlere göre test etmiştir. Bu çalışma, ölçeğin Türk kültürüne uyarlanması ve lise öğrenci-

lerinin eleştirel düşünme eğilimlerinin ölçülmesi açısından önemlidir [14]. Semerci (2016), Eleştirel Düşünme Eğilimi (EDE) Ölçeği'ni geliştirerek geçerlik ve güvenirlik çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, ölçeğin yapı geçerliliğini doğrulayıcı faktör analizi ile test etmiş ve yüksek iç tutarlılık katsayıları elde etmiştir. Sonuçlar, ölçeğin eleştirel düşünme eğilimini ölçmede güvenilir bir araç olduğunu göstermiştir [15]. Döner ve Demir (2022) ise, ortaokul öğrencileri için Eleştirel Düşünme Eğilimi Ölçeği'nin geliştirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Araştırma sonucunda, 21 maddelik ve üç boyutlu bir ölçek geliştirilmiş ve ölçeğin geçerlik ve güvenirlik analizleri olumlu sonuçlar vermiştir [16]. Kılmen ve Demircioğlu (2014), Eleştirel Düşünme Eğilimi Ölçeği'ni Türkçeye uyarlayarak geçerlik ve güvenirlik çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen bulgular, ölçeğin Türk kültüründe de geçerli ve güvenilir bir ölçüm aracı olduğunu ortaya koymuştur [17]. Görüldüğü gibi birçok çalışmada eleştirel düşünme eğilimi ölçeği geçerli ve güvenilir bir ölçek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerini ölçmek için son günlerde popüler olan ve eğitim alanında da yoğun olarak kullanılan makine öğrenmesi teknikleri kullanılabilir. Makine öğrenmesi algoritmaları, eğitim verilerinde gruplama, boyut indirgeme ve veri örüntülerini anlamak için yaygın olarak kullanılır. k-Means algoritması, eleştirel düşünme eğilimlerini ve bu eğilimlerin alt boyutlarını temsil eden kümeleri belirlemek amacıyla kullanılabilir. Ayrıca bu algoritma, veri noktalarını benzerliklerine göre kümelere ayırarak, her bir grubun kendine özgü özelliklerini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada eleştirel düşünme analizi için makine öğrenmesi tekniği olan ve k-Means algoritması kullanılmıştır. k-Means algoritmaları kullanılarak eğitim verileri analiz edilmiş ve bireylerin farklı gruplardaki davranışları tanımlanmıştır. Benzer bir şekilde, öğrenci davranış örüntülerini gruplandırmak için k-Means algoritması kullanılarak bu gruplardan elde edilen bilgilerle bireyselleştirilmiş eğitim stratejileri geliştirilmesi önerilmiştir [18]. Eğitimde yapay zeka yöntemlerinin kullanımı, bireylerin akademik başarılarını iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda çoğulcul bir öğrenme ortamı yaratılmasına katkı sağlamıştır. Eğitim verilerinde makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak, bireylerin başarılarını etkileyen faktörleri önceliklendirmenin eğitim sistemlerini daha etkin hale getirdiği ortaya konmuştur [19]. Makine öğrenmesi algoritmalarının eğitimdeki uygulamalarına bakıldığında, k-Means algoritması sıkça kullanılmaktadır. Bu algoritma, verilerin benzerliklerine göre gruplandırılmasını sağlar ve eğitim verilerinde kümeleme analizleri için etkilidir [20]. Bakan ve Kanbay (2024), makine öğrenmesi yöntemleri ile eğitim başarısına etki eden faktörlerin modellenmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırma, eğitim kurumlarının strateji belirlemede ve önlem almada makine öğrenmesi tekniklerinden nasıl faydalanabileceğini göstermektedir [21]. Üniversite öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimlerini ve bilişsel özelliklerini anlamak amacıyla, makine öğrenmesi algoritması olan k-Means algoritması, verileri gruplandırarak belirli kümelere ayırmak için kullanılmaktadır. Bu yöntem, veri madenciliği ve örüntü tanıma alanlarında sıkça kullanılan güçlü araçlar olarak literatürde yer bulmaktadır [22].

Bu çalışmanın amacı, üniversite öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimlerini analiz ederek, benzer bilişsel ve düşünsel özellikler sergileyen öğrenci gruplarını belirlemek ve bu gruplar üzerinden bireyselleştirilmiş eğitim stratejileri geliştirmeye yönelik veriler sunmaktır. Bu doğrultuda, makine öğrenmesi tekniklerinden k-Means kümeleme algoritması kullanılarak, öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerine ilişkin veriler çok boyutlu uzayda gruplandırılmış ve analiz süreci optimize edilmiştir. Çalışma, eleştirel düşünme eğilimlerinin akademik başarıyla ilişkisini anlamanın yanı sıra, eğitim verilerinin yapay zeka destekli analizinin birey odaklı öğrenme ortamları oluşturma potansiyelini de ortaya koymayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, eğitim ortamlarında daha etkili ve veriye dayalı müdahalelerin tasarlanmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metod

Makine öğrenmesi temelli bu analiz sürecinde, öncelikle öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerine ilişkin veriler ön işleme tabi tutulmuş, ardından k-Means kümeleme algoritması ile gruplandırılmıştır. Ancak, k-Means algoritmasında optimum küme sayısının belirlenmesi, analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından kritik bir adımdır. Bu nedenle, uygun küme sayısının tespiti için Elbow (Dirsek) yöntemi kullanılmıştır.

2.1. Elbow Yöntemi

k-Means algoritmasında, optimum küme sayısını belirlemek kritik bir adımdır. Elbow yöntemi, bu amaçla sıkça kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, farklı k değerleri için kümeler içindeki verilerin toplam karesel hata (Within-Cluster Sum of Squares - WCSS) değerlerini hesaplayarak, WCSS'nin belirgin bir şekilde azalmayı durdurduğu "dirsek" noktasını tespit etmeye dayanır [23]. Elbow yönteminde, farklı k değerleri için WCSS hesaplanır ve bu değerler bir grafik üzerinde çizilir. Grafikte, WCSS'nin hızlı bir düşüşten sonra yavaşladığı nokta, optimum küme sayısı olarak kabul edilir. Bu nokta, grafikte bir dirsek (elbow) oluşturur [24].

Elbow yöntemi, k-Means algoritmasında uygun küme sayısını belirlemek için pratik ve görsel bir araç sağlar. Veri setinin yapısına uygun küme sayısını seçmek, modelin performansını ve yorumlanabilirliğini artırır. Bu nedenle, Elbow yöntemi, k-Means uygulamalarında sıkça kullanılır [25]. Elbow yöntemi, k-Means algoritmasında uygun küme sayısını belirlemek için pratik ve görsel bir araç sağlar. Veri setinin yapısına uygun küme sayısını seçmek, modelin performansını ve yorumlanabilirliğini artırır. Bu nedenle, Elbow yöntemi, k-Means uygulamalarında sıkça kullanılır.

2.2. k-Means Kümeleme Algoritması

k-Means, gözetimsiz öğrenme yöntemlerinden biri olup, verileri önceden tanımlanmış k sayıda kümeye ayırmayı amaçlar. Her küme, verilerin belirli özelliklerine göre gruplanmasını sağlar. Bu algoritma, özellikle büyük veri setlerinde verilerin doğal gruplarını belirlemek için etkilidir [26]. k-Means algoritması, verileri k adet kümeye ayırırken, her bir veri noktasını en yakın küme merkezine atar. Bu işlem, kümeler içindeki verilerin toplam karesel hata değerini (Within-Cluster Sum of Square-WCSS) minimize etmeyi hedefler [27] ve WCSS, her bir küme için Denklem 2.1'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$WCSS = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (2.1)$$

Burada; K : Toplam küme sayısı, n_j : j'ninci kümedeki veri noktalarının sayısını, $x_i^{(j)}$: j'ninci kümedeki i'ninci veri noktasını ve c_j : j'ninci kümenin merkezini temsil etmektedir. Algoritma, başlangıçta rastgele seçilen küme merkezleriyle başlar ve tekrarlı olarak ilk önce her bir veri noktası, en yakın küme merkezine atanır. Daha sonra her küme için merkez noktası, o kümedeki veri noktalarının ortalaması olacak şekilde güncellenir. Bu süreç, küme merkezlerinin konumları sabitlenene veya belirli bir tekrar sayısına ulaşıncaya kadar devam eder.

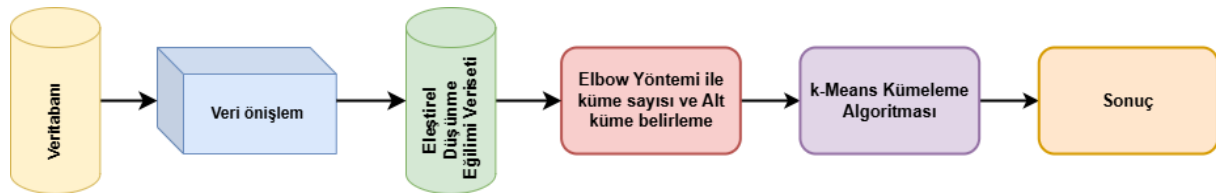
2.3. Veri Seti

Araştırmanın veri seti, üniversite öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimlerini ölçmek için uygulanan Semerci (2016)'nin geliştirdiği Eleştirel Düşünme Eğilimi (EDE) ölçeğinden elde edilmiştir. Anket, öğrencilerin demografik bilgileri ve eleştirel düşünme eğilimlerini değerlendiren maddelerden oluşmaktadır. Toplanan veriler, analiz öncesinde eksik veya tutarsız veriler açısından incelenmiş ve gerekli temizleme işlemleri uygulanmıştır. Toplanan veriler, analiz öncesinde normalize edilerek ölçeklendirilmiştir. Bu adım, farklı ölçeklerdeki verilerin analiz sırasında eşit ağırlıkta değerlendirilmesini sağlamıştır. EDE ölçeği, 49 maddeden oluşan ve beş alt temaya ayrılan çok boyutlu bir ölçek olup, bu alt temalar üstbilis, esneklik, sistematiklik, azim-sabır ve açık fikirliliktir. Örneklememiz Sağlık Bilimleri Fakültesinin dört bölümünde (Hemşirelik, Beslenme ve Diyetetik, Sosyal Hizmetler ve Ebelik) öğrenim göre 34 Erkek, 134 Kadın toplam 168 öğrenciden oluşmaktadır. Demografik bilgilerde sınıf düzeyi bulunmamaktadır. Bölüm, yaş aralığı ve cinsiyet bilgileri

bulunmaktadır. Ölçeğin değerlendirme kriteri ise 5 dereceli Likert ölçeğine dayanmaktadır: "Tamamen katılıyorum (5), Çoğunlukla katılıyorum (4), Kısmen katılıyorum (3), Çoğunlukla katılmıyorum (2), Hiç katılmıyorum (1)". Ölçeğin test-tekrar test korelasyonu 0.761, iki yarı puanlar arasındaki korelasyon ise 0.95 olarak bulunmuş ve bu sonuçlar, ölçeğin güvenilirliğini gösteren önemli bir referans noktasıdır. Ayrıca, ölçeğin Cronbach Alpha katsayısı 0.963 olarak hesaplanmıştır, bu da ölçeğin yüksek iç tutarlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

2.3. Önerilen Yöntem

Çalışma süreci, saha çalışmasından elde edilen verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla anlamlı sonuçlar elde edilmesini amaçlamaktadır. Şekil 1’de bu çalışma için geliştirilen yöntemin şeması görülmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşamasında öğrenciler üzerinden uygulanan saha çalışmasından elde edilmiş olan verilerin bir veritabanında toplanması görülmektedir. Daha sonra bu veritabanındaki gereksiz ya da yanlış-eksik veriler temizlenmiş ve toplamda 168 öğrenciden toplanan veriler elde edilmiştir. Elde edilmiş bu veriler üzerinden Elbow yöntemi ile küme sayısının tespiti için kırılım algoritması uygulanmış ayrıca alt gruplar elde edilmiştir. Elde edilmiş küme sayısına ve alt gruba göre k-Means algoritması uygulanmış ve çıkan sonuçlar tartışılmıştır.

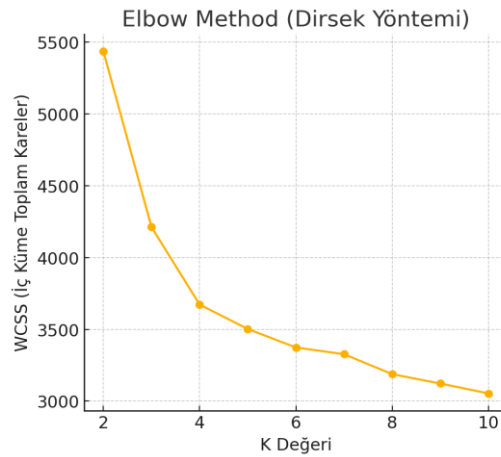


Şekil 1. Önerilen yöntemin özet görsel gösterimi.

Çalışmanın ilk aşamasında, üniversite öğrencilerine yönelik saha çalışması kapsamında bir anket uygulanmıştır. Bu anket, öğrencilerin demografik bilgilerini ve eleştirel düşünme eğilimlerini içeren bir veri seti toplamayı hedeflemiştir. Toplanan veriler, dijital bir veritabanında organize edilerek sistematik bir şekilde saklanmıştır. Bu aşama, verilerin güvenli bir şekilde işlenmesi ve sonraki analizler için uygun bir temel oluşturulmasını sağlamıştır. İkinci aşamada veritabanına eklenen ham veriler üzerinde detaylı bir ön işleme süreci uygulanmıştır. Bu süreçte, eksik, yanlış veya tutarsız veriler tespit edilerek temizlenmiş ve düzeltilmiştir. Verilerin normalleştirilmesi ve ölçeklendirilmesi gibi işlemler, analiz sürecinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, toplamda 168 öğrenciden elde edilen veriler analiz için uygun hale getirilmiş ve üçüncü aşamada görüldüğü gibi ön işlemden geçirilmiş hazır bir veri seti oluşturulmuştur. Dördüncü aşamada hazırlanan veri seti üzerinde Elbow yöntemi uygulanarak veri setindeki temel varyans kaynakları tespit edilmiştir. Küme sayısının belirlenmesi için dirsek-kırılım algoritması uygulanmış ve veri setindeki alt gruplar tespit edilmiştir. Bu aşama, öğrencilerin benzerliklerine göre gruplandırılmasını kolaylaştırmak adına önemlidir. Beşinci aşamada Elbow yöntemi ile belirlenen küme sayısına dayalı olarak, veri setine k-Means Kümeleme Algoritması uygulanmıştır. Bu algoritma, öğrencileri benzer özelliklere sahip gruplara ayırmış ve her bir kümenin özelliklerini ortaya koymuştur. k-Means algoritması, küme merkezlerini tekrarlı olarak güncelleyerek her bir öğrencinin hangi kümeye ait olduğunu belirlemiştir. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve benzer çalışmalar ile karşılaştırılması yapılarak tartışılmıştır.

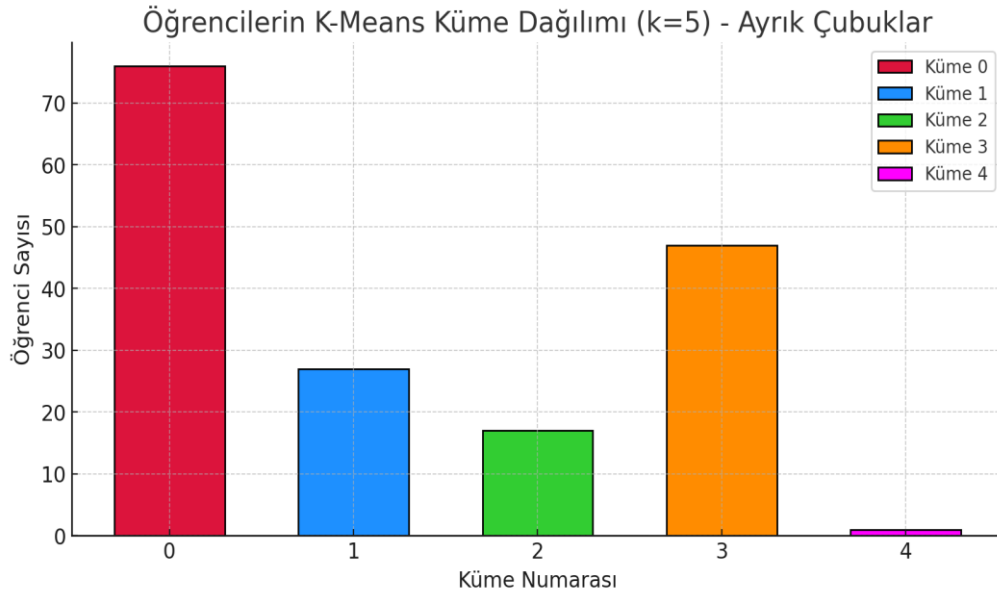
3. Bulgular

Önerdiğimiz k-Means kümeleme algoritması ile verilerin analizine başlamadan önce, ön işleme tabi tutulmuş veri seti için optimum küme sayısının belirlenmesi gerekmektedir. k-Means algoritması, denetimsiz öğrenme yöntemlerinden biri olup, küme sayısı (k) araştırmacı tarafından belirlenmelidir. Optimum k değerini tespit etmek için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan ve yüksek başarı gösteren Elbow (Dirsek) yöntemi tercih edilmiştir. Elbow yöntemi, her bir k değeri için, veri noktalarının kendi küme merkezlerine olan uzaklıklarının kareleri toplamını (Within-Cluster Sum of Squares - WCSS) hesaplar. Küme sayısı arttıkça WCSS değeri azalır; ancak belirli bir noktadan sonra bu azalma hızı yavaşlar. Bu noktada, WCSS değerindeki düşüşün belirgin şekilde azaldığı "dirsek" noktası gözlemlenir ve bu nokta, optimum küme sayısını işaret eder. Bu yöntem, verilerin içyapısını analiz ederek en uygun k değerini belirlemeye yardımcı olur [28]. Bu çalışmada, Elbow yöntemi kullanılarak veri setinin optimum küme sayısı belirlenmiş ve k-Means algoritması bu k değerine göre uygulanmıştır. Bu yaklaşım, verilerin daha anlamlı ve homojen gruplara ayrılmasını sağlayarak analizlerin etkinliğini artırmıştır. Şekil 2'de Elbow yöntemine göre tespit edilmiş dirsek grafikleri görülmektedir.



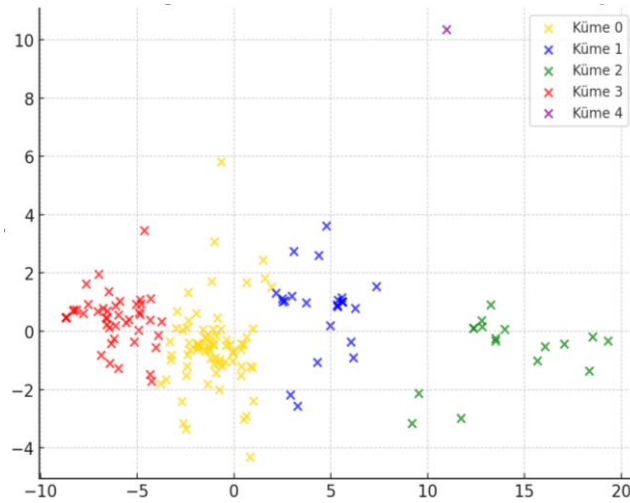
Şekil 2. Elbow yöntemine göre optimum küme sayısı tespit grafiği.

Şekil 2'de elde edilmiş olan Elbow grafiğini detaylı bir şekilde incelediğimizde, Elbow grafiğindeki WCSS değerindeki belirgin azalmaların küme sayısı 4 ila 7 arasında değişmiş, ancak 5 noktasından itibaren azalma hızının yavaşladığı gözlemlenmiştir. Dirsek noktası olarak tanımlanan bu keskin değişim noktası, optimum küme sayısının 5 olduğunu göstermektedir. Bu nedenle küme sayısını 5 olarak belirlemenin, verileri anlamlı ve homojen gruplara ayırmak açısından uygun olduğu görülmektedir. Bu seçim, kümeleme analizlerinin daha etkili olmasını sağlayarak, her grubun kendi içinde daha tutarlı ve gruplar arasında daha farklı özelliklere sahip olmasını sağlar. Ayrıca, daha fazla küme sayısının seçilmesi, modelin aşırı karmaşık hale gelmesine ve anlamlı bir fayda sağlamamasına neden olabilir. Bu çalışmada, Elbow grafiğinden elde edilen bilgiler ışığında, küme sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Bu karar, grafikteki dirsek noktasının bulunduğu yer ile uyumludur ve optimum çözüm olarak değerlendirilmiştir. Küme sayısının 5 olarak belirlenmesi, hem verilerin kendi içindeki homojenliğini hem de gruplar arasındaki farklılıkları koruyarak daha anlamlı analizler yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede, her küme içerisindeki veriler ortak özelliklere sahip olacak ve kümeleme sonuçları daha doğru bir şekilde yorumlanabilecektir. Şekil 3'te Eleştirel düşünme ölçeğinde öğrencilerin vermiş olduğu cevaplara göre k=5 küme sayısının dağılımları görülmektedir.



Şekil 3. k=5 küme sayısına göre kümelerin dağılım bar grafiği.

Optimum küme sayısı tespitinden sonra k-Means algoritmasına veriler giriş olarak verilmiş ve sonuçlar alınmıştır. Tablo 3'te k=5 küme sayısına göre verilerin dağılımları görülmektedir. Bu grafikteki değerlere göre noktasal gösterim Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. k=5 küme sayısına göre dağılım sağlayan verilerin noktasal gösterimi.

Şekil 4'te k-Means kümeleme algoritması sonucunda belirlenen beş farklı öğrenci grubunun çok boyutlu eleştirel düşünme verilerinin iki boyutlu uzayda noktasal dağılımı sunulmaktadır. Kümeler arasındaki belirgin ayrışma, öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerinin homojen olmadığını ve benzer bilişsel özelliklere göre gruplaştığını göstermektedir. Yoğunlaşma gösteren kümeler ortak düşünsel profilleri yansıtırken, bazı kümelerdeki dağınık yapılar marjinal ya da aykırı bireyleri işaret etmektedir. Bu dağılım, özellikle özgüven, planlama, öz motivasyon ve veri toplama gibi becerilerdeki farklılaşmayı

ortaya koyarak, bireyselleştirilmiş eğitim stratejilerine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Tablo 1’de ise sosyoekonomik duruma göre başarı durumu ele alınmıştır.

Tablo 1. *Sosyoekonomik Duruma Göre Başarı Durumu*

Soru	Ortalama sd	Soru Numarası	Ortalama Etkileme Yüzdesi (%)
Kendime güvenirim	1.39	41	2.22
Gerektiğinde esnek davranmasını bilirim	1.39	49	2.22
Kararlarımdan önce uygun verileri toplarım	1.40	35	2.24
Çalışmalarında kendi kendimi motive edebiliyorum	1.42	46	2.26
Herhangi bir işe başlamadan ya da karar vermeden önce nasıl yapacağımı düşünür ve planlarım	1.42	29	2.27

Tablo 1 incelendiğinde "Herhangi bir işe başlamadan ya da karar vermeden önce nasıl yapacağımı düşünür ve planlarım" (Soru 29) en yüksek ortalama etkilene yüzdesine (%2.27) sahiptir. Bu, öğrencilerin kümeler ayrılmasında en fazla değişkenlik gösteren soru olduğunu gösterir. Yani, bu soruya verilen yanıtlar, kümeler arasında belirgin farklılıklar yaratmaktadır. Analizi en çok etkileyen bir diğer soru "Çalışmalarında kendi kendimi motive edebiliyorum" (Soru 46) da %2.26 etkilene yüzdesi ile dikkat çekicidir. Bu, öğrencilerin öz motivasyon düzeylerinin küme ayrımında önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. "Kararlarımdan önce uygun verileri toplarım" (Soru 35) %2.24 etkilene yüzdesiyle, öğrencilerin analitik düşünme ve veri toplama alışkanlıklarının kümeleri ayırmada etkili olduğunu gösteriyor. "Kendime güvenirim" (Soru 41) ve "Gerektiğinde esnek davranmasını bilirim" (Soru 49) da benzer etkilene yüzdelere sahip olup, öğrencilerin özgüvenleri ve adaptasyon yeteneklerinin küme ayrımında belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Bu analiz, öğrencilerin eleştirel düşünme becerilerini belirleyen en kritik faktörleri ortaya koymaktadır. Eğitim süreçlerinde bu becerileri geliştirecek stratejilere odaklanmak, farklı küme profillerine göre özelleştirilmiş eğitim programları tasarlamak açısından önemli bilgiler sunabilir. Tablo 2’de öğrencilerin en az puanla cevap vermiş olduğu ilk 5 soru görülmektedir.

Tablo 2. *En düşük puanla cevaplanan ilk 5 soru*

Soru	Ortalama sd	Soru Numarası	Ortalama Etkileme Yüzdesi (%)
Herhangi bir şey hakkındaki düşüncelerimi açıkça ifade ederim	1.03	12	1.64
İlgilendiğim konu ile ilgili olmayan bilgilerin farkında olur ve onları ayıklarım	1.03	24	1.64
Problemin çözümü için birden fazla farklı çözüm yolu önerebilirim	1.06	17	1.69
Herhangi bir konuda ihtiyacım olan bilgiye nasıl ulaşacağımı bilirim	1.12	20	1.78
Herhangi bir konuda çalışma yaparken karşıma çıkan belirsizlikleri gidermeye çalışırım	1.14	9	1.81

Tablo 2 incelendiğinde belirli soruların kümeler arasındaki ayrımı belirlemede düşük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, öğrencilerin bu sorulara verdikleri yanıtların genellikle benzer olduğunu ve bu soruların gruplar arasındaki farklılıkları ortaya çıkarmada sınırlı bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle, "Herhangi bir şey hakkındaki düşüncelerimi açıkça ifade edebilirim" ve "İlgilendiğim konu ile ilgili olmayan bilgileri ayırt edebilirim" gibi soruların düşük varyans değerlerine sahip olması, öğrencilerin bu konularda benzer algılara sahip olduğunu ve bu soruların kümeleme analizinde gruplar arasındaki farklılıkları belirlemede sınırlı bir katkı sağladığını göstermektedir.

4. Tartışma

Bu çalışmada, üniversite öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimlerini k-Means kümeleme algoritması ve Elbow yöntemiyle analiz ederek, öğrenci profillerinin çok boyutlu bir yapıda nasıl kümelendiği gösterilmiştir. Kümelenecek sonuçlar, öğrencilerin eleştirel düşünme becerilerinin belirgin şekilde farklılaştığını ve bu farklılıkların eğitim stratejilerinin özelleştirilmesinde ne kadar değerli bilgiler sunduğunu ortaya koymaktadır. k-Means algoritması ile elde edilen kümeleme sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Her bir kümenin özellikleri, eleştirel düşünme eğilimlerinin alt boyutları ile ilişkilendirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular, öğrencilerin eleştirel düşünme eğilimlerini anlamada önemli çıkarımlar sağlamış ve bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Katılımcıların 49 soruya vermiş olduğu yanıtlar dikkate alınarak test yapılmış ve makine öğrenmesi çalışmaları ile çok daha hızlı bir şekilde analiz yapıldığı görülmektedir.

Üniversite öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimleri, k-Means kümeleme algoritması ve Elbow yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, öğrencilerin eleştirel düşünme profillerinin homojen bir şekilde dağılmadığını, belirli özellik kümelerinde yoğunlaştığını ve bazı bireylerin ise aykırı değerlere sahip olabileceğini göstermektedir. K=5 olarak belirlenen optimum küme sayısına göre yapılan analizler, öğrencilerin benzer düşünme ve değerlendirme özelliklerine sahip gruplar halinde kümelendiğini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle Küme 0 ve Küme 3 gibi sayıca büyük kümeler, ortak düşünsel özelliklere sahip geniş öğrenci gruplarını temsil ederken; Küme 4 gibi küçük kümeler, marjinal ya da aykırı değerlere sahip bireyleri yansıtmaktadır. Bu sonuçlar, eleştirel düşünme becerilerinin bireyler arasında belirgin farklılıklar gösterdiğini ve öğrencilerin bu becerilere sahip olma düzeylerinin çeşitli faktörlerden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Literatürde Semerci (2016), Demircioğlu (2012) ve Döner & Demir (2022) gibi çalışmalar, eleştirel düşünmenin çok boyutlu bir yapı taşıdığını ve bireylerin bu boyutlara farklı düzeylerde sahip olabileceğini ifade etmektedir. "Herhangi bir işe başlamadan ya da karar vermeden önce nasıl yapacağımı düşünür ve planlarım" gibi yüksek etkiye sahip sorular, öğrenciler arasındaki eleştirel düşünme farklılıklarını anlamada önemli göstergeler sağlamıştır. Buna karşılık, "Herhangi bir şey hakkındaki düşüncelerimi açıkça ifade ederim" gibi düşük varyansa sahip sorular, öğrencilerin genel olarak benzer görüşlere sahip olduğunu ve bu tür maddelerin küme ayrımında sınırlı rol oynadığını göstermektedir. Bu tür soruların gelecekteki ölçme araçlarında yeniden yapılandırılması veya ağırlıklandırılması gerekebilir. Kümeleme sonucunda elde edilen profiller, sadece akademik değil, aynı zamanda pedagojik açıdan da değerlidir. Elde edilen kümelere göre öğrenciler, bireysel öğrenme yaklaşımlarına göre gruplandırılabilir ve bu gruplara özgü eğitim stratejileri geliştirilebilir. Özellikle büyük kümeler için grup odaklı, işbirlikçi öğrenme modelleri uygulanabilirken; küçük ya da aykırı

kümeler için bireysel destek programları ve mentorluk gibi yaklaşımlar daha etkili olabilir. Kayalı ve Savaş (2024) ile Ahmad vd. (2019) tarafından yapılan benzer çalışmalar, makine öğrenmesi algoritmaları ile elde edilen grupların eğitsel karar süreçlerine entegre edilmesinin öğrenme verimliliğini artırdığını göstermektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmanın bulguları, eğitimcilerin öğrenci farklılıklarını daha iyi anlamalarına ve bu farklılıklara uygun eğitim ortamları tasarlamalarına katkı sunabilir. Özellikle kümeler arasındaki farklılıklar, kişiselleştirilmiş eğitim stratejilerinin gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Eleştirel düşünme gibi bilişsel becerilerin sadece bireysel değil, yapısal olarak da modellenabilir olduğu gösterilmiştir. Makine öğrenmesi destekli bu yaklaşım, eğitim araştırmalarında niteliksel değerlendirmelere alternatif olarak sayısal ve model temelli bir perspektif sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu analizlerin zamana bağlı değişimleri içerecek şekilde boyamsal olarak genişletilmesi ve kümelerin akademik performans, sosyoekonomik durum gibi değişkenlerle ilişkilendirilerek daha kapsamlı sonuçlara ulaşılması önerilmektedir. Eğitimde yapay zeka destekli analizlerin kullanımı, öğretmenlerin öğrenciler hakkında daha derinlemesine bilgi edinmelerine olanak tanırken, aynı zamanda eğitim stratejilerinin daha verimli hale getirilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, eleştirel düşünme eğilimlerinin yalnızca bireysel değil, aynı zamanda yapılandırılmış bir şekilde modellenebilir olması, eğitim araştırmalarına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Gelecek çalışmalarda, kümelerin zamanla değişimini ve diğer sosyoekonomik ya da akademik değişkenlerle olan ilişkisini inceleyerek daha kapsamlı sonuçlar elde edebiliriz. Bu da eğitim ortamlarında daha etkili müdahaleler tasarlamaya katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Etik Kurul İzin Bilgisi: Bu araştırma, Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etik Kurulu 2024/03-11 tarihli ve E.6338 sayılı kararı ile alınan izinle yürütülmüştür. Yazar(lar) bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Emir, S. (2012). Eğitim fakültesi öğrencilerinin eleştirel düşünme eğilimleri. *HAYEF Journal of Education*, 9(1), 34-57.
- [2] Ertuş Kılıç, H., Kılıç, H. E., & Şen, A. İ. (2014). UF/EMI Eleştirel Düşünme Eğilimi Ölçeğini Türkçeye Uyarlama Çalışması. *Eğitim ve Bilim*, 39(176). <https://doi.org/10.15390/EB.2014.3632>
- [3] Tunçer, E., & Sapancı, A. (2021). Ortaokul Matematik Öğretmenlerinin Eleştirel Düşünme Eğilim ve Uygulama Algıları Arasındaki İlişki. *Asian Journal of Instruction (E-AJI)*, 9(2), 2.

<https://doi.org/10.47215/aji.1000040>

- [4] Basmaz, I., & Kutlu, Ö. (2021). Eleştirel düşünme eğilimlerinin okuduğunu anlama, öğrenci, aile ve ev ortamı değişkenleri bağlamında incelenmesi. *Dijital Ölçme ve Değerlendirme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 100-118.
- [5] Çetin, H., & Sezgin, E. (2012). Eğitim fakültesi öğrencilerinin enformatik bilgi düzeylerinin k-Means algoritması ile gruplandırılması. *Education Sciences*, 7(1), <https://doi.org/10.12739/10.12739>
- [6] Özbay, Ö., & Ersoy, H. (2017). Öğrenme Yönetim Sistemi Üzerindeki Öğrenci Hareketliliğinin Veri Madenciliği Yöntemleriyle Analizi. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 37(2), 2.
- [7] Erdoğan, P., Çolak, B., & Durdağ, Z. (2016). K-Means Algoritması İle Otomatik Kümeleme. *El-Cezeri*, 3(2), 2. <https://doi.org/10.31202/ecjse.264195>
- [8] Kayalı, S., & Savaş, S. (2024). Öğrencilerin Akademik Performanslarını Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Değerlendiren Çalışmaların İncelenmesi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 10(3), 3.
- [9] Mohamed Nafuri, A. F., Sani, N. S., Zainudin, N. F. A., Rahman, A. H. A., & Aliff, M. (2022). Clustering Analysis for Classifying Student Academic Performance in Higher Education. *Applied Sciences*, 12(19), 19. <https://doi.org/10.3390/app12199467>
- [10] Mulnix, J. W. (2012). Thinking Critically about Critical Thinking. *Educational Philosophy and Theory*, 44(5), 464-479. <https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.2010.00673>.
- [11] Renaud, R. D., & Murray, H. G. (2008). A comparison of a subject-specific and a general measure of critical thinking. *Thinking Skills and Creativity*, 3(2), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2008.03.005>
- [12] Memduhoğlu, H. B., & Keleş, E. (2016). Öğretmen adaylarının eleştirel düşünme eğilimleri ve problem çözme becerileri arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Eğitim Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 2.
- [13] Kiliçaslan, E. A., & İskenderoğlu, T. A. (2023). Examining pre-service elementary mathematics teachers' views regarding critical thinking and doing mathematical proof. *JRAMathEdu (Journal of Research and Advances in Mathematics Education)*, 87-99. <https://doi.org/10.23917/jramathedu.v8i2.1402>
- [14] Demircioğlu, E. (2012). *Eleştirel düşünme eğilimi ölçeği'nin uyarlama çalışması ve faktör yapısının farklı değişkenlere göre incelenmesi*, [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Abant İzzet Baysal Üniversitesi.
- [15] Semerci, N. (2016). Eleştirel Düşünme Eğilimi (EDE) Ölçeğinin geliştirilmesi: Geçerlik ve güvenilirlik revize çalışması. *Turkish Studies*, 11(9), 725-740.
- [16] Döner, Y., & Demir, S. (2022). Ortaokul Öğrencileri İçin Eleştirel Düşünme Eğilimi Ölçeği'nin Geliştirilmesi: Geçerlik ve Güvenirlik Çalışması. *Pamukkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*(54), 99-129. <https://doi.org/10.9779/pauefd.823427>
- [17] Kilmen, S., & Demircioğlu, E. (2024). Eleştirel Düşünme Eğilimi Ölçeğinin Türkçe'ye Uyarlanması. *The Journal of Academic Social Science Studies*, 8(27), 27. <https://doi.org/10.9761/JASSS2434>

- [18] Ahmad, N. B., Alias, U. F., Mohamad, N., & Yusof, N. (2019). Principal Component Analysis and Self-Organizing Map Clustering for Student Browsing Behaviour Analysis. *Procedia Computer Science*, 163, 550-559. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.137>
- [19] Yıldız, M., & Börekci, C. (2020). Predicting Academic Achievement with Machine Learning Algorithms. *Journal of Educational Technology and Online Learning*, 3(3), 3. <https://doi.org/10.31681/jetol.773206>
- [20] Güner, G. (2025, Şubat 2). Machine Learning #4—Gözetimsiz Öğrenme, Kümeleme, K-Means Algoritması, Boyut Azaltma, Temel Bileşenler Analizi. *Medium* <https://gokerguner.medium.com/machine-learning>
- [21] Bakan, Z., & Kanbay, F. (2024). Makine öğrenmesi yöntemleri ile eğitim başarısına etki eden faktörlerin modellenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(45), 45. <https://doi.org/10.55071/ticaretfb.1442084>
- [22] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Phil. Trans. R. Soc.*, 374(2065). <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2015.0202>
- [23] Bholowalia, P., & Kumar, A. (2014). EBK-Means: A clustering technique based on elbow method and k-Means in WSN. *International Journal of Computer Applications*, 105(9).
- [24] Özarpacı, S., Kılıç, B., Bayrak, O. C., Özdemir, A., Yılmaz, Y., & Floyd, M. (2023). Comparative analysis of the optimum cluster number determination algorithms in clustering GPS velocities. *Geophysical Journal International*, 232(1), 70-80.
- [25] Bulut, Y. (2023). Denetimsiz Öğrenme: Kümeleme Analizi ile OECD Ülkelerinde Özgürlük. *International Journal of Educational and Social Sciences*, 2(2). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10429529>
- [26] Aslanyürek, M., & Mesut, A. (2021). Kümeleme performansını ölçmek için yeni bir yöntem ve metin kümeleme için değerlendirmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 53-65.
- [27] Kayahan, S., Günel, K., & Nuriyev, U. (2022). Eğitim İçerikleri için Sezgisel Metin Bölütlemeye Dayalı Çoklu Etiketleme Stratejisi: MEB Sanat Tarihi Kitabı için Bir Durum Çalışması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 15(2), 139-148
- [28] Geeksforgeeks. (2025). *Elbow Method for optimal value of k in KMeans*. GeeksforGeeks. <https://www.geeksforgeeks.org/elbow-method-for-optimal-value-of-k-in-kmeans/>

Araştırma Makalesi

Alzheimer Hastalığının Tespiti CNN Model Sınıflandırması

Ceren Gündüzalp^{1*}, Gökalep Tulum² ve Tahsin Gündüzalp³

Gönderim: 16.11.2024

Kabul: 27.01.2025

¹Herhangi bir enstitüye bağlı değil; gozunceren@gmail.com

²Topkapı Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Departmanı, İstanbul, Türkiye; gokalptulum@gmail.com

³Sağlık Bilimleri Üniversitesi, İstanbul Sancaktepe Şehir Prof. Dr. İlhan Varank Sağlık Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nöroloji Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye; tahsingunduzalp@gmail.com

*Sorumlu Yazar

Özet: Bilgisayar destekli cihaz ve sistemlerin sağlık sektöründe giderek artan kullanımı, hastalıkların daha erken ve daha hızlı teşhis edilmesine olanak sağlamaktadır. Bilgisayar destekli sistem ve cihazlar özellikle nörolojik hastalıkların tanı ve görüntülemesinde kritik bir rol oynamaktadır. Merkezi sinir sistemi ve bilişsel fonksiyonların değerlendirilmesindeki gelişmeler, özellikle Alzheimer Hastalığı gibi nörodejeneratif hastalıkların erken teşhisinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan veriler Kaggle platformunda açık kaynaklı olarak bulunan "Augmented Alzheimer MRI" isimli veri setinden alınmıştır. Bu veri setinde ikinci klasör kullanılmıştır. Toplamda 33.894 adet görüntü bulunmaktadır. Çalışmada Alzheimer hastalığı teşhisi analizi için derin öğrenme sınıflandırıcı model olarak Convolutional Neural Network (CNN) kullanılmıştır. Performans analizi yapılmıştır. Kullanılan CNN model accuracy değerini 0.9102 olarak vermiştir. Bu sonuçlar, CNN modelin kullanılmasıyla veri kaybının düşük olacağını, performansın iyi olacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: alzheimer hastalığı; CNN; demans; derin öğrenme

Research Article

Detection of Alzheimer's Disease CNN Model Classification

Abstract: The increasing use of computer-aided devices and systems in the health sector allows diseases to be diagnosed earlier and faster. Computer-aided systems and devices play a critical role in the diagnosis and imaging of neurological diseases in particular. Developments in the evaluation of central nervous system and cognitive functions provide significant advantages, especially in the early diagnosis of neurodegenerative diseases such as Alzheimer's Disease. The data used in the study were taken from the open source dataset called "Augmented Alzheimer MRI" on the Kaggle platform. The second folder was used in this data set. There are 33,894 images in total. In the study, Convolutional Neural Network (CNN) was used as a deep learning classifier model for Alzheimer's disease diagnostic analysis. Performance analysis was made. The CNN model used gave the accuracy value as 0.9102. These results show that by using the CNN model, data loss will be low and performance will be good.

Keywords: alzheimer's disease; CNN; dementia; deep learning

1.GİRİŞ

Alzheimer hastalığı, dünya genelinde milyonlarca insanı etkileyen, β -amiloid içeren senil plakların ve tau içeren nörofibriller yumakların varlığıyla ilerleyici ve geri dönüşümsüz bir nörodejeneratif hastalıktır,günlük yaşam aktivitelerini etkileyecek derecede hafıza kaybı, bilişsel yeteneklerde azalma ile karakterizedir [1]. Demansın en büyük alt tipidir ve tüm demans hastalarının, %60-%80 oran ile alzheimer hastası olduğu düşünülmektedir [2]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre , dünya çapında 50 milyondan fazla insanın demansla uğraştığı bilinmekle olup, 2050 yılına gelindiğinde bu sayının 50 milyon kişiden 152 milyon kişiye çıkması beklenmektedir.

Alzheimer, sıklıkla 65 yaş ve üzeri kişileri etkilemekle birlikte (Late Onset Alzheimer Disease-LOAD) vakaların %10'u erken başlangıçlıdır ve 65 yaşın altındaki kişilerde görülmektedir (Early Onset Alzheimer Disease-EOAD)[3]. 65 yaş altı hastalarda aile öyküsü (genetik geçiş) mevcut olup, 65 yaş üzeri hastalarda ise genetik geçiş daha az sıklıkla suçlanmaktadır. Hastalık tanısı geleneksel olarak nöropsikolojik testler ve hasta geçmişi değerlendirmesi de dahil olmak üzere klinik değerlendirmelere dayanmaktadır. Bununla birlikte, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve pozitron emisyon tomografisi (PET) gibi nörogörüntüleme tekniklerindeki son gelişmeler, tanı olasılığını arttırmaktadır[4].

Hastalığın patogenezi, beyindeki protein birikimleriyle ilişkilendirilir; özellikle beyin dokusunda bulunan sinir hücreleri arasındaki beta amiloid protein birikimi zamanla artmaktadır. Bu protein birikimleri, sinir hücreleri arasındaki iletişim bağlarının kopmasına yol açar[5]. Alzheimer hastalığı, erken beyin hücre kaybı ile ilişkilendirilir ve tanı konulduktan sonra ölüme kadar olan süre, istisnalar olmakla birlikte, genellikle 15-20 yıl arasında değişir[6].

Tablo 1. Alzheimer Hastalığı Evreleri

<i>Alzheimer Hastalığı Evreleri</i>
1-CU (bilişsel olarak bozulmamış-cognitively unimpaired)
2-SCI (subjektif bilişsel bozukluk-subjective cognitive impairment)
3-MCI (hafif bilişsel bozukluk-mild cognitive impairment)
4-Hafif Evre Demans
5-Orta Evre Demans
6-Ağır Evre Demans

Bu sınıflandırmanın ilk iki evresi Alzheimer hastalığı prelinik dönemini yansıtmakta iken son dört evresi klinik dönemi yansıtmaktadır. Tanı bilişsel yıkımın varlığı, en az iki bilişsel alandaki bozulmanın gösterilmesi ve günlük yaşam aktivitelerinin etkilenmeye başlaması ile konur [7].

Alzheimer vakaları genelde yakın bellek bozukluğu ile başlar. Hastalığın ilerlemesiyle birlikte; konuşmada bozukluk, yer-yön bulmakta zorlanma, yemek yapma ve araç kullanmada zorluklar, alışveriş, para hesabı ve ev işleri yapamama, kelimeleri hatalı söyleme, yakın geçmişi hatırlamama; ağır formlarında ise yeme ve içme bozuklukları, yutma bozuklukları ve halüsinasyonlar gibi günlük yaşamı etkileyen durumlar ortaya çıkmaktadır[2].

1.1. Alzheimer Hastalığı Patofizyolojisi , Genetik ve Risk Faktörleri

Amiloid birikimi ile ‘‘Senil Plaklar’’ oluşurken, Tau birikimi ile de ‘‘Nörofibriller Yumaklar’’ oluşur ve transsinaptik yolla komşu bölgelere yayılır. Bu sayede beyin astrositlerinin de sürece dahil olması ile tetiklenen enflamatuar süreç neticesinde nöron,sinaps kayıpları ve transsinaptik dejenerasyon başlar, enflamatuar süreç ilerledikçe nöron kaybı, sinaps kaybı ve kolinerjik kayıplar

yaşanmaya başlar ve gliozis gelişir. Günümüzde Alzheimer tedavisinde yer alan antikolinergik ajanlar, özellikle kolinerjik yıkımı önlemeye yönelik etki gösterirler. Amiloid birikimi, preklinik evreden klinik evreye geçişi temsil ederken hastalık şiddeti ile korelasyon göstermez fakat p-tau ile klinik şiddet tam koreledir[7].

Aile öyküsü ve genetik anlamda suçlanan üç otozomal dominant geçiş gösteren gen tanımlanmıştır, görülme sıklığına göre presenilin 1 (%80), amiloid prekürsör protein (%15) ve presenilin 2 (%5) şeklinde sıralanmakta olup her üçü de amiloid kaskadı üzerinden etki ederek Amiloid Beta-40'nın daha toksik formu olan Amiloid Beta-42'ye dönüşümünü artırmaktadır. Bununla birlikte kolesterol /lipit mekanizması üzerinden etki edip Aβ klirensinde bozulmaya neden olan Apolipoprotein E (ApoE) mutasyonu da genetik anlamda önemli yer tutmak ile birlikte üç ayrı forma sahiptir(ε2 , ε3 ve ε4).

Yapılan araştırmalara göre kadınlarda, hastalığa yakalanma olasılığı erkeklere göre daha fazladır. Bu durum kadınlarda, menopoz sonrası nörotrofik bir hormon olan östrojenin olmayışı ve kadınların erkeklerden daha uzun yaşam beklentilerinin olması ile açıklanabilir[8]. Düşük eğitim düzeyi risk faktörü olarak gözlemlenmiştir, yüksek eğitim düzeyi ve zihinsel aktivite daha zengin bilişsel rezerv oluşturuyor olabilir. Alzheimer hastalığının değiştirilemeyen risk faktörleri, cinsiyet, yaş ve genetikdir. Kadın cinsiyet, 65 üzeri yaş ve ilgili gen (psen1, app, psen2, apoE v.s.) mutasyonu pozitif bireyler Alzheimer'a daha yatkındır [9].

1.2. Teşhis Yöntemleri, Biyoışaretleyiciler , Nöropsikolojik Testler ve Tedavi

Alzheimer hastalığı, National Institute On Aging (Ulusal Yaşlanma Enstitüsü- NIA) ve Alzheimer's Association (Alzheimer Birliği-AA) tarafından amiloidoz tabanlı nörodejenerasyonla başlayıp, fosforile tau'nun hikayeye eklenmesi ile beyin tüm alanlarına zamanla yayılım gösteren, yakın bellek, dilsel, görsel-mekansal işlevlerin bozulduğu fakat kişisel özelliklerin görece olarak hastalığın ileri evresine kadar sağlam kaldığı ve asemptomatik evreden demans evresine kadar progresyon gösterebilen bir hastalık olarak tanımlanmış ve ATN adı altında isimlendirilen, biyoışaretleyicileri (Bİ) önemseyen bir tanı kriteri dizini geliştirilmiştir (A: Amiloid belirteçleri, T: Tau belirteçleri, N: Nörodejenerasyon belirteçleri) [7].

Alzheimer hastalığı, ayrıntılı bir tıbbi öykü ve bellek bozukluğu ile diğer bilişsel işlevleri değerlendiren nöropsikolojik testleri içeren klinik kriterlere göre teşhis edilmektedir. Bu yaklaşım, demansın diğer nedenlerini dışlamaya ve bilişsel eksiklikler ve davranışsal değişiklikler yoluyla Alzheimer hastalığını doğrulamaya odaklanmaktadır[10].

Alzheimer Hastalığı tanısında kullanılan başlıca nöropsikolojik tarama ve evreleme testleri ,Mini Mental Durum Değerlendirilmesi (Mini Metal Scale Examination-MMSE) ,Addenbrook Kognitif Değerlendirilmesi (ACE-R),Montreal Kognitif Muayenesi (MOCA),Global Bozulma Ölçeği (Global Deterioration Scale-GDS),Demansın Klinik Evrelendirilmesi (Clinical Dementia Rating Scale-CDR) testleridir.

Alzheimer Hastalığı tanısında önemli bir rol oynayan biyoışaretleyiciler alt grubunda yer alan görüntüleme teknikleri arasında FDG-PET, MRI ve beyin omurilik sıvısı analizleri bulunmaktadır. FDG-PET ile temporo-parietal hipometabolizma tespiti, Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) ile medial temporal lob (MTL) ve hipokampal atrofi (HA) belirlenmesi ve beyin omurilik sıvısında düşük amiloid beta-42 ile yüksek fosforile tau seviyelerinin saptanması, olası Alzheimer Hastalığı tanısını destekleyen önemli bulgulardır. [7].

Nörogörüntüleme, Hafif Bilişsel Bozukluk'tan (MCI) Alzheimer Hastalığı'na (AH) geçişi gösterme kabiliyetinin yanı sıra, Alzheimer Hastalığı'nı diğer nörodejeneratif hastalıklardan ayırt etme yeteneğine de sahiptir. Bu yöntemler, yapısal ve fonksiyonel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır[11].

Yapısal görüntüleme teknikleri olarak BT ve MRI kullanılmaktadır. Fonksiyonel görüntüleme teknikleri ise, Fonksiyonel MRI, Pittsburgh bileşiği B-PET, FDG(18F-2-floro-2-deoksi-D-glikozu)-PET,SPECT (Tek foton emisyonlu bilgisayarlı tomografi) olarak tanımlanmaktadır.

Mevcut tedaviler, Alzheimer hastalığı için net ve kalıcı bir çözüm bulunmadığından, semptomların yönetimine odaklanmaktadır. Ancak, son yıllarda U.S. Food and Drug Administration (FDA) tarafından onaylanan yeni nesil anti-amiloid tedavi ajanları (Aducanumab, Donanemab, Lecanemab), hastalığın progresyonunu değiştirebilecek potansiyeline sahip, umut verici seçenekler sunmaktadır. Ayrıca, bilişsel semptomların yönetimine yardımcı olmak için kolinesteraz inhibitörleri (Donepezil, Rivastigmin, Galantamin) ve hastalığın etyolojisinde rol oynadığı düşünülen N-metil-D-aspartat (NMDA) reseptör antagonistleri (Memantin) de tedavi seçenekleri arasında yer almaktadır. [9].

1.3. Çalışmanın Amacı ve Literatür

Literatür incelendiğinde, Alzheimer teşhisi için çeşitli derin öğrenme modelleri (CNN, LSTM, Inception-V4, EfficientNet vb.) ve klasik makine öğrenimi yöntemlerinin (XGB, SVM, KNN vb.) yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Çalışmalarda genellikle kullanılan veri setlerinin boyutu ve özellikleri detaylı şekilde belirtilmekte; örneğin, Alzheimer MRI veya ADNI gibi farklı veri setleri üzerinde test edilen modeller dikkat çekmektedir. Veri setinin boyutu ve kalitesi, modelin performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, bazı çalışmalar belirli veri setleri üzerinde birden fazla modelleme yaklaşımını karşılaştırarak farklı performans ölçütleri sunmakta, bu da çalışmalar arasında karşılaştırma yapılmasını ve belirli bir modelin üstünlüğünün değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Payan ve Montana tarafından yapılan çalışmada (2015), beyindeki MRI görüntülerini kullanarak, Alzheimer Hastalığı Nörogörüntüleme Girişimi (ADNI) toplamda 2265 katılımcının olduğu her birinde 755 hasta olmak üzere, Alzheimer hastalığı, MCI ve sağlıklı birey gruplarından alınmış MR görüntüleri veri seti olarak değerlendirilmiştir[13]. Salehi ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, ADNI veri tabanından alınan 1512 hafif, 2633 normal ve 2480 Alzheimer hastalığının sınıfına ait toplam 7635 görüntü kullanmıştır. Bu görüntüler üzerinde, Evrişimli Sinir Ağı (CNN) kullanılarak bir model eğitilmiştir. Model, Alzheimer hastalarını sınıflandırmada %99 gibi yüksek bir doğruluk oranına ulaşmaktadır[14]. AbdulAzeem ve arkadaşları (2021), çalışmalarında ADNI veri setini kullanarak hem ikili sınıflandırma (Alzheimer hastası ve bilimsel olarak normal) hem de çoklu sınıflandırma deneyleri gerçekleştirmiştir. İkili sınıflandırma deneylerinde %99.6, %99.8 ve %97.8; çoklu sınıflandırma deneylerinde ise %97.5 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. [15]. Karabay ve Çavaş'ın yaptıkları çalışmada (2022), MR görüntü analizi, çalışmanın temelini oluşturur. Bu araştırmada, hastalıkların teşhis edilmesi için AlexNet ve MobileNetV2 gibi derin öğrenme mimarileri ile ESA modeli kullanılmıştır. Özellik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiş ve bu özellikler modele entegre edilmiştir. Araştırmada, özellik seçimi için Komşuluk Bileşen Analizi (KBA) algoritması kullanılmış ve sınıflandırma işlemi Destek Vektör Makineleri (DVM) ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular, modelin %100 doğruluk oranına ulaştığını ortaya koymuştur. [16]. El Latif ve arkadaşları (2023), Alzheimer hastalarına ait 4 sınıflı ve toplam 6400 örnekten oluşan bir veri setini Kaggle üzerinden temin ederek çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Araştırmada, ikili sınıflandırma görevleri için %99,22 doğruluk oranı elde edilmiş, çoklu sınıflandırma görevleri için ise %95,93 genel doğruluk değeri rapor edilmiştir [17]. Murugan ve arkadaşları (2021), Alzheimer MRI veri setinden 4 sınıflı ve 6400 örnekten oluşan bir veri seti kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Araştırmada CNN ve DEMNET mimarileri uygulanmış ve bu yöntemlerle %95,23 başarı oranı elde edilmiştir [18]. Bangyal ve arkadaşları (2022), Alzheimer MRI veri setini kullanarak çalışmalarında 4 sınıflı sınıflandırma gerçekleştirmiştir. CNN ile birlikte makine öğrenimi yaklaşımlarından XGB, SGD, MLP, SVM ve KNN yöntemlerini kullanarak %94,61 başarı oranı elde etmişlerdir [19]. Balaji ve arkadaşları (2023) ise Kaggle platformunda bulunan Münih veri setini kullanarak CNN ve LSTM mimarilerini uygulamış ve %98,50 doğruluk değeri rapor etmişlerdir [20].

Literatürde farklı görüntüleme yöntemleri için kullanılan yapay zeka ve derin öğrenme tabanlı yöntemler de [21-23] algoritmaların performansını artırmaya yönelik önemli katkılar sağlayarak, tanı süreçlerinde etkili sonuçlar elde edilmesine olanak tanımıştır.

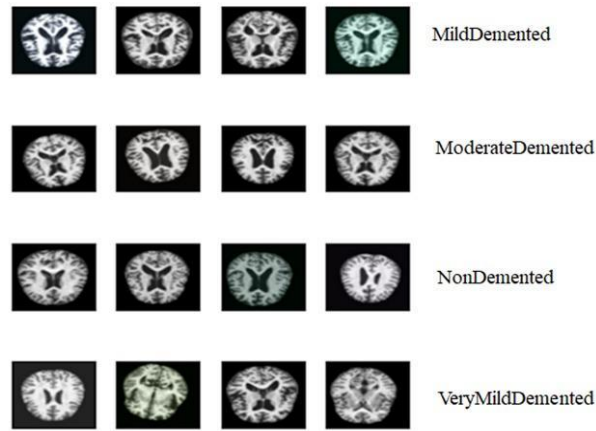
Tablo 2. Veri Setlerinin Önceki Modellerle Karşılaştırılması

Referans	Metod	Database	Performans
(Murugan ve ark., 2021)	CNN, DEMNET	-6400 adet veri -4 sınıflı AlzheimerMRI	Accuracy= 95.23%
(Bangyal ve ark., 2022)	CNN, XGB, SGD, MLP, SVM, KNN	AlzheimerMRI	Accuracy= %94.61
(Balaji ve ark., 2023)	CNN + LSTM	Kaggle - Münih Veritabanı	Accuracy = 98.50%
(Payan ve Montana, 2015)	2D CNN, 3D CNN	ADNI	Accuracy = 85.53% 89.47%
(Salehi ve ark., 2020)	CNN	ADNI, 7635 adet veri	Accuracy = 99%
(AbdulAzeem ve ark., 2021)	-İkili Sınıflandırma, Çoklu Sınıflandırma	ADNI	Accuracy= %99.6. %99.8. %97.8; Accuracy =97.5%
(Karabay, 2022)	ALEXNET, MOBILENET, DVM Sınıflandırma	-6400 adet veri -4 sınıflı -AlzheimerMRI	Accuracy= 100%
(El Latif ve ark., 2023)	-İkili Sınıflandırma -Çoklu Sınıflandırma	-6400 adet veri -4 sınıflı AlzheimerMRI	Accuracy=99. 22% Accuracy=95. 93%

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Veri Seti ve Ön işleme

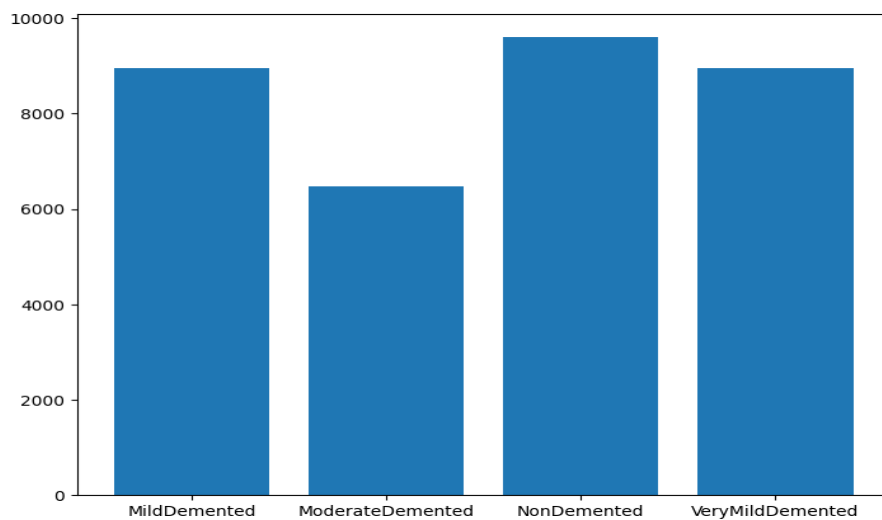
Çalışmada kullanılan veriler Kaggle platformunda açık kaynaklı olarak bulunan “Augmented Alzheimer MRI” isimli veri setinden alınmıştır. Verisetinde toplam 33.894 adet görüntüden oluşmaktadır. Veriseti, Mild Demented (hafif evre demans), Moderate Demented (orta evre demans), Non Demented (demans bulunmayan) ve VeryMildDemented (hafif bilişsel bozukluk, mild cognitive impairment) olmak üzere toplamda dört sınıftan oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Veri Seti Ekran Görüntüsü

Non Demented (Demans Bulunmayan) sınıfı, Alzheimer hastalığı veya herhangi bir demans belirtisi göstermeyen bireylerin beyin görüntülerini içermektedir. Very Mild Demented (Hafif Bilişsel Bozukluk, Mild Cognitive İmpairment) günlük yaşam aktivitelerinde genellikle bağımsız olmasına rağmen bazı kararlarda yakınlarından destek alması gerekirken ,Mild Demented (Hafif Evre Demans) sınıfında iş performansında düşüş, yakın geçmişi hatırlamada sorunlar, uyku düzensizlikleri, cinsel istekte azalma, hobileri sürdürmekte güçlükler, bilindik mekanlarda yolculuk yapmak mümkün olsa da yabancı mekanlara oryantasyon ve araç kullanmada güçlükler başlamıştır. Moderate Demented (Orta Evre Demans) sınıfında ev dışı yaşam imkânsız hale gelmekle birlikte, tuvalet, el ve yüz yıkama işleri yapılabilmekle beraber, elbiseleri giymede, düğme iliklemede güçlükler başlamıştır. Birinci derecede yakınlar tanınabilse de ikinci derecedeki yakınları tanımak zorlaşmıştır. Terkedilme, gaspedilme, aldatılma gibi hezeyanları başlamış, uyku düzeni bozulmuş ve yeni şeyleri öğrenme, yazı yazma, okuma gibi yetiler kaybedilmeye başlamıştır.

Veri setinin, MildDemented, ModerateDemented, NonDemented ve VeryMildDemented dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Veri Setinin Sınıflarına Göre Dağılımı

Çalışmada kullanılan Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) görüntüleri gri tonlamalıdır. Görüntüler, öncelikli olarak 128x128 piksel çözünürlüğüne ölçeklendirilmiştir. Boyutlandırma işlemi sonrasında görüntülere Gaussian filtresi uygulanmıştır. Bu işlem ile, görüntüdeki gürültülerin azaltılması amaçlanmaktadır. Görüntülerin piksel değerleri, sınıflandırıcıya girmeden önce min-max normalizasyonu ile 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir. Bu normalizasyon, modelin öğrenme sürecinde daha hızlı ve düzenli bir şekilde sağlamaktadır. Ayrıca, veri artırma (data augmentation) tekniği olarak rastgele yakınlaştırma (zoom) uygulanmıştır. Bu işlem, görüntülerin boyutlarını %80 ile %120 arasında rastgele bir oranla değiştirmiştir. Ancak bu yakınlaştırma işlemi yalnızca eğitim veri seti üzerinde uygulanmıştır. Bu sayede model, farklı ölçeklerdeki verilerle daha güçlü bir şekilde eğitilmiştir.

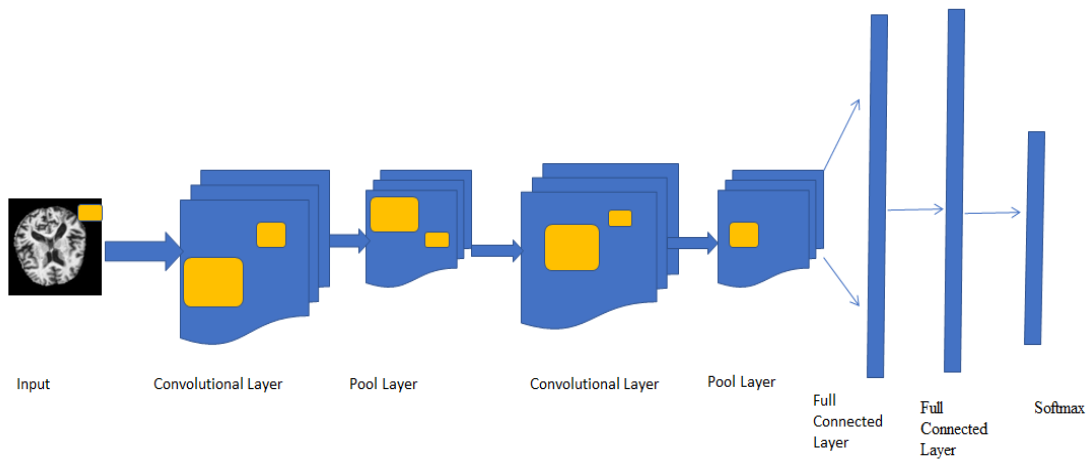
Tüm bu ön işleme ve filtreleme adımları, veri kalitesini artırmayı ve modelin genel performansını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu işlem süreci, özellikle Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) gibi derin öğrenme modellerinin daha verimli bir şekilde eğitilmesine olanak tanımaktadır.

2.2. Derin Öğrenme Modeli

Çalışmada Alzheimer hastalığı sınıflandırılması için derin öğrenme sınıflandırıcı model olarak Convolutional Neural Network (CNN) kullanılmıştır. Veri seti; %80 eğitim, %10 doğrulama ve %10 test seti olarak üçe bölünmüştür. Eğitim Seti, modelin gerçek veriler üzerinde öğrenmesi için kullanılmaktadır. Doğrulama seti, eğitim sırasında modelin performansını izlemek için kullanılmıştır. Test Seti, eğitim tamamlandıktan sonra modelin gerçek performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Çalışma Python programlama dilinde, Visual Studio üzerinden gerçekleştirilmiştir.

CNN mimari, konvolüsyon katmanları ve havuzlama katmanları gibi yapıları barındırır. Görsel bilgiyi sıralı bir şekilde işleyerek daha yüksek seviyeli özelliklerin çıkarılmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda, girdi verisinin daha etkili bir şekilde kullanılması ve analiz edilmesi sağlanmaktadır. Sınıflandırma işlemlerinde Farklı boyutlarda konvolüsyon filtreleri tercih edilerek daha az baskın olan özneliliklerin tanımlanması amaçlanmaktadır [12].

Evrişimli Sinir Ağları (CNN), farklı türde katmanlardan oluşan bir yapıya sahiptir. CNN'lerin temelini oluşturan katman tipleri arasında evrişim katmanları, havuzlama (pooling) katmanları ve tam bağlantılı (fully-connected) katmanlar bulunmaktadır.



Şekil 3. CNN Yapısal Mimarisi

Giriş Katmanı, CNN mimarinin ilk katmanıdır. Ham veriyi doğrudan bir sonraki katmana iletir. Konvolüsyon Katmanı, CNN'nin dönüşüm katmanı olarak da bilinir. Bu katman belirli bir filtrenin tüm giriş görüntüsü üzerinde dolaştırılması işlemine dayanmaktadır. havuzlama katmanı, konvolüsyon işleminden sonra uygulanır. Bu işlem, özellik haritasının boyutunu indirgeyerek bilgi sıkıştırması

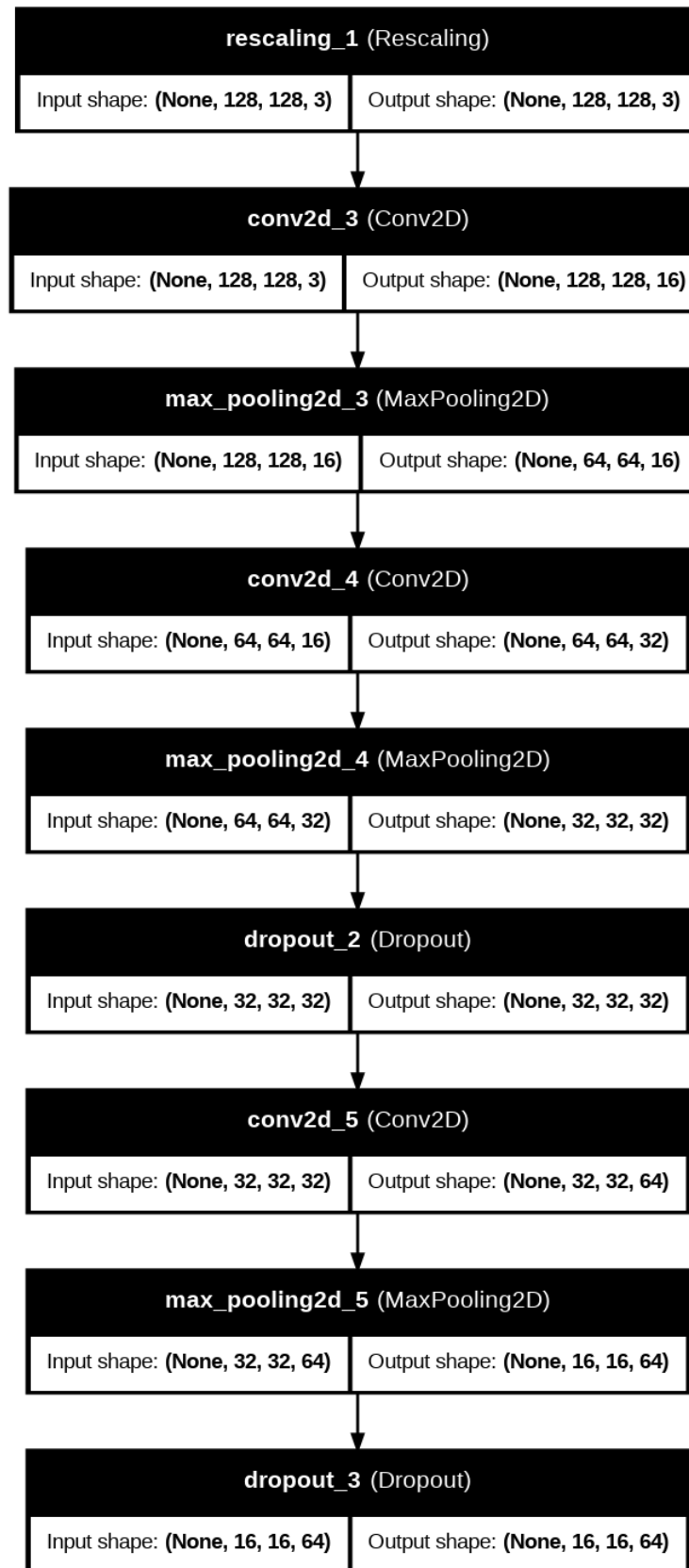
işlemini gerçekleştirir. Tam bağlantı katmanı, CNN mimarisinin genellikle son katmanıdır ve bu katman, tüm düğüm ve nöronları bir sonraki katmanlara bağlayarak bir yapay sinir ağı oluşturur. Bu yapı, çıkarılan özellikleri sınıflandırma veya tahmin işlemleri için bir araya getirir. Softmax fonksiyonu ise özellikle sınıflandırma problemlerinde sıkça kullanılan bir aktivasyon fonksiyonudur. Bu katman, her çıkış sınıfına ait olasılık değerlerini hesaplar ve bu değerleri olasılık dağılımı şeklinde sunar. Softmax fonksiyonu sayesinde, modelin bir girdinin belirli bir sınıfa ait olma olasılığını ifade eden normalleştirilmiş çıkışlar elde edilir. Şekil 3’de Temel CNN yapısal mimarisi verilmiştir. Veri setinin model tarafından adım adım işlenmesine “epoch” adı verilir. Bir epoch, veri setinin tamamının modele bir kez sunulmasını ifade eder. Modelin eğitimi sırasında, belirli bir noktada performansın kötüye gitmesi veya kayıpların iyileşmemesi durumunda, eğitim sürecini erken sonlandırmak için erken durdurma (early stopping) yöntemi kullanılır. Bu yöntem, gereksiz yere devam eden eğitim sürecini önleyerek hem zaman tasarrufu sağlar hem de modelin aşırı öğrenmesini engeller. Modelin eğitim veri setine gereğinden fazla uyum sağlaması durumunda ise overfitting (aşırı öğrenme) adı verilen bir durum meydana gelir. Overfitting, modelin eğitim veri setini ezberlemesi ve dolayısıyla yeni veriler üzerinde kötü performans göstermesiyle sonuçlanır. Bu durum, modelin genelleme yeteneğini kaybetmesine neden olur ve gerçek dünya problemlerinde etkili bir şekilde kullanılmasını zorlaştırır. Erken durdurma, overfitting’i önlemeye yönelik etkili bir stratejidir.

2.3. Geliştirilen CNN Model Eğitim ve Test Süreçleri

Çalışmada önerilen model, Alzheimer gibi nörolojik hastalıkların erken tespiti için özel olarak tasarlanmış ve literatüre yeni bir CNN mimarisi olarak sunulmuştur. Modelin kernel boyutları, deneysel olarak optimize edilerek görüntülerdeki ince yapısal ve fonksiyonel değişiklikleri algılama yeteneği artırılmıştır. Bu sayede, Alzheimer’a özgü beyin bölgelerinde görülen atrofi (hacim kaybı) veya hasar gibi belirtiler doğru ve etkili bir şekilde öğrenilebilmektedir. Bu yaklaşım, modelin hastalığın erken evrelerinde tanı koyma başarısını önemli ölçüde desteklemektedir.

Şekil 4’te çalışmada önerilen CNN mimarisine ait katman yapısı detaylı şekilde gösterilmektedir. Mimaride ilk olarak, rescaling katmanı ile piksel değerleri $[0, 1]$ aralığına ölçeklendirilerek veri ön işleme yapılmaktadır. Konvolüsyon katmanları, modelin temel özellikleri (kenarlar, doku vb.) öğrenmesi için kullanılmıştır. Bu katmanlar, Şekil 4’te giriş ve çıkış boyutlarıyla birlikte belirtilmiştir. Her konvolüsyon katmanından sonra bir havuzlama katmanı uygulanmıştır. Havuzlama katmanları, modelin hesaplama yükünü azaltarak belirgin özellikleri özetlemektedir. Dropout katmanları, aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla modele eklenmiştir. Eğitim sırasında ağı rastgele bir kısmı devre dışı bırakılarak genelleme yeteneği artırılmıştır. Dropout ve havuzlama işlemlerinin ardından, veriler tam bağlantılı katmanlara aktarılmadan önce bir boyutlu vektörlere dönüştürülmüştür. Modelin sınıflandırma görevini gerçekleştirmesi için tam bağlantılı katmanlar kullanılmıştır. Modelin derlenmesi için Adam Optimizasyon Algoritması tercih edilmiştir. Eğitim sırasında doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve ROC Eğrisinin (Receiver Operating Characteristic) altında kalan alan (AUC) metrikleri kullanılarak model performansı değerlendirilmiştir.

Model, eğitim aşamasında 100 epoch kullanılarak eğitilmiştir. Early stopping yöntemi uygulanmış ve durma kriteri olarak 10 epoch boyunca iyileşme olmaması seçilmiştir. Bu doğrultuda, model eğitimi 41. epoch adımıyla otomatik olarak durdurulmuştur. Model, eğitim verisine göre güncellenmiş ve eğitilmiş veriler CNN mimarileri kullanılarak analiz edilmiştir.

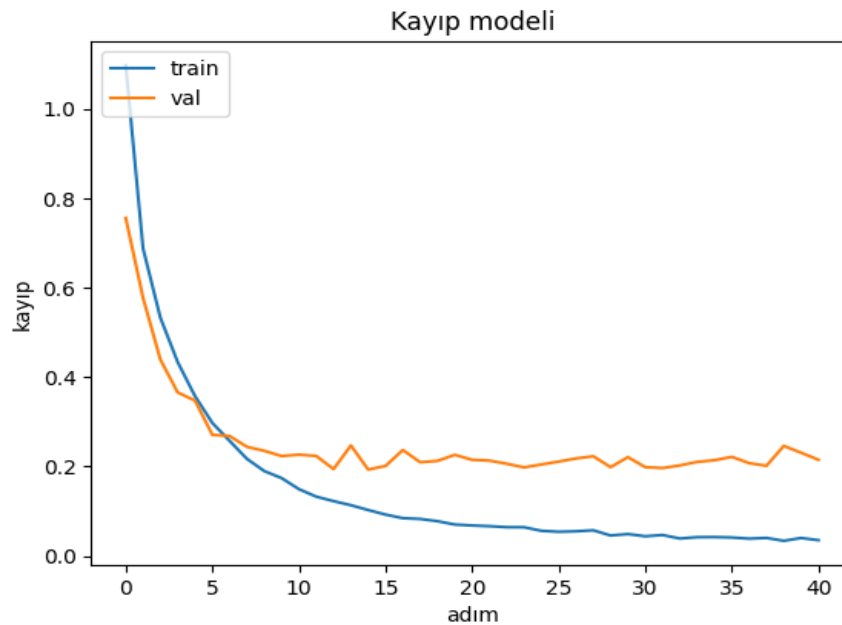


Şekil 4. CNN'in her katmanındaki çıktı boyutu ve model parametreleri

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

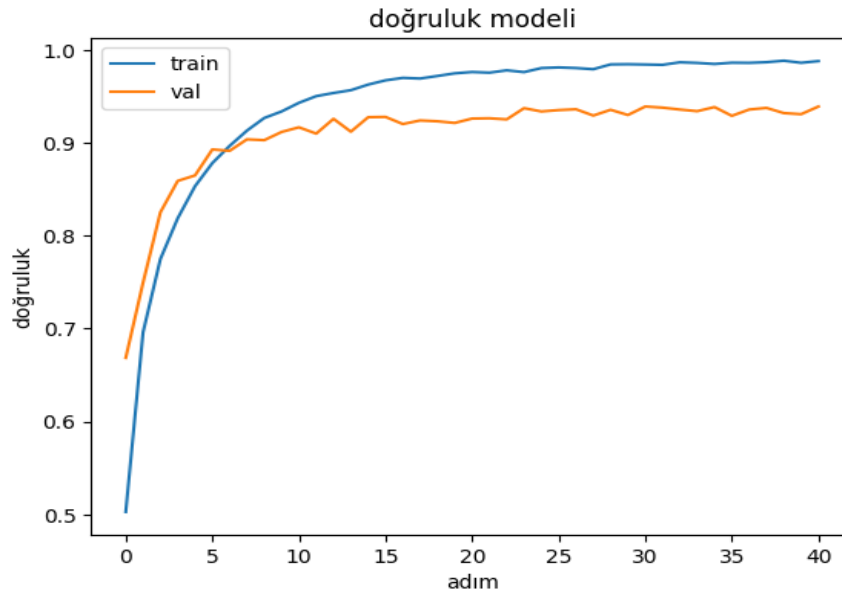
Elde edilen sonuçlara göre (Şekil 5-10, Tablo 3), önerilen CNN modeli, literatürdeki çalışmalara kıyasla daha yüksek güvenilirlik ve doğruluk metrikleri sergilemiştir. Ancak, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılırken, kullanılan veri setlerinin farklılığı ve sınıfların çeşitlilik göstermesi gibi unsurlar, karşılaştırma açısından göz ardı edilmemesi gereken önemli faktörlerdir. Bu durumlar, model performansının literatürle karşılaştırılması sırasında objektif bir şekilde değerlendirilmesi için mutlaka dikkate alınmalıdır.

Önerilen CNN mimarisinde parametre sayılarının kullanılan katmanlara göre dağılımı; 1. Seviye konvolüsyon (filtre sayısı=16) katmanı %0.74, 2. Seviye konvolüsyon (filtre sayısı=32) katmanı %7.65, 3. Seviye konvolüsyon (filtre sayısı=64) katmanı %30.49, 1. Tam bağlantı (nöron sayısı=128) katmanı %54.03, 2. Tam bağlantı (nöron sayısı=32) katmanı %6.86, 3. Tam bağlantı (nöron sayısı=4) katmanı %0.22 şeklindedir.



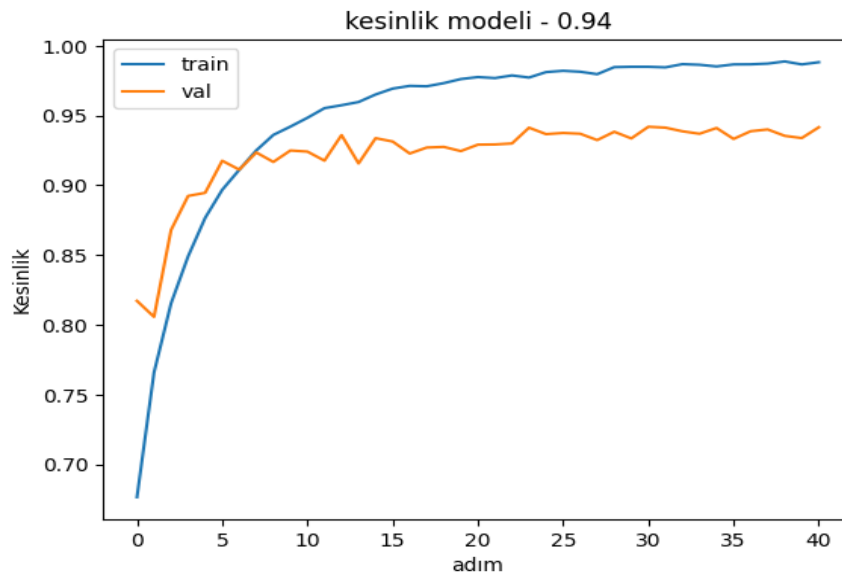
Şekil 5. Kayıp modeli

Şekil 5’de modelin eğitim ve doğrulama veri kümeleri üzerindeki kayıp değerlerinin değişimi görülmektedir. Eğitim 0. adımında hem eğitim, hem de doğrulama veri kümeleri için kaybın oldukça yüksek olduğu ve modelin başlangıçta veriyi öğrenme sürecinde olduğunu göstermektedir. 0-10 adımlar arasında hem eğitim hem de doğrulama kayıplarında hızlı bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu durum veriyi başarılı bir şekilde öğrendiğini ve daha iyi tahminler yapmaya başladığını gösterir. Yaklaşık 10. adımdan sonra, eğitim ve doğrulama kayıpları birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Bu durum, hem eğitim hem de doğrulama veri kümelerinde benzer performans gösterdiğini, dolayısıyla aşırı öğrenme (overfitting) veya yetersiz öğrenme (underfitting) olmadığını göstermektedir. Eğitim kaybı, yaklaşık 15. adımdan itibaren oldukça sabit ve düşük bir değerde kalmakta, modelin eğitim veri kümesi üzerinde optimum performansa ulaştığını göstermektedir. Doğrulama kaybı, eğitim kaybına göre biraz daha dalgalanma göstermektedir.



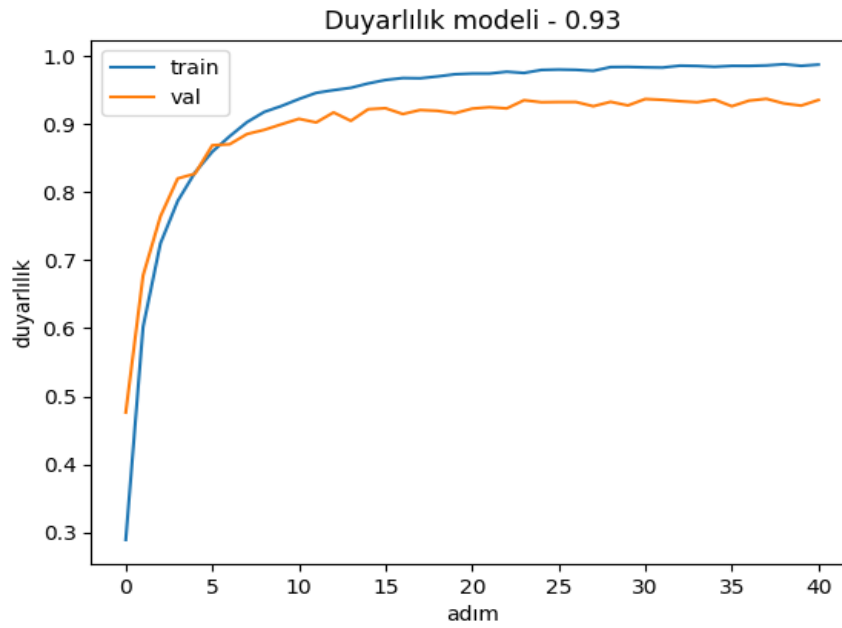
Şekil 6. Doğruluk modeli

Şekil 6'daki grafik modelin eğitim ve validasyon doğruluklarını, adımlar boyunca göstermektedir. Eğitim doğruluğu başlangıçta düşük bir değerle başlamaktadır. Sonra hızlı bir şekilde yükselmektedir. Yaklaşık 10. adımdan sonra doğruluk, %90'ın üzerine çıkmakta olup, %100 değerine çok yaklaşmaktadır. Bu durum, modelin eğitim verisi üzerinde oldukça iyi bir performans sağladığını göstermektedir. Validasyon doğruluğu da başlangıçta düşük bir değerle başlamaktadır. Sonra eğitim doğruluğuna göre biraz daha yavaş bir şekilde artmaktadır. 10. adımdan sonra doğruluğu da, %90 civarına ulaşmaktadır. Eğitim doğruluğu %95 civarında kalmakta ve modelin eğitim verisi dışında yeni veriler üzerinde de iyi performans gösterdiğini ancak eğitim verisi kadar yüksek olmadığını göstermektedir. Hem eğitim hem de validasyon doğruluklarının benzer şekilde arttığı ve birbirine yakın değerler aldığı görülmekte olup modelin aşırı uyum sağlamadığını (overfitting) göstermektedir. Bu grafik genel olarak, modelin hem eğitim verisi üzerinde hem de doğrulama verisi üzerinde yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını ve genel olarak iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.

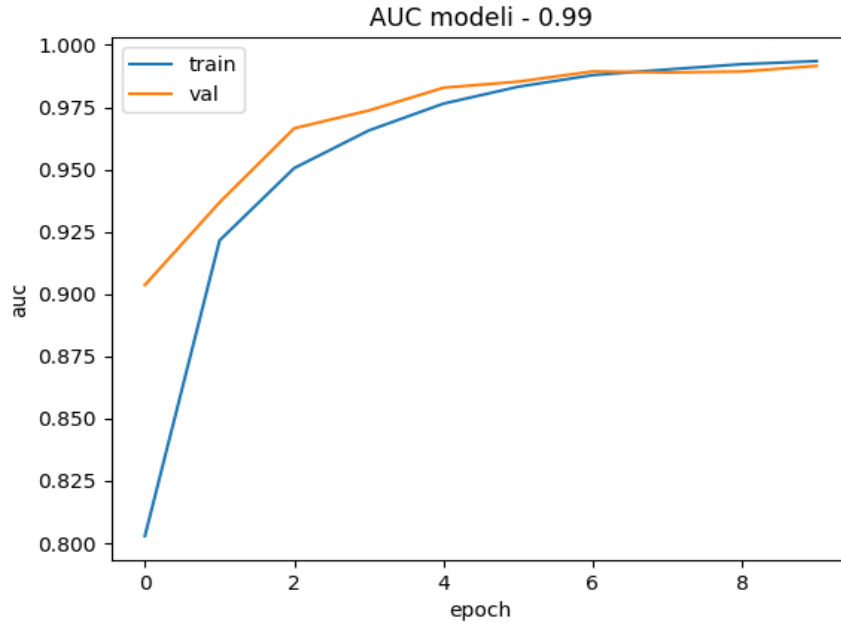


Şekil 7. Kesinlik modeli

Şekil 7’deki grafik, hem eğitim hem de validasyon kesinliği yaklaşık 0.70 seviyesinden başlamaktadır. Eğitim kesinliği, yaklaşık 20 adım (epoch) sonra 0.95 seviyesinde sabitlenene kadar istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Doğrulama kesinliği de artış göstermektedir. Fakat eğitim kesinliğine göre daha fazla dalgalanma yaşanmaktadır. Yaklaşık 15 adım sonra 0.93 seviyesine sabitlenmektedir. Şekil 7, modelin hem eğitim hem de doğrulama verilerinde yüksek kesinlik sağladığını, ancak doğrulama verilerinde eğitim verilerine göre biraz daha fazla dalgalanma olduğunu göstermektedir. Modelin performansı genel olarak iyi gözlenmekte ve doğrulama seti üzerinde de başarılı bir şekilde çalıştığı anlaşılmaktadır.

**Şekil 8.** Duyarlılık modeli

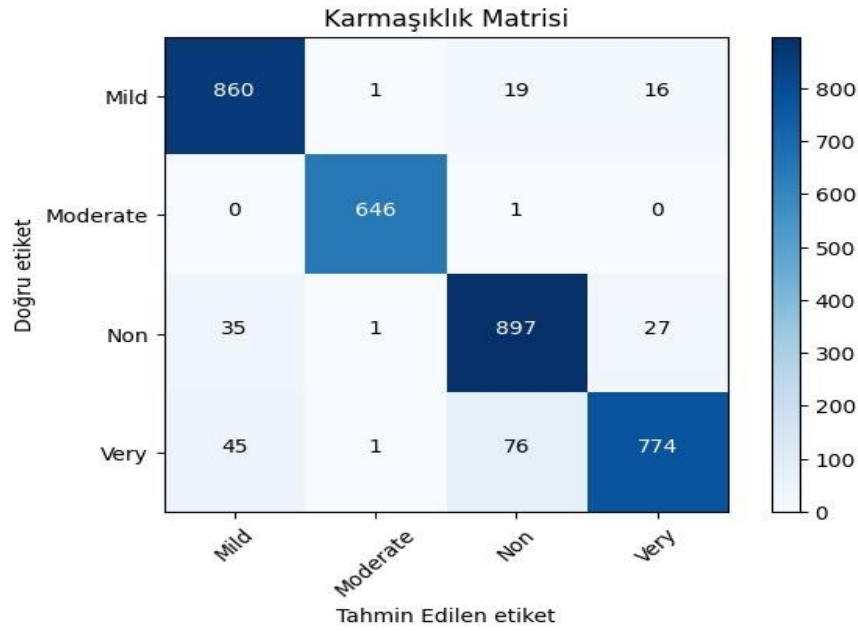
Şekil 8’deki grafik, duyarlılık modelinin eğitim ve doğrulama süreçlerindeki performansını göstermektedir. Mavi çizgi ile gösterilen eğitim sürecinde, model duyarlılığı başlangıçta hızlı bir şekilde artarak 10. adıma kadar 0.8’in üzerine çıkmaktadır. Daha sonra model duyarlılığı yavaş yavaş artmaya devam ederek, yaklaşık 35. adımdan sonra üst değerine ulaşmakta ve sonrasında stabil hale gelmektedir. Turuncu çizgi ile gösterilen doğrulama sürecinde, model duyarlılığı başlangıçta eğitim sürecine benzer bir hızla artarak yaklaşık 10. adıma kadar 0.8’in üzerine çıkmaktadır. Daha sonra model duyarlılığı stabil bir şekilde artmaya devam etmektedir. Yaklaşık 30. adımdan sonra 0.9 civarında değere ulaşmakta ve sonrasında stabil hale gelmektedir. Modelin eğitim ve doğrulama performansı oldukça iyi görünmekle birlikte, modelin genelleme yeteneğinin iyi olduğunu ve aşırı uyum yapmadığını gösterir. Modelin genel duyarlılık performansı 0.93 olarak belirtilmiş olup, yüksek bir performans anlamına gelmektedir.



Şekil 9. AUC Modeli

Şekil 9'daki grafik, AUC modelinin eğitim ve doğrulama süreçlerindeki performansını göstermektedir. Modelin hem eğitim hem de doğrulama AUC değerleri 0.99'a ulaşmaktadır. AUC değerinin 1'e yakın olması, modelin pozitif ve negatif sınıfları ayırt etme yeteneğinin son derece yüksek olduğunu ve başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu durum, modelin Alzheimer hastalığı tahmini için etkili bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Eğitim veri seti üzerindeki AUC değeri, modelin öğrenme süreci boyunca sürekli bir artış göstermiş ve yaklaşık 7. epoch itibarıyla doygunluğa ulaşmış ve modelin eğitim verilerinden etkili bir şekilde öğrenebildiğini, öğrenme sürecinin stabil hale geldiğini göstermiştir. Doğrulama AUC değeri, eğitim AUC değerine kıyasla başlangıçta daha hızlı bir artış göstermiştir. Epoch sayısı ilerledikçe eğitim ve doğrulama eğrileri birbirine yaklaşmış ve benzer bir performans sergilemiştir. Bu durum, modelin doğrulama veri seti üzerinde iyi bir genelleştirme başarısı sergilediğini ifade etmektedir. Eğitim ve doğrulama AUC eğrilerinin birbirine oldukça yakın olması, modelin aşırı öğrenme yapmadığını göstermektedir. Ayrıca, hem eğitim hem de doğrulama AUC değerlerinin yüksek olması, modelin yetersiz öğrenme problemini de yaşamadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, modelin hem eğitim hem de doğrulama verileri üzerinde dengeli bir performans sergilediğini göstermektedir.

Şekil 10'da önerilen CNN mimarisinin test veri seti için elde edilen karmaşıklık matrisi verilmiştir. Karmaşıklık matrisi, modelin gerçek ve tahmin edilen sınıflar arasındaki ilişkisini göstermektedir. Matris, modelin tahmin ettiği etiketlerle (yatay eksen) doğru etiketler (dikey eksen) arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.



Şekil 10. Confusion Matrix Değerleri

Mild (Hafif) sınıfı için; Model, 'Mild' sınıfındaki örnekleri çoğunlukla doğru tahmin etmiştir (860 doğru). Ancak, 'Non' (19) ve 'Very' (16) sınıflarına göre yanlış tahminlerde bulunmuştur. Moderate (Orta) sınıfı için; Model, 'Moderate' sınıfındaki örnekleri çok yüksek doğrulukla tahmin etmiştir (646 doğru). Yanlış tahminler oldukça azdır (her biri 1). Non (Yok) sınıfı için; Model, 'Non' sınıfındaki örnekleri de çoğunlukla doğru tahmin etmiştir (897 doğru). Ancak, 'Mild' (35) ve 'Very' (27) sınıflarına yanlış tahminlerde bulunmuştur. Very (Çok) sınıfı için; Model, 'Very' sınıfındaki örnekleri de genellikle doğru tahmin etmiştir (774 doğru). Ancak, 'Mild' (45) ve 'Non' (76) sınıflarına göre yanlış tahminlerde bulunmuştur.

Tablo 3. CNN Başarım Ölçütleri

Sınıf	Duyarlılık (%)	Özgüllük (%)	Kesinlik (%)	F1-Skoru (%)	Doğruluk (%)
Mild Demented (hafif demans)	%95.98	%96.80	%91.49	%93.68	%96.59
Moderate Demented (orta seviye demans)	%99.85	%99.89	%99.54	%99.69	%99.88
Non Demented (demans bulunmayan)	%93.44	%96.06	%90.33	%91.86	%95.32
Very Mild Demented (çok hafif seviye demans)	%86.38	%98.28	%94.74	%90.37	%95.15
Tamamı	-	-	-	-	%96.58

Çalışma kapsamında değerlendirilen tüm metriklerin sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Bu çalışmada, Alzheimer MRI görüntüleri sınıflandırılarak alzheimer hastalığının erken teşhisine katkı sağlanabileceği desteklenmektedir. Önerilen sınıflandırma modeli ile hafif demans sınıfında duyarlılık %95.98, özgüllük %96.80, kesinlik %91.49 ve F1-skoru %93.68 değerleri elde edilmiştir. Orta seviye

demans sınıfında duyarlılık %99.85, özgüllük %99.89, kesinlik %99.54 ve F1-skoru %99.69 değerleriyle en iyi sınıf performansı hesaplanmıştır. Demans bulunmayan sınıfta duyarlılık %93.44, özgüllük %96.06, kesinlik %90.33 ve F1-skoru %91.86 değerleri modelin bu sınıfta da iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Çok hafif demans sınıfında duyarlılık %86.38 ile diğer sınıflara göre bir miktar düşük kalsa da özgüllük %98.28, kesinlik %94.74 ve F1-skoru %90.37 değerleri tatmin edici bir performans sunmaktadır.

Modelin genel başarısı %96.58 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada sonuçların istatistiksel güvenilirliğini artırmak amacıyla birden fazla deney gerçekleştirilmiş ve her çalıştırma için p-değeri hesaplanmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda p-değeri 0.005'ten küçük bulunmuştur.

4.SONUÇ VE ÖNERİLER

Alzheimer hastalığını tamamen tedavi etmek mümkün olmasa da erken tanı, tedavi, sınıflandırma ile alınacak önlemler neticesinde progresyonunu yavaşlatmak mümkündür. Hastalığa yakalanma oranı yaşlı nüfus ile birlikte ülkemizde ve dünyada artarak büyük bir sorun haline gelmektedir. Alzheimer hastalığının neden olduğu nörodejenerasyon, hastaların günlük yaşam aktivitelerini sınırlar, temel hayati ihtiyaçlarını karşılamasını oldukça zorlaştırır.

Erken teşhis ve doğru bir evreleme ile alınacak gerek medikal, gerekse yaşam tarzı değişikliği önlemleri ile hastalığın ivmesini yavaşlatmak ve gelecekteki potansiyel tedavilere uygun hasta profilini analiz etmek, bu sayede mümkündür. Hastalığın daha iyi yönetilmesi, tedavi stratejilerinin geliştirilmesi için bu tür ileri analizlerin önemi giderek artmaktadır.

Bu çalışmada, Alzheimer Hastalığı MR görüntüleri kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Augmented MRI Alzheimer veri seti veri tabanından elde edilen MR görüntüleri üzerinde, özgün olarak geliştirilen CNN mimarisi ile modelleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar oldukça başarılı bulunmuştur. Toplamda 33.894 MR görüntüsü kullanılarak yapılan modelleme sürecinde, Evrimsel Sinir Ağları (CNN) kullanılarak Alzheimer hastalığının tespiti %96.58 doğruluk ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model, ileride farklı derin öğrenme mimarileri ile komite yapısının oluşturulması, veya sınıflandırma verisinin çoğaltılması ile, genelleme yeteneğini geliştirebilir.

Alzheimer hastalığının teşhisi açısından, CNN sınıflandırma çalışmalarının güçlü yönlerinin yanı sıra bazı kısıtlamaları da bulunmaktadır. Veri seti kısıtlılığı nedeniyle bazı hastalar hakkında yeterli görüntü verisi bulunamayabilir. Bu durum modelin genelleme yeteneğini sınırlar. Yetersiz veri ile yapılan modeller, eğitim verisine aşırı uyum gösterebilmekte ve bu durum; modelin yeni verilerle karşılaştığında düşük performans göstermesine neden olabilmektedir. Veri kısıtının çözümü için daha büyük ve daha çeşitli veri setlerinin toplanması gereklidir.

Beyin görüntülerinin kalitesi, farklı cihazlar ve tarama protokollerine bağlı olarak değişebilir. Bu durum modelin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Veri setlerinin kalite kontrol süreçlerinin güçlendirilmesi gerekebilir. Farklı görüntüleme cihazları ve tekniklerinin uyumluluğu sağlanmalıdır. Beyin yapılarının, bireyler arasında önemli farklılıklar göstermesi, farklı yaş, cinsiyet ve genetik faktörler, CNN modelinin bu çeşitliliği öğrenmesini zorlaştırıcı etkenlerdendir. Bu neden ile geliştirilen modelin daha farklı hasta gruplarına (yaş, cinsiyet, etnik köken gibi) genellenebilmesi için daha geniş ve çeşitli veri setleri ile eğitiminin gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu çeşitlilik ile başa çıkmak için önerilen modele transfer learning (önceden eğitilmiş modellerin kullanımı) yönteminin uygulanması önerilmektedir.

Sonuç olarak, Alzheimer hastalığının sınıflandırılmasıyla ilgili yapılan çalışmaların yöntemsel detayları, kullanılan veri setleri ve ön işlem adımları gibi faktörlerin açıkça belirtilmesi, literatürdeki çalışmaların karşılaştırılabilirliğini artıracak ve bilimsel anlamda daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Referanslar

- [1] Knopman, D. S., Amieva, H., Petersen, R. C., Ch  telat, G., Holtzman, D. M., Hyman, B. T., ... & Jones, D. T. (2021). Alzheimer disease. *Nature reviews Disease primers*, 7(1), 33.
- [2] 2024 Alzheimer's disease facts and figures. (2024). *Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association*, 20(5), 3708–3821.
- [3] Al Shehri, W. (2022). Alzheimer's disease diagnosis and classification using deep learning techniques. *PeerJ Computer Science*, 8, e1177.
- [4] Jack Jr, C. R., Bennett, D. A., Blennow, K., Carrillo, M. C., Dunn, B., Haeberlein, S. B., ... & Silverberg, N. (2018). NIA-AA research framework: toward a biological definition of Alzheimer's disease. *Alzheimer's & Dementia*, 14(4), 535-562.
- [5] Dubois, B., Villain, N., Frisoni, G. B., Rabinovici, G. D., Sabbagh, M., Cappa, S., ... & Feldman, H. H. (2021). Clinical diagnosis of Alzheimer's disease: recommendations of the International Working Group. *The Lancet Neurology*, 20(6), 484-496.
- [6] Masters, C. L., Bateman, R., Blennow, K., Rowe, C. C., Sperling, R. A., & Cummings, J. L. (2015). Alzheimer's disease. *Nature reviews disease primers*, 1(1), 1-18.
- [7] G  rvit, İ. H., Yıldırım, Z., Samancı, Bedia (2022). Demans Sendromu, Alzheimer Hastalığı ve Alzheimer Dışı Demanslar.Öge A. Emre,Baykan Bet  l,Bilgi   Ba  ar (Ed.), N  roloji. İstanbul, Nobel Tıp Kitabevi; 573-663
- [8] Tang, M. X., Jacobs, D., Stern, Y., Marder, K., Schofield, P., Gurland, B., ... & Mayeux, R. (1996). Effect of oestrogen during menopause on risk and age at onset of Alzheimer's disease. *The Lancet*, 348(9025), 429-432..
- [9] Breijyeh, Z., & Karaman, R. (2020). Comprehensive review on Alzheimer's disease: causes and treatment. *Molecules*, 25(24), 5789.
- [10] McKhann, G., Drachman, D., Folstein, M., Katzman, R., Price, D., & Stadlan, E. M. (1984). Clinical diagnosis of Alzheimer's disease: Report of the NINCDS-ADRDA Work Group* under the auspices of Department of Health and Human Services Task Force on Alzheimer's Disease. *Neurology*, 34(7), 939-939.
- [11] Varghese, T., Sheelakumari, R., James, J. S., & Mathuranath, P. (2013). A review of neuroimaging biomarkers of Alzheimer's disease. *Neurology Asia*, 18(3), 239–248.
- [12] Fukushima, K. (1980). Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. *Biological cybernetics*, 36(4), 193-202.
- [13] Payan, A., & Montana, G. (2015). Predicting Alzheimer's disease: a neuroimaging study with 3D convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:1502.02506*.
- [14] Salehi, A. W., Baglat, P., Sharma, B. B., Gupta, G., & Upadhyay, A. (2020, September). A CNN model: earlier diagnosis and classification of Alzheimer disease using MRI. *In 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)* (pp. 156-161). IEEE.
- [15] AbdulAzeem, Y., Bahgat, W. M., & Badawy, M. (2021). A CNN based framework for classification of Alzheimer's disease. *Neural Computing and Applications*, 33(16), 10415-10428.

- [16] Karabay, G. S., & Çavaş, M. (2022). Derin Öğrenme Yöntemiyle Alzheimer Hastalığının Tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(2), 879-887. Karikari, T. K., Ashton, N. J., Brinkmalm, G., Brum, W. S., Benedet, A. L., Montoliu-Gaya, L., ... & Zetterberg, H. (2022). Blood phospho-tau in Alzheimer disease: analysis, interpretation, and clinical utility. *Nature Reviews Neurology*, 18(7), 400-418.
- [17] El-Latif, A. A. A., Chelloug, S. A., Alabdulhafith, M., & Hammad, M. (2023). Accurate detection of Alzheimer's disease using lightweight deep learning model on MRI data. *Diagnostics*, 13(7), 1216.
- [18] Murugan, S., Venkatesan, C., Sumithra, M. G., Gao, X. Z., Elakkiya, B., Akila, M., & Manoharan, S. (2021). DEMNET: a deep learning model for early diagnosis of Alzheimer diseases and dementia from MR images. *Ieee Access*, 9, 90319-90329.
- [19] Bangyal, W. H., Rehman, N. U., Nawaz, A., Nisar, K., Ibrahim, A. A. A., Shakir, R., & Rawat, D. B. (2022). Constructing domain ontology for Alzheimer disease using deep learning based approach. *Electronics*, 11(12), 1890.
- [20] Balaji, P., Chaurasia, M. A., Bilfaqih, S. M., Muniasamy, A., & Alsid, L. E. G. (2023). Hybridized deep learning approach for detecting Alzheimer's disease. *Biomedicines*, 11(1), 149.
- [21] Pacal, I. (2024). Efficient lightweight vision transformer models for automated Alzheimer's disease diagnosis. In *Proceedings of the IX. Uluslararası Sağlık, Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi (Ankara, Turkey)*. (pp. 265-276).
- [22] Ozdemir, B., & Pacal, I. (2024). An Innovative Deep Learning Framework for Skin Cancer Detection Employing ConvNeXtV2 and Focal Self-Attention Mechanisms. *Results in Engineering*, 103692.
- [23] Pacal, I. (2024). Improved Vision Transformer with Lion Optimizer for Lung Diseases Detection. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(2), 760-776.

Derleme Makale

Fren Balatalarının Tasarımında Kullanılan Malzemeler ve Balata Performansı Üzerindeki Etkileri

Zülal Arca Batı^{1,*} , Noman Gündüz²  ve Yahya Hışman Çelik³ 

Gönderim: 04.03.2025

Kabul: 04.04.2025

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; zulal.arca@gmail.com.

²Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; gunduznuman@hotmail.com

³Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; yahyahisman.celik@batman.edu.tr

*Sorumlu yazar

Özet: Fren sistemi araçlar için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Araçların kontrolü ve güvenliği bu sistemler sayesinde sağlanmaktadır. Fren sistemlerinin en önemli bileşenleri fren balatalarıdır. Bir fren balatasının optimum şartlarda sürtünme performansı ve aşınma direncini karşılaması ve ekonomik olması beklenirken, insan sağlığı üzerinde toksik etkisinin de olmaması gerekmektedir. Fren balataları içeriğinde farklı birçok malzeme bulunmaktadır. Bu malzemelerden özellikle asbestin yasaklanması ve bakırın çevre üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alındığında, fren balatalarının performansı üzerine alternatif malzemeler büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada hem araç güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik olan fren balatalarının daha iyi performans sergileyen ve çevreye daha az zarar veren malzemelerle üretilmesine katkıda bulunmak amacıyla araştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: fren balatası; sürtünme malzemeleri; çevresel etkiler.

Review Article

Materials Used in the Design of Brake Pads and Their Effects on Pad Performance

Abstract: The braking system is crucial for automobiles. The control and safety of vehicles are ensured through these systems. One of the most critical components of braking systems is the brake pads. A brake pad is expected to meet the requirements of optimal friction performance, wear resistance, and cost-effectiveness while also being non-toxic to human health. Brake pads contain a variety of materials and given the ban on asbestos and the negative environmental impact of copper, alternative materials for brake pads are of great importance for their performance. This study aims to contribute to the production of brake pads with better performance and less environmental damage, which are critical for both vehicle safety and environmental sustainability.

Keywords: brake pads; friction materials; environmental effects.

1. Giriş

Fren sistemleri, aracın en önemli bileşenlerinden biridir ve kullanım süreci boyunca sabit performans sunarak yüksek güvenilirlik sağlamalıdır. Uygun şekilde eşleştirilmiş sürtünme çifti, bir disk ve fren balatası, aracın belirli bir süre içinde durdurulması veya yavaşlatılmasını sağlamak amacıyla işlev gördüğü için insan sağlığı ve hayatı için temel bir rol oynamaktadır [1]. Bu işlev, iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır. Fren balataları önemli miktarda ısıya maruz kaldığı için, günümüzde, ısyı daha hızlı dağıtarak fren solmasına katkı sağlayan disk frenler kullanılmaktadır [2-3]. Çoğu durumda, disk gri dökme demirden üretilir. Çünkü gri dökme demir, yeterli mekanik mukavemet, tatmin edici aşınma direnci, iyi termal iletkenlik ve titreşim önleme kapasitesi, düşük maliyet ve kolay işlenebilme özellikleriyle karakterize edilir. Ancak fren balataları çok daha karmaşık bileşenlerden üretilmektedir [4].

Fren balataları, disk fren rotorunun yüzeyine temas eden sürtünme malzemelerini içeren en kritik araç elemanlarıdır. Temel işlevi, hareket halindeki aracın hızını düşürmek veya aracı tamamen durdurmaaktır. Bu nedenle, fren balataları güvenilir olmalı ve ömrü boyunca değişen atmosferik koşullarda dahi sabit bir verimlilik sağlamalıdır. Fren balatalarının güvenilirliği yalnızca araç yolcularının güvenliği açısından değil, aynı zamanda yoldaki diğer araçlar ve yayalar için de kritik önem taşımaktadır [1]. Fren balatası diske temas ettiğinde, sürtünme yoluyla, fren balataları aracın kinetik enerjisini ısı enerjisiye dönüştürmektedir. Frenleme sırasında, yüzey pürüzlerindeki flaş sıcaklığı 1 ms içinde 1100°C'ye kadar yüksek değerlere ulaşabilir ve bu durum lokalize organik faz ayrışmasına neden olabilir [5]. Sürtünme etkileşimi, sadece enerji salınımına neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda malzeme aşınmasına da yol açarak fren bileşenlerinin ısınmasına ve aşınma parçacıklarının salınmasına neden olur. Bu nedenle, fren balatalarının aşınması, fren performansını azaltarak balataların değiştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır [2]. Ancak fren balatalarında aşınma, değişken çalışma basınçları, hızlar, çevresel koşullar, sürüş koşulları, fren balatası formülasyonu, üretim parametreleri ve rotor ile sürtünme malzemesi arasındaki arayüzde biriken sürtünme filmi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak sürekli bir değişim göstermektedir [3,6]. Bu yüzden fren balatalarının yüksek sıcaklıklarda etkili performans sağlamak üzere olağanüstü tribolojik özelliklere (kontrollü bir sürtünme katsayısına, minimum aşınma oranına ve iyi bir termal iletkenliğe) sahip olması beklenir [7].

Fren balatası geliştirilirken, başlangıçta asbest, dayanıklılığı, ısıya ve alevlere karşı direnci gibi özelliklerinden dolayı baskın malzeme olarak kullanılmış ve kullanımı bir yüzyıl kadar sürmüştür. Sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle (kanserojen olarak tanımlanması) 1980'lerden bu yana fren balatası üretiminde kullanılması yasaklanmıştır. Bu durum asbest malzemesi yerine kullanılabilecek alternatiflerin aranmasına yol açmıştır. Asbestin yasaklanmasının ardından çeşitli metalik ve yarı metalik malzemeler devreye girmiştir [2-3].

Fren balata formülasyonlarında bakır veya pirinç makro-parçacıkları veya her ikisinin bir kombinasyonu bulunur [8]. Çünkü bakır ve pirinç, sürtünme malzemelerinin performans özelliklerini artıran kendine özgü özelliklere sahiptir. Özellikle bakır, balatada termal solmayı önlemesi ve ısı iletkenliği artırması nedeniyle bir sürtünme düzenleyici olarak işlev görmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı bir özellik gösteren bakır, temas alanlarında homojen bir sürtünme tabakası oluşturarak gürültü ve titreşimi azaltır ve sürtünme katsayısının stabilizasyonuna katkı sağlar [9-10]. Bakır, fren performansına çok yönlü katkılar sağlasa da en ciddi dezavantajlarından biri, su ekosistemine verdiği zarardır. Yüksek toksisite oranı, birçok sucul türün yok olmasına ve ekosistem üzerinde ciddi tahribata yol açmaktadır. Bu olumsuz etkiler nedeniyle, gelişmiş ülkelerde fren malzemesi formülasyonlarında bakır kullanımı önemli ölçüde azaltılmıştır [11]. Bu bağlamda, ABD Çevre Koruma Ajansı ve otomotiv endüstrisi, motorlu taşıt fren balatalarındaki bakır oranını azaltmak için bir anlaşma imzalamıştır. Kaliforniya ve Washington eyaletleri bu konuda öncülük ederek, fren balatalarındaki bakır içeriğini azaltmaya yönelik yasalar çıkarmıştır. Bu yasal düzenlemelerin amacı, fren balatalarındaki bakır oranını 2025 yılı itibarıyla %0,5'e (bakır içermeyen fren balatası) düşürmektir [12].

Fren balatalarında hem asbestin yasaklanması hem de bakır kullanımının azaltılmasına yönelik çabalara ilaveten yeni teknolojik gelişmeler, son yıllarda, fren balatası matrisine genellikle mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini artırmak için farklı lif türü eklenmesine ve bunların tribolojik ve

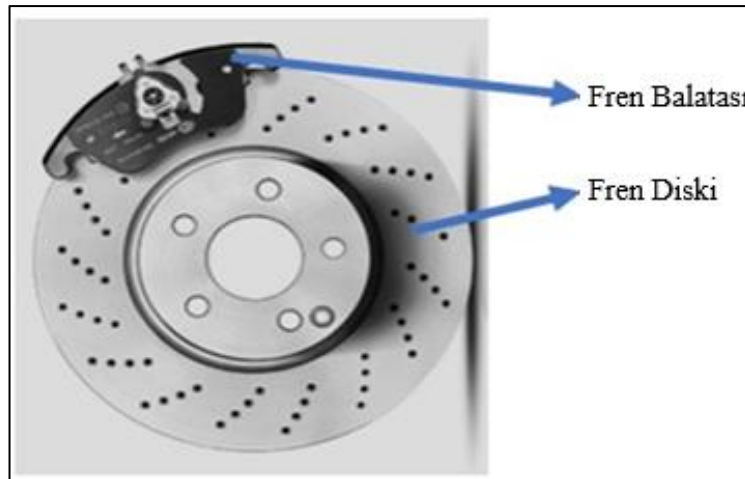
mekanik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına yol açmıştır [13]. Günümüzdeki fren balataları (asbestsiz organik—NAO), frenlerin gerektirdiği özellikleri sağlamak amacıyla, tek bir element veya bileşikten oluşmak yerine, birçok malzemenin bileşenlerinden oluşmaktadır. Fren bileşenlerinde 2000’den fazla farklı malzeme ve bunların varyantları kullanılmaktadır [14]. Bu bileşenlerin performans özellikleri üzerindeki etkileri çoğunlukla sinerjik bir biçimde gerçekleştiğinden, sürtünme malzemelerinin formülasyonu genellikle deneysel gözlemlere, deneme-yanılmaya veya tecrübeye bağlı olarak değerlendirilmektedir [6,15,3].

Balatada kullanılan bir bileşen, balatanın herhangi bir diğer bileşeniyle reaksiyona girmemelidir. Çünkü bu, genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir. Bu da fren sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlayabilir. Bağlayıcı genellikle epoksi veya silikon reçineden yapılır. Takviye malzemesi, bağlayıcının mekanik özelliklerini güçlendiren lifli bir yapıya sahiptir. Farklı takviye türleri, fren balatalarının dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde önemli bir etki gösterdiğinden, uygun takviye seçimi dikkatle yapılmalıdır. Geçmişte asbest, üstün takviye özellikleriyle yaygın olarak kullanılmışsa da sağlık üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle güvenli alternatifler geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Günümüzde, bu amaçla başarıyla kullanılacak çok çeşitli takviye malzemeleri bulunmaktadır. Bu malzemeler, fren balatalarının performansını artırmaya yönelik olarak güvenli ve etkili seçenekler sunmaktadır [1].

Farklı kökenli birçok malzeme, fren balatası uygulaması için dolgu maddesi veya sürtünme düzenleyici olarak test edilmiştir, bu da fren sürtünme malzemelerinin seçiminin hala açık bir araştırma konusu olduğunu ortaya koymaktadır [5].

2. Fren Sistemi ve Nominal Temas Koşulları

Fren sistemi, otomobil ve endüstriyel makinelerin güvenliği ve performansı açısından kritik bir bileşen olup, hareket eden mekanizmanın belirli bir süre içinde durdurulması veya yavaşlatılmasını sağlamak amacıyla işlev görmektedir. Bu işlev, iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır [2]. Sürtünme frenlerinin iki farklı türü bulunmaktadır. Bunlar tambur frenler ve disk frenlerdir. Tambur frenlerine kıyasla, günümüzde çoğu araçlarda disk fren sistemleri tercih edilmektedir. Bunun nedeni, disk frenlerin ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtarak fren solmasını azaltma yeteneğidir [3]. Şekil 1’de disk freninin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1. Disk freninin şeması [16]

Şekil 1’de şematik görüntüsü verilen disk frenler, kullanım süreci boyunca sabit performans sunarak yüksek güvenilirlik sağlamalıdır. Değişen atmosferik koşullarda dahi sabit bir verimlilik sunmalıdır. Bu

yüzden korozyona dayanıklı, hafiflik, uzun ömürlü, düşük gürültülü, kararlı sürtünme, düşük aşınma oranı ve performansa göre kabul edilebilir maliyet gibi ek gereksinimleri bulunmalıdır.

Çoğu durumda fren sistemlerinde kullanılan disk, gri dökme demirden üretilir. Çünkü gri dökme demir, iyi termal iletkenlik ve titreşim önleme kapasitesiyle karakterize edilir. Ancak fren balataları çok daha karmaşık bileşenlerden üretilebilmektedir. Bunun ana nedeni yeni teknolojik gelişmelerin çeşitli bileşimlere ve farklı oranlara sahip malzemelerin geliştirilmesini ve bunların tamamen kontrol edilebilir işlemlerde kalıcı olarak birbirine bağlanmasını mümkün kılmasıdır.

Fren balatası diske temas ettiğinde, kinetik enerjiyi ısıya dönüştür. Bu süreçte açığa çıkan ısı enerjisi atmosfere yayılır. Bu ısı transferi kritik bir öneme sahiptir; zira aşırı ısınma, süspansiyon elemanları gibi plastik veya kauçuk bazlı bileşenlere zarar verebilir [1].

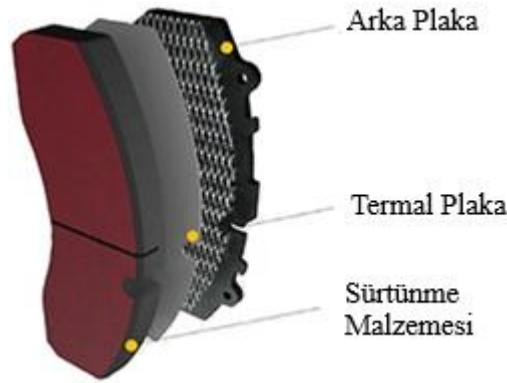
Nominal temas koşullarını anlatırken, tipik bir araç disk fren sistemi olarak Volvo 850 veya S70'in ön fren sistemi örnek alınabilir. Bu model, 280 mm çapında gri dökme demir bir disk ve tek pistonlu bir kaliperle donatılmıştır. Fren sisteminde, yaklaşık 4000 mm² büyüklüğünde organik fren balataları kullanılmakta ve diske uygulanan kuvvet 25 kN'a kadar çıkabilmektedir. Bu kuvvet, 100 barlık bir fren hattı basıncına denk gelmektedir. Ancak, günlük sürüş koşullarında, bu sıkıştırma kuvveti nadiren 10 kN'u aşar [4].

Otomotiv fren sistemlerinde sürtünmeden kaynaklanan ısı enerjisi de büyük önem taşır. Normal bir aile arabasında sert fren yapıldığında, her bir ön fren balatasında 80 kW'ı aşkın güç açığa çıkabilir. Yapılan incelemelerde, balatalar ile disk arasında oluşan gerçek temas alanının, nominal temas alanının yalnızca %20'sine karşılık geldiği ve deforme olmuş yüzey tabakasının kalınlığının 0.1 mm olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, toplam deforme olmuş hacim 1 mm³'ten azdır ve bu bölgedeki güç yoğunluğu yaklaşık 80 TW m⁻³'tür. Bu oran, 1 dm³ hacminde yaklaşık 80 nükleer reaktörün ürettiği güç eşdeğeridir [4].

Amerika ve Avrupa'da fren tercihleri farklılık gösterir. Avrupalı sürücüler yüksek konfor arayan Amerikalıların aksine, genellikle yüksek performanslı frenleri tercih ederler. Bu durum, iki kıta arasındaki balata malzemesi seçimlerinde de kendini göstermektedir. ABD'de kullanılan araç fren sistemlerinde ortalama sürtünme katsayısı genelde 0,4 civarında iken, Avrupa araçlarında bu katsayı 0,5'in üzerinde olur [4].

3. Fren Balataları

Fren balataları, belirli katmanlardan oluşur. En önemli bileşeni, Şekil 2'de görülen frenleme sırasındaki aktif olan sürtünme katmanıdır. Bu katman, 6 ila 9 mm kalınlığında olup bileşimi farklı uygulamalara göre optimize edilmektedir. Sürtünme katmanının hemen altında, sürtünme malzemesini yapısal olarak destekleyen ve onu arka plakaya bağlayan 1–4 mm kalınlığında bir alt katman bulunur. Alt katman (termal plaka), ayrıca fren balatasının arka plakaya daha iyi yapışmasını sağlayan ince bir yapışma tabakasıyla desteklenir. Bu tabaka, aynı zamanda belirli bir termal yalıtım sağlamakta olup, aşırı ısının fren sıvısına ulaşmasını önler. Fren balatasının en alt kısmında bulunan arka plaka, fren balatasının yeterli sertlikte olmasını sağlar ve kenar profili ile kaliperin kılavuzu boyunca düzgün hareket etmesine katkıda bulunur. Bu yapı, fren balatalarının verimlilik, ısı dayanımı ve ses kontrolü gibi çok boyutlu işlevlerini yerine getirmesine olanak tanır [1].



Şekil 2. Önemli fren balatası bileşenleri [17]

Fren balataları önemli miktarda ısıya maruz kaldığı için, yüksek sıcaklıklarda etkili performans sağlamak üzere olağanüstü tribolojik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Sistemin sürtünme katsayısı ve aşınma özellikleri, balata-diskin temas alanındaki sürtünme tabakasının özelliklerine bağlıdır; bu durum, kullanılan malzemelerin yapısı ve işlevselliğinden etkilenir [2].

3.1. Fren balatalarının tarihsel gelişimi

Tarihsel süreç boyunca frenlerin birçok malzemeden üretildiği görülmüştür. Başlangıçta at arabalarının frenleri ahşap ve deriden yapılmıştır. Aslında, günümüzde birçok fren malzemesi hala polimerler ve bitki lifleri gibi organik bazlı malzemeler içermektedir. 1800'lerdeki yeni demiryolu teknolojisi, fren malzemelerinin yüksek yükler ve hızlar altında performans göstermesini gerektirmiş ve 1870'lerde demir fren ayakkabılarıyla sürtünme deneyleri gerçekleştirilmiştir [14].

Nicholson'a göre, ilk fren balatası malzemelerinin icadı Herbert Frood'a atfedilmektedir ve bu malzeme 1897 yılında geliştirilmiştir. Frood'un icat ettiği bu malzeme, pamuk bazlı olup bitüm çözeltisi ile emdirilmiştir. Hem vagon tekerleklerinde hem de erken otomobillerde kullanılmıştır. Bu icat, günümüzde de fren malzemeleri tedarik eden Ferodo Şirketi'nin kuruluşuna yol açmıştır. İlk fren balatası malzemeleri dokuma şeklindeydi, ancak 1920'lerde bunlar, bol miktarda bulunan krizotil asbest lifleri içeren kalıplı malzemelerle değiştirilmiştir. 1950'lerde reçine ile bağlanmış metalik balatalar tanıtılmış ve 1960'larda ise "yarı metal" olarak adlandırılan malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler, daha yüksek miktarda metal katkı maddesi içermektedir. Nicholson'ın (1995) çalışmasında yer alan Tablo 1'de bazı yaygın fren malzemelerini listelemektedir [14].

Tablo 1. Otomotiv sürtünmeli fren malzemelerinin tarihsel bileşimleri [14]

Malzeme Tanımı	Uygulama(lar)	Yaklaşık Yıl
Çelik üzerine dökme demir	Demiryolu vagonu fren blokları ve lastikler	1870'lerden önce
Saç veya pamuk kayışı (yaklaşık 300 °F'de yanma ile sınırlı)	Arazi tekerlekleri ve erken otomobiller	1897 civarı
Güç ve performansı artırmak için pirinç ve diğer tellerle dokuma asbest	Otomobiller ve kamyonlar	1908 civarı

Kısa krizotil lifleri, pirinç parçacıkları ve düşük kül içeren bitümlü kömür ile yapılan kalıplı astarlar	Endüstriyel uygulamalar	1926 civarı
Metal toz üreterek elektrikli tren raylarını kısa devre yapan dökme demir fren bloklarını değiştirmek için kuru karışım kalıplı malzeme	Londra yer altı demiryolu	1930 civarı
Daha karmaşık fren tamburu astar formülasyonları ile geliştirilen esnek reçine bağlayıcıları	Otomotiv uygulamaları	1930'lar
Reçine bağlı metalik fren astarları	Endüstriyel ve hava aracı uygulamaları	1950'ler
Cam, mineral, metal, karbon ve sentetik lifler	Otomobiller ve kamyonlar	1960'lar
Asbest içermeyen malzemeler	Orijinal ekipmandaki fren tamburları	1980'ler
Karbon liflerinin kullanımı	Otomotiv frenleri	1991

Tablo 1’de görüldüğü gibi 1900’lü yılların başlarında asbest fren balatalarında kullanılan temel malzeme olmuşken, akciğer kanserine ve diğer sağlık sorunlarına neden olduğu için 1980’lerde yasaklanmıştır. Bu nedenle, asbest yerine fiber cam ve karbon lifleri içeren asbest dışı içerikli balataların üretimine başlanmıştır [15]. Son yıllarda, teknolojik gelişmelerle birlikte fren balatası matrisine genellikle mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini artırmak için farklı lif türü eklenmesine ve bunların tribolojik ve mekanik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına yol açmıştır [13].

3.2. Fren balatalarından beklenen özellikler

Balata malzemelerinin gerekli özelliklerinin belirlenebilmesi için çalışma koşullarının iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Özellikle balata yüzeyine etki eden basınç, aracın hızı ve sürtünme kaynaklı sıcaklık artışlarında oldukça önemlidir. Bu yüzden balata testlerinde basınç, hız ve sıcaklık gibi değişkenlerin birbiriyle etkileşimi dikkate alınmalıdır. Çünkü bu değişkenler balata ömrünü belirleyen temel faktörlerdir. Ancak balatalar sürekli değişen basınç ve sıcaklık koşullarında çalıştıkları için, aşınma ve sürtünme davranışları oldukça karmaşıktır. Temas eden yüzeyler 1 m s^{-1} hızında 1000°C ila 1100°C ’ye kadar ısınabilir ve diğer yüzeyler gibi ısıyı emerek soğutulurlar. Bu karmaşık termoelastik davranıştan kaçınmak için yüksek performanslı, anizotropik balata malzemeleri geliştirilmektedir [18].

Balataların tüm frenleme koşullarında sabit bir sürtünme katsayısına sahip olması beklenir. Ancak uygulamada, hız ve basıncın artması ile sıcaklık yükselmesi sürtünme katsayısında azalmaya neden olabilir. Araçların farklı hızlarda fren yaparken kullanıldığı koşullar ve iklim şartları, fren kuvvetini olumsuz etkilememelidir. Balata malzemeleri, zorlu koşullardan etkilenmeyecek özelliklere sahip olmalıdır [18].

Bu doğrultuda, balatalardan beklenen özellikler;

1. Tüm çalışma koşullarında sabit sürtünme performansı,
2. Sürtünme katsayısının sıcaklık, basınç ve hızdan bağımsız ya da çok az değişken olması,
3. Yüksek sıcaklık direnci,

4. Yüksek ısı iletkenliği,
5. İyi korozyon direnci,
6. Yüksek mekanik mukavemet,
7. Düşük gürültü seviyesi,
8. Hava koşullarından etkilenmeme,
9. Sağlığa zararsız malzeme,
10. Yüksek aşınma direnci ve karşı malzemede düşük aşınmadır [18].

3.3. Fren balatalarının sınıflandırılması

Fren balatalarının sınıflandırılması, TS 555'te tanımlanan sürtünme katsayısı değerleri temel alınarak yapılmaktadır. Bu standart, farklı sürtünme malzemelerinin performanslarını belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla sürtünme katsayısı kriterlerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Fren balataları, bu katsayı değerlerine göre farklı kategorilere ayrılır ve her kategori belirli performans ve kullanım alanlarına yönelik tanımlamalar içerir. Tablo 2'de, TS 555 standardında belirtilen sürtünme katsayısı aralıklarına göre fren balatalarının kategorileri detaylı bir şekilde sunulmuştur [19].

Tablo 2. TS 555'e göre sürtünme katsayısına bağlı balataların sınıflandırılması

Sınıf	Sürtünme Katsayısı
C	0.15'e kadar
D	0.15-0.25
E	0.25-0.35
F	0.35-0.45
G	0.45-0.55
H	0.55'ten yukarı

Bu sınıflandırma, balataların kullanım ömrü, aşınma direnci ve frenleme performansı gibi önemli parametrelerin değerlendirilmesine olanak sağlar ve endüstride balata seçimi ve uygulama sürecine rehberlik eder.

Endüstride kullanılan balatalar, içerdiği malzemelerin benzerliklerine göre de sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmaya göre balatalar üç ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar; organik balatalar, metalik balatalar ve karbon esaslı balatalardır [19].

Organik polimer esaslı fren balataları, fren ve kavrama sistemlerinde en yaygın kullanılan sürtünme malzemeleridir. Çeşitli bileşimlerde üretilen bu balataların formülasyonları genellikle patent koruması altındadır. Organik polimer esaslı balatalar, bağlayıcılar, dolgu maddeleri, sürtünme düzenleyiciler ve takviye edici malzemelerden oluşmaktadır. Bu balatalar, asbest esaslı ve asbestsiz olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır [20].

Metalik esaslı fren balataları genellikle bakır veya demir esaslı malzemelerden üretilmekte olup, yüksek ısıl kararlılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Performansı artırmak amacıyla bu

balatalara, genellikle inorganik katkı maddeleri veya seramikler ilave edilerek katı faz sinterleme yöntemi uygulanır. Üretim süreçleri nispeten kolay ve ekonomiktir [20].

Karbon esaslı malzemeler ise ağırlığın önemli olduğu ve yüksek performans gereksinimi duyulan, maliyetin ise ikincil öneme sahip olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Hacimce yaklaşık %63 oranında karbon-karbon bileşiminde olan bu kompozitler, genellikle uçak fren sistemlerinde kullanılmaktadır. Karbon bazlı sürtünme malzemeleri, karbon elyafların amorf karbonla bağlanmasıyla elde edilir. Bu bağlama sürecinde organik reçineler yüksek sıcaklıklarda ısıtılma işleminden geçirilerek amorf karbon bağlayıcı oluşturulur ya da kimyasal buhar çöktürme yöntemi kullanılır. Hafif yapıları, yüksek ısıl kararlılıkları ve uygun özgül ısı özellikleri sayesinde bu malzemeler fren uygulamalarında üstün performans sergiler [20].

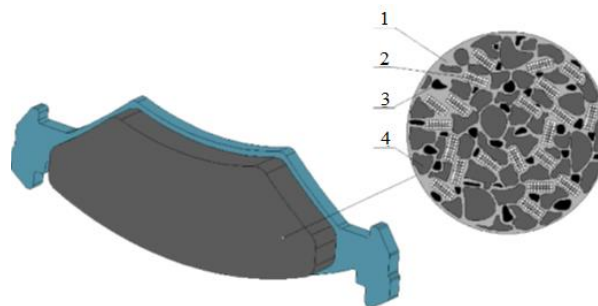
3.4. Balata yapımında kullanılan malzemeler ve işlevleri

Fren balatası üreticileri, nihai ürün üzerinde farklı etkilere sahip yaklaşık 2000 farklı malzeme kullanır. Ortalama bir fren balatası 10 ila 20 farklı makro veya mikro bileşenden oluşur. Fren balatası için doğru bileşimi seçmek ve nihai ürünler üzerindeki etkisini tahmin etmek zordur. Çok sayıda deneysel çalışma ve oldukça fazla deneyim gerektirir. Fren balatasının nihai özellikleri, genellikle her üreticinin en iyi saklanan ticari sırrı olan üretim teknolojisi tarafından da şekillendirilir. Etkili üretim teknolojisi, fren balatasının tribolojik özelliklerini %100 oranında iyileştirebilir [1,8].

Balata kompozisyonlarında kullanılan malzemeler, genellikle birçok farklı bileşen içeren kaba tozların sıcak sıkıştırılmasıyla oluşturulan kompozitlerdir. Bileşenlerin mekanik özellikleri, çok yumuşak ve kolay aşınan fenolik reçinelerden sert ve aşınmaya dayanıklı liflere ve aşındırıcı parçacıklara kadar geniş bir yelpazeye yayılır. Ancak görevleri bakımından dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Bağlayıcı malzemeler,
2. Takviye malzemeleri,
3. Dolgu malzemeleri,
4. Sürtünme ayarlayıcı malzemelerdir [4,21].

Ancak bu sınıflandırmada bazı belirsizlikler vardır. Bazı katkı maddeleri birden fazla işlevi yerine getirdikleri için birden fazla gruba dahil edilebilirler [14]. Şekil 3'te fren balata malzemesinin yapısı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3. Fren balatası yapısında kullanılan malzemeler: 1. bağlayıcı, 2. takviye, 3. dolgu, 4.sürtünme ayarlayıcı [1]

Balatada kullanılan herhangi bir malzeme, balatanın herhangi bir diğer bileşeniyle reaksiyona girmemelidir, çünkü bu, genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir ve fren sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlayabilir [1].

3.4.1. Bağlayıcı malzemeler

Bağlayıcılar, bileşenlerini bir arada tutmak ve kararlı bir matris yapısı oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu maddeler genellikle polimer bazlıdır ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri sınırlıdır. Fren malzemesinin içinde kullanım oranı en zor tahmin edilebilen bileşenler olarak kabul edilirler. Yetersiz reçine kullanımı, fren balatasının dayanıklılığını azaltırken, aşırı reçine kullanımı ise yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını düşürebilir ve sertliği önemli ölçüde artırabilir. Yaygın olarak kullanılan bağlayıcı reçineler arasında novolak fenolik reçineler, epoksi reçineler ve polyester reçineler yer almaktadır [21,22]. Bazı bağlayıcılara ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bağlayıcı malzemeler [22]

Bağlayıcı	Avantajları	Dezavantajları
Fenolik reçine	Ucuz ve üretimi kolay	Kırılgan, düşük darbe direnci, son derece toksik, nispeten düşük sıcaklıklarda (450°C) ayrışır.
COPNA reçinesi	Grafitle (yaygın bir yağlayıcı) yüksek bağlanma mukavemeti; bu nedenle saf fenolik reçineden daha iyi aşınma direncine sahiptir.	Nispeten düşük sıcaklıklarda (450 ve 500°C) ayrışır.
Silikon modifiyeli fenolik reçine	Saf fenolik reçineden daha iyi darbe direnci; saf fenolik reçineden daha iyi ısı ve kimyasal direnci; geliştirilmiş su iticilik.	Fenolik reçine tabanlı olması, oldukça toksik olmasına sebep olur.
Epoksi modifiyeli fenolik reçine	Saf fenolik reçineden daha iyi ısı direnci.	Fenolik ve oldukça toksiktir.
Termoplastik poliimid reçinesi	Aşınmaya dayanıklı; termal solma göstermez.	Isı iletkenliği fenolik reçineden üç kat daha düşüktür.

Frenleme sırasında aşırı ısı oluştuğundan dolayı, fren balatasının malzeme kalitesi bozulabilir. Bu durum, reçinenin bozulmasıyla ilişkilidir ve sonuç olarak malzemenin bağlayıcı özelliklerini kaybetmesine neden olur. Bu nedenle, fren balatasının termal stabilitesi, mekanik özelliklerini koruma kapasitesi ve olumsuz frenleme koşullarında bileşenleri bağlama yeteneği büyük ölçüde reçineye bağlıdır [1].

Fenol reçineler, genellikle sürtünme malzemeleri üretimi için neredeyse yalnızca kullanılan düşük maliyetli, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve iyi mekanik özelliklere sahip bağlayıcı malzemelerdir. Diğer reçinelerle karşılaştırıldığında, çözücülere, asitlere ve suya daha dayanıklıdır ve yanma sırasında daha az duman üretir. Önemli bir özellik olarak, ilk bozulma sıcaklığı, fren balatası solması ile ilgili bir fenomen ile korelasyon nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Bu sıcaklık saf reçinelerde 354 °C'den, kurlenmiş sürtünme malzemesinde 303 °C'ye düşmektedir. Fenol reçinesi, yüksek sıcaklık sürtünmesi için en uygun malzeme değildir. Ani frenleme durumlarında, fren balatasının sıcaklığı kolaylıkla 700 °C'ye ulaşabilir ve bu, fenol reçinesinin bozulma sıcaklığını önemli ölçüde aşmaktadır [1].

Bir fren balatasındaki fenol reçinesi oranı hacim açısından %5 ile %35 arasında değişmektedir. Bu içeriğin miktarı, sürtünme katsayısı değeri ve aşınma oranı üzerinde ters etkiye sahiptir. Reçine içeriğindeki %10'luk bir düşüş, sürtünme katsayısında yalnızca birkaç yüzdelik değişime neden olur. Bashir vd. (2021), özel olarak tasarlanmış bir disk fren test düzeneğinde muz lifi ve fenolik reçineyi modifiye bağlayıcı olarak kullanarak fren balatası üretmişler ve ürettikleri fren balatasının termal kararlılığını ve sürtünme performansını analiz etmişlerdir. Balata malzemesine muz lifi eklenmesinin fren sürtünme malzemesindeki bağlayıcıların termal kararlılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu ve bu durumun, alternatif bağlayıcılar açısından umut verici bir yaklaşım sunduğunun ifade etmişlerdir [23].

Epoksi reçineler, mükemmel yapışma ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahip bağlayıcılardır. Genellikle yüksek performanslı kompozitlerde tercih edilir.

Polyester reçineler, uygun maliyetli olup, birçok uygulamada kullanılabilir, ancak genellikle epoksi kadar dayanıklı değildir.

Fenol ve formaldehit, genellikle kalıp pudrası formunda kullanılır ve yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Moleküler yapıları, sürekli bir kafes yapısına sahip olmalarını sağlar, bu da moleküller arasında kayma olasılığını ortadan kaldırır ve şekil değiştirmeyi sıcaklık artışına karşı dirençli hale getirir. Ayrıca, doğal veya sentetik kauçuk da bağlayıcı olarak kullanılabilir, bu da malzemenin elastikiyetini ve genel performansını artırır [21]. Pujari ve Srikan (2019), alüminyum oksit (%5-%20) ve grafit tozu (%10-%35) gibi katkı maddeleri ile palmye çekirdeği (%0-%50), Nil gülü (%0-%15) ve buğday (%0-%10) gibi doğal liflerin çeşitli kombinasyonlarını %35 fenolik reçine bağlayıcı ile birleştirerek beş farklı fren balatası üretmişlerdir. Bu fren balatalarının tribolojik özelliklerini incelemişler ve asbestli fren balatalarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, sürtünme katsayısını artırmak için parçacıklı Nil gülü, aşınma oranını azaltmak için ise buğday tozu kullanıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, alüminyum oksit ve grafitin aşındırıcı özellikte olması sayesinde düşük gürültü seviyesine, yüksek sürtünme katsayısına ve düşük aşınma oranına sahip fren balataları üretimine katkı sağladığını ifade etmişlerdir. %30 lif oranına %5 buğday eklenmesiyle fren balatalarında daha iyi aşınma özellikleri elde edildiğini, kompozitlerde maksimum sertlik değerine ise %10 buğday, %15 Nil gülü ve %25 palmye çekirdeği oranlarında ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, test edilen doğal liflerin sürtünme kompozitlerini güçlendirmede asbestin yerine geçebileceği sonucuna varmışlardır [24].

3.4.2. Takviye malzemeleri

Takviye malzemeleri, mekanik mukavemet sağlayan bileşenlerdir. Fren balatalarının dayanımını artırmak ve rijitliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Matris içinde homojen bir şekilde dağılan bu malzemeler, balataların performansını iyileştirmektedir. Alternatif takviye malzemeleri arasında metal, karbon, cam ve Kevlar lifleri öne çıkmaktadır. Kevlar, yüksek dayanıklılık özellikleri ile fren balatalarının performansını iyileştirmekte etkili bir malzemedir. Cam elyafı, özel işlemlerle üretilmekte ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı ile bilinmektedir. Çelik fiber ise, iyi ısı ve sürtünme kararlılığına sahip olup, kolay temin edilebilirliği ile avantaj sağlamaktadır [4,21,13]. Takviye malzemeleri ve tanımlarına ait bazı bilgiler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. *Takviye malzemeleri ve tanımları [14,22]*

Malzeme	Tanım/Yorum
Asbest	İlk fren malzemelerinde en yaygın dolgu malzemesidir.
Pamuk Takviye Lifleri	Matris için kullanılır.
Karışık Oksit Takviye Lifleri	Temel cüruflardan üretilir.
Aramid Lifleri	Yumuşaktır, diğer lifler olmadan kullanılamazlar. İyi sertlik-ağırlık oranı, mükemmel termal esneklik ve iyi aşınma direnci sergilerler
Cam Lifleri	Kırılığandır. Yeterli termal dayanıklılık sergilerler.
Metalik Lifler	Isıya dayanıklıdır. Ancak aşırı rotor aşınmasına neden olabilirler.
Mineral Yün	Silika (%40-50 ağırlık), alümina (%5-15 ağırlık), kalsiyum (%34-42 ağırlık), magnezyum (%3-10 ağırlık) ve diğer inorganik bileşenleri içerebilir (%0-7 ağırlık); amacı kaymayı kontrol etmek ve fren etkinliğini artırmaktır.
Kauçuk (Diene, Nitril)	Asbest lifleri içeren polimer kompozit fren malzemelerinde çapraz bağlanmayı teşvik etmek ve aşınma direncini artırmak için stabilizatörler olarak kullanılır; ayrıca, sıkıştırılabilirliği (modül/sertlik) de değiştirir.

Yanar vd. (2020), asbestsiz fren balatasına %0–%20 ağırlık oranlarında çelik elyaf ilaveli balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma karakteristikleri ile mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlanan numunelerin sürtünme davranışını pim–disk tipi test konfigürasyonunu kullanarak test etmişlerdir. Kompozit balata numunelerinin sürtünme katsayısının çelik elyaf içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %5 çelik elyaf ilavesinden sonra kompozitin sürtünme katsayısının önemli ölçüde değişmediğini belirtmişlerdir. Çelik elyaf ilavesinin kompozitin sürtünme katsayısında önemli bir artışa neden olsa da ağırlıkça %15'e kadar çelik elyaf ilavesiyle özgül aşınma oranında önemli bir değişiklik gözlemlenmediğini belirtmişlerdir. Öte yandan kompozit matrise çelik elyaf ilavesi numunenin solmaya karşı balata direncinin artmasına katkı sağlasa da mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir [13].

3.4.3. Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri, fren balatalarının üretim maliyetini azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında temizleyiciler, renklendiriciler ve organik/inorganik dolgu maddeleri yer almaktadır. Genellikle sürtünme performansına etkisiz oldukları kabul edilmekle birlikte, bazı durumlarda sürtünme ayarlayıcı işlev de görebilirler. Fren balatalarında yaygın olarak kullanılan dolgu maddeleri barit, kil, alçı ve talk'tır. Barit, genellikle sürtünme katsayısını etkilemeyen bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmekle birlikte sadece dolgu işlevi görmektedir. Kil, doğal olarak toprak ve taş formunda bulunan ve dolgu malzemesi olarak kullanılan bir bileşendir. Alçı, düşük ısı iletkenliğe sahip olup dolgu malzemesi olarak %50'ye kadar kullanılabilir. Talk ise, yüksek yağ ve gres emme kapasitesi ve yaprağımsı yapısıyla balatalarda tercih edilen dolgu malzemelerinden biridir [21]. Dolgu malzemeleri ve tanımlarına ait bazı bilgiler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Dolgu malzemeleri ve tanımları [14,22]

Malzeme	Tanım/Yorum
Baryum Sülfat (BaSO_4)	Temelde inert bir malzeme olup, yoğunluğu artırır ve aşınma direncine yardımcı olabilir; yüksek sıcaklıklarda kararlıdır.
Kalsiyum Karbonat (CaCO_3)	Baryum sülfata daha düşük maliyetli bir alternatif, ancak yüksek sıcaklıklarda tam olarak stabil değildir.
Kaju Fıstığı Kabuk Yağı	Bağlayıcı sistemde dayanıklılığı artırır ve fren gürültüsünü azaltır.
Kaju fıstığı tozu	Fren gürültüsünü bastırır, ancak sürtünme malzemelerine iyi gelmez
Kireç (Ca(OH)_2)	Demir katkı maddelerinde korozyonu önlemek için kullanılır; işleme yardımcı olur ve kayma sıcaklıklarını artırır.
Potasyum Titanat	İnert dolgu malzemesi; ayrıca bir yalıtkan ve asbestin rolünü değiştiren yapısal bir katılımcıdır.
Kauçuk Atığı	Öğütülmüş lastik ("lastik kabukları"), maliyeti düşürür, yol kirini içermemelidir.
Vermikülit	Düşük frekanslı fren sesini bastırır, ancak düşük ısı direncine sahiptir
Deniz Kömürü	Genel düşük maliyetli parçacıklı dolgu; zararlı kül içerebilir, yüksek sıcaklıklar için iyi değildir.
Çinko Oksit (ZnO)	Bazı aşınma direnci sağlar, ancak tamburları parlatabilir.

Uçucu kül, sanayi fabrikaları ve ısıtma ile elektrik santrallerinde kömür yanmasından kaynaklanan bir yan üründür. İnce mineral tozu formunda, açık gri ile koyu gri ya da açık kahverengi renklerde olup, esas olarak silisyum, alüminyum ve demir bileşenlerinden oluşmaktadır. Uçucu kül, ayrıca doğal taşlarla benzer şekilde çeşitli iz elementleri içerir ve yanmamış karbon içeriği düşüktür. Kömür yanması çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı için, atık yönetimi, özellikle sanayi atıkları açısından birçok devlette çevresel politika önceliği haline gelmiştir. Farklı kömür türleri ve çeşitleri, uçucu külün değişen özelliklerle sonuçlanmasına yol açmakta ve bu da atık yönetim sürecini etkilemektedir. Uçucu kül, maliyetinin düşük olması nedeniyle fren balatalarında dolgu maddesi olarak kullanılması amacıyla

denenmiştir. Toplam ağırlığın %5'inden %55-60'ına kadar kütle içeriği bulunmaktadır. Araştırmalar, yüksek kül içeriğine sahip fren balatalarının, araçların düşük başlangıç hızlarında sürtünme katsayılarının stabil olduğunu göstermiştir [1].

3.4.4. Sürtünme ayarlayıcı malzemeler

Sürtünme ayarlayıcı malzemeler, sürtünme koşullarını kararlı bir şekilde sağlamak amacıyla eklenen bileşenlerdir. Bu malzemeler, sürtünme katsayısını modifiye ederek, fren performansının iyileşmesinde kritik bir rol oynar. Abrasif (aşındırıcı) ve non-abrasif (aşındırıcı olmayan) olmak üzere iki gruba ayrılabilir [21]. Boz ve Kurt (2006), yaptıkları bir çalışmada, bronz esaslı fren balatalarına toz metalurjisi yöntemiyle farklı oranlarda (%0,5-%4) antimon trisülfid tozu ilave etmişler ve ürettikleri fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışlarını bronz esaslı balata numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Aşınma direnci açısından en iyi sonucunun %0,5 antimon trisülfid içeren sürtünme malzemesinden elde edildiğini, sürtünme katsayısı açısından ise en iyi sonucun %4 antimon trisülfid katkılı sürtünme malzemesinden elde edildiğini gözlemlemişlerdir [25].

Aşındırıcılar, birleşim yüzeylerinin temizliğini korumaya ve sürtünme filmlerinin birikimini kontrol etmeye yardımcı olur. Ayrıca, özellikle duruşu başlatırken sürtünmeyi artırır. Tablo 6'da aşındırıcı olarak kullanılan malzemeler ve tanımları verilmiştir.

Tablo 6. *Aşındırıcı sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları [14]*

Malzeme	Tanım/Yorum
Alüminyum oksit	(1) Parlatma ajanı olarak eklenir ve aşınma direnci sağlar. Ancak solma üretebilir. (2) Anhidrat formu daha az aşındırıcıdır. (3) Eritilmiş formu çok serttir ve en aşındırıcı formdur.
Demir oksitler	Hematit hafif bir aşındırıcı olarak işlev görebilir; manyetit de hafifçe aşındırıcıdır.
Kuvartz	Kırılmış mineral parçacıkları
Silika	Doğal veya sentetik olarak üretilmiş silika
Zirkonyum silikat	(ZrSiO ₄)

B. Sugözü ve Dağhan (2017), çalışmalarında farklı oranlarda alümina, silika ve zirkon (ağırlıkça %5 ve %10) içeren altı farklı fren balatası numunesi üreterek bu numunelerin sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Fren balatalarını geleneksel yöntemleri izleyerek sırasıyla toz karıştırma, ön şekillendirme ve sıcak presleme işlemleri ile üretmişlerdir. Numunelerin aşınma karakteristiklerini, pad-on-disk tipi aşınma test cihazı kullanarak belirlemişlerdir. Ayrıca, sertlik, yoğunluk, porozite, çekme dayanımı ve basma dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirmişler; morfolojik özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular doğrultusunda, aşındırıcı miktarının artması ile sürtünme katsayısının yükseldiğini ve özgül aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Yapılan sürtünme testleri sonucunda en yüksek sürtünme katsayısının 0.407 ile ağırlıkça %10 alümina içeren numuneden, en düşük sürtünme katsayısının ise 0.296 ile %5 zirkon içeren numuneden

elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca ağırlıkça %10 alümina içeren balata numunesinin yüksek sürtünme performansı sergilediğini vurgulamışlardır [26].

Aşındırıcı olamayan maddeler ise sürtünme katsayısını etkileyen, ancak aşındırıcı özellik göstermeyen malzemelerdir. Bu malzemeler, yağlama yapar, sürtünmeyi artırır veya oksijenle reaksiyona girerek arayüz filmlerinin kontrolüne yardımcı olur. Tablo 7’de aşındırıcı olmayan malzemeler ve tanımları verilmiştir.

Tablo 7. *Aşındırıcı olmayan sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları [14]*

Malzeme	Tanım/Yorum
Antimon trisülfür	Sürtünme kararlılığını artırmak için eklenen katı yağlayıcıdır. Potansiyel olarak toksik içerir.
Pirinç	Tipik olarak %62 Cu - %38 Zn içerir. Bazen talaş veya makine atığı olarak kullanılır, ıslak sürtünmeyi ve geri kazanımı artırdığı söylenir.
Grafit	Ucuz ve yaygın olarak kullanılır. Birçok form ve kaynağı vardır, bazıları aşındırıcı kirleticiler içerebilir; hava ile >700°C’de yanar, sürtünme seviyesi nem ve yapıyla etkilenir.
Seramik	Alümina-silika ile düşük yoğunluklu dolgu, rotor aşınmasını azaltmaya ve sürtünmeyi kontrol etmeye yardımcı olduğu iddia edilir.
Bakır	Isı taşıma kontrolü için toz olarak kullanılır ancak aşırı dökme demir aşınmasına neden olabilir.
Sürtünme tozu	İşlenmiş kaju reçinelerinden oluşur, bazen kauçuk bazlı olabilir; spontan yanmayı azaltmak veya parçacık dağılımını desteklemek için bazı katkı maddeleri kullanılır.
Kurşun oksit	Sürtünme düzenleyici olarak kullanılmıştır, ancak toksisite endişeleri vardır.
Metaller-akışkan bileşenler	Pb, Sb, Bi, Mo, akışkan bileşenleri olarak, sürtünme kaynaklı filmleri stabilize etmek ve bunların aşırı kalınlaşmasını önlemek için oksijen alıcıları olarak işlev görür.
Metal oksitler-çeşitli	Magnetit soğuk sürtünmeyi artırır; ZnO yağlama yapar ancak tambur parlatmasına neden olabilir; Cr ₂ O ₃ sürtünmeyi artırır.
Metal sülfürler-çeşitli	Cu ₂ S, Sb ₂ S ₃ , PbS; metal fiber içeren ve içermeyen disk fren balataları üzerindeki katkı maddelerinin etkisini göstermektedir; sürtünme katsayısını değiştirmekte ve stabilize etmektedir, en yüksek değer Sb için yaklaşık 1 (0.47-0.49), ardından PbS (0.40-0.47) gelmektedir; Cu için en değişken değerler (0.36-0.52) olup, Cu-S için aşınma en kötüsüdür.
Mineral dolgu maddeleri	Mullit, kyanit, sillimanit, alümina, kristalin silika; aşınmayı kontrol etmeye yardımcı olur.
Molibden disülfür	(MoS ₂), tipik bir katman ızgara türü yağlayıcıdır; düşük maliyetli, sürtünmeyi azaltabilir.
Petrol koku	Düşük maliyetli, sürtünmeyi azaltabilir, düşük kül içerir.

Grafit, iki boyutlu halkalar şeklinde dizilmiş karbon atomlarından oluşan, parlak ve yumuşak bir malzemedir. Yüksek ısıya dayanıklılığı ve birçok korozyon maddeye karşı gösterdiği direnç ile öne çıkar. Grafitin sıcaklıkla birlikte artan dayanımı, düşük sürtünme uygulamalarında avantaj sağlar. Fren balatalarında, grafitin uygun oranlarda kullanılması, sürtünme katsayısının istenilen seviyede dağılmasına yardımcı olur ve bu da balata performansını iyileştirir.

Bakır, kalay ve çinkodan oluşan bronz tozu, katıldığı malzemenin elastik modülünü, sıcaklık iletkenliğini ve elektromanyetik koruma kapasitesini artırır. Ayrıca, malzemenin katılma süresini kısaltır ve termal genleşme katsayısını düşürür, böylece fren balatasının genel performansını iyileştirir [21].

Bakır, sürtünme malzemelerinin performans özelliklerini artıran kendine özgü özellikleri sayesinde uzun süredir fren balata bileşimlerinde önemli bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Bakır, balatada termal solmayı önlemesi ve ısı iletkenliği artırması nedeniyle bir sürtünme düzenleyici olarak işlev görmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı bir özellik gösteren bakır, temas alanlarında homojen bir sürtünme tabakası oluşturarak gürültü ve titreşimi azaltır ve sürtünme katsayısının stabilizasyonuna katkı sağlar. Ayrıca, bakırın balatada fiber formunda takviye olarak kullanılması, aşınmayı azaltıcı bir rol oynar [9,10].

3.5. Balatanın mikroyapı ve tribolojik özelliklerini etkileyen faktörler

Fren balatalarının mikroyapı ve tribolojik özellikleri, malzemenin performansını belirleyen önemli parametrelerdir. Bu özellikler, fren balatalarının sürtünme, aşınma, dayanıklılık ve uzun ömür gibi kritik performans kriterlerini doğrudan etkiler. Balatanın mikroyapısı, kullanılan malzemeler ve üretim süreciyle şekillenirken; tribolojik performansı, malzemenin sürtünme ve aşınma davranışlarıyla ilişkilidir. Bu faktörler, fren balatasının genel verimliliğini ve güvenliğini belirlemede önemli rol oynar.

Balatanın mikroyapısını etkileyen faktörler, malzemenin bileşen yapısına ve üretim süreçlerine dayanır. Bu faktörler, balatanın dayanıklılığını ve performansını belirleyen unsurlardır.

1. **Balatada Kullanılan Malzemeler:** Fren balatasının bileşenlerinde kullanılan malzemeler, mikroyapıyı doğrudan etkiler. Örneğin, organik, metalik veya karbon esaslı malzemeler arasındaki farklar, mikroyapı özelliklerinin değişmesine yol açabilir. Her malzeme türü, farklı sertlik, yoğunluk ve aşınma direnci sunar.
2. **Malzemelerin Yapısı:** Malzemelerin kristal yapısı, içsel boşluklar ve bağ yapıları gibi faktörler, mikroyapıyı belirleyen önemli unsurlardır. Bu yapılar, malzemenin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkileyebilir.
3. **Malzemelerin Oransal Kullanımı:** Malzemelerin farklı oranlarda karıştırılması, kompozit malzeme oluşumunda önemli bir rol oynar. Balatanın mikroyapısındaki değişiklikler, bu karışım oranlarının etkisiyle şekillenir.
4. **Sıkıştırma Basıncı:** Üretim sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı, balatanın yoğunluğunu ve yapısal bütünlüğünü belirler. Yüksek basınç, daha dayanıklı ve homojen bir mikroyapı oluşumunu teşvik eder.
5. **Sinterleme Sıcaklığı ve Süresi:** Sinterleme süreci, balatanın mikroyapısını etkileyen kritik bir adımdır. Sıcaklık ve süre, malzemenin bağ yapısını ve aşınma direncini artırmak için optimize edilmelidir.

6. **Üretim Yöntemi:** Üretim yöntemleri, mikroyapıyı belirleyen bir diğer faktördür. Örneğin, döküm, sinterleme veya presleme yöntemlerinin her biri, balatanın mikroyapısal özelliklerini farklı şekilde etkiler.

Fren balatasının tribolojik performansı, sürtünme ve aşınma davranışlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu performans hem balatanın iç yapısına hem de çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

1. **Balataların İçerdikleri Malzeme Bileşenleri:** Balatalarda kullanılan malzeme bileşenleri, sürtünme özelliklerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Takviye edici malzemeler ve dolgu maddeleri, balatanın tribolojik performansını iyileştirebilir.
2. **Balatanın Yüzey Yapısı:** Fren balatasının yüzey yapısı, sürtünme davranışını önemli ölçüde etkiler. Pürüzlü yüzeyler, sürtünmeyi artırırken, düzgün yüzeyler daha düşük sürtünme sağlar.
3. **Yüzey Enerjisi:** Yüzey enerjisi, malzemenin çevresiyle etkileşim kapasitesini gösterir. Bu, özellikle sürtünme katsayısını ve aşınma oranını etkileyen bir faktördür.
4. **Fren Balatalarındaki Kimyasal Reaksiyonlar:** Frenleme sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, sürtünme özelliklerini değiştirebilir. Bu reaksiyonlar, yüzeydeki oksitlenme, aşınma ve diğer kimyasal bozulmalarla bağlantılıdır.
5. **Balatanın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri:** Sertlik, yoğunluk, ısı iletkenlik gibi fiziksel özellikler ile çekme dayanımı ve elastikiyet modülü gibi mekanik özellikler, balatanın tribolojik performansını doğrudan etkiler.
6. **Çalışma Koşulları:** Fren balatasının çalışma koşulları, özellikle hız, basınç ve sıcaklık gibi faktörler, sürtünme davranışını önemli ölçüde değiştirebilir. Bu koşullar, balatanın aşınma hızını ve etkinliğini etkiler.
7. **Çevresel Koşullar:** Çevresel faktörler, sıcaklık, nem ve dış ortam koşulları, balatanın performansını ve ömrünü etkileyebilir. Örneğin, aşırı sıcaklık, malzemenin aşınma hızını artırabilir.
8. **Yağlı, Nemli ve Kirli Yüzeyler:** Fren balatalarının çalıştığı yüzeyin yağlı, nemli veya kirli olması, sürtünme katsayısını ve aşınma direncini değiştirir. Bu tür yüzeyler, frenleme verimliliğini olumsuz etkileyebilir [20,27]

4. Balata Üretim Yöntemleri

Fren balataları, çeşitli malzemelerin toz halinde bir araya getirilip preslenmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Bu balataların kimyasal ve mekanik özellikleri, içerdiği bileşenlerin oranlarına göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, balata malzemesinin tasarımında kullanılan malzemelerin türü ve oranlarının belirlenmesi oldukça karmaşık ve önemli bir süreçtir [28].

Fren balatalarının üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, metal veya metal dışı malzemelerin çok ince tozlar halinde karıştırılıp, istenen formda preslenerek kontrollü bir atmosferde ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre boyunca sinterlenmesini içerir. Bu yöntemle, tek aşamalı üretim mümkündür. Bu yöntemin fren balata üretiminde tercih edilmesinin temel nedeni, farklı özelliklere sahip malzeme karışımlarının, özelliklerini kaybetmeden üretilebilmesidir. Örneğin, yüksek sıcaklıklara dayanımı düşük olan kauçuk veya reçine gibi malzemeler, yüksek sıcaklıkta yapılan üretim sırasında yanarak özelliklerini kaybedebilir. Bu nedenle, fren balata malzemelerinin, döküm gibi yüksek sıcaklık gerektiren yöntemlerle üretilmesi tercih edilmemektedir. Ancak toz

metalürjisi yöntemi ile üretilen fren balataları, bileşimdeki tüm malzemelerin üretim süresince özelliklerini korumasını sağlar. Ayrıca bu yöntemle, istenen boyutlarda gözenekli bir yapı elde edilebilir ve farklı boyut ve şekillere sahip malzeme tozları dayanıklı, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülebilir [28].

Her ne kadar fren balata üretiminde döküm yöntemi tercih edilmese de özellikle metal fren balatalarının üretiminde döküm yöntemi tercih edilebilir. Bu yöntemde, malzeme sıvı hale getirilir ve özel kalıplara dökülerek fren balatası şeklini alır. Döküm yöntemi, özellikle ağır yük taşıyan araçlar ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için uygundur. Döküm yöntemiyle üretilen fren balataları, metal yapıları sayesinde yüksek dayanıklılık gösterir, metal alaşımları, yüksek sıcaklıklarda bile stabil kalabilir, bu da frenleme sırasında aşırı ısınmayı engeller. Bu yöntem özellikle ağır araçlar ve yüksek performans gerektiren sistemler için uygundur. Ancak döküm yöntemi, özellikle özel metal alaşımlarının kullanıldığı durumlarda daha pahalı olabilir. Ayrıca metal fren balataları, kompozit malzemelere göre daha ağır olabilir, bu da aracın genel ağırlığını etkileyebilir.

5. Sonuç

Türkiye’de ve dünyada artan nüfusa bağlı olarak araç sayısının artması, otomotiv endüstrisinin hızlı bir şekilde gelişmesi ve yüksek hızlı araçların yaygınlaşmasıyla birlikte taşıtlarda kullanılan frenleme güvenliği kritik bir konu haline gelmiştir. Yüksek hız ve kütleye sahip olan taşıtların güvenli bir şekilde frenlenmesi, bu taşıtların emniyetli çalışabilmesi için önemli bir faktördür. Fren balatası, fren sisteminin en önemli bileşenlerinden biridir. Bu nedenle, taşıtlarda kullanılan fren balata malzemeleri çok önemlidir. Fren balata malzemelerinin yapısı, boyutları ve performansı üzerine yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli optimum çözümler geliştirilmiştir. Ayrıca çevresel sürdürülebilirlik kaygıları nedeniyle bakır ve asbest içermeyen veya düşük çevresel etkiye sahip fren balatası malzemeleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Frenleme sırasında açığa çıkan yüksek enerji, balatanın aşırı ısınmasına neden olabilir. Isının hızla emilmesi, ısıya dönüşmesi ve dağıtılması, fren balatası için oldukça önemlidir. Frenleme anında, balata yüzeyinde yüksek sıcaklıklara ulaşan noktalar oluşabilir ve bu, fren performansında azalmaya, termal deformasyonlara, sürtünme katsayısındaki dalgalanmalara ve fren kayıplarına yol açabilir. Yüksek ısı, termal çatlaklar ve yüzey pürüzlülüğünde artış gibi hasarlara sebep olabilir. Bu tür ısı hasarları, balatanın sürtünme özelliklerini bozar ve taşıtların güvenliğini tehdit edebilir. Sonuç olarak, aşınma, çatlaklar ve diğer hasarlar nedeniyle fren balatalarının beklenen ömrü dolmadan değiştirilmesi gerekebilir.

Fren balatasının aşınma davranışı, malzeme özelliklerine ve tasarım parametrelerine bağlıdır. Geleneksel olarak, demir alaşımları yaygın olarak kullanılsa da son yıllarda kompozit malzemelerin (özellikle seramik ve alüminyum matrisli) fren balatası olarak kullanımı önerilmiştir. Bununla birlikte, dövme çelikler, yüksek hızlarda çalışan taşıtlarda kullanılmak için uygun olup, istenilen aşınma direncini ve stabil mikroyapıyı sağlama açısından yeterlidir.

Fren balatalarında kullanılan malzemeler, güvenlik, performans ve dayanıklılık açısından önemli bir rol oynamaktadır. Her malzemenin kendine has avantajları ve dezavantajları vardır. Organik malzemeler, çevre dostu olmaları ve düşük gürültü seviyeleri ile öne çıkar. Ancak, aşırı sıcaklık ve yüksek performans gereksinimlerinde sınırlı kalabilirler. Metalik ve sinterlenmiş metal malzemeler, yüksek

sıcaklık dayanımı ve uzun ömürleri ile ideal olup, ancak gürültü ve aşınma gibi olumsuz etkilerle karşılaşılabilir. Seramik malzemeler ise, özellikle performans araçları için yüksek ısıl dayanıklılık ve düşük gürültü sağlar, ancak maliyet açısından daha pahalıdır.

Genel olarak, fren balatası seçimi, araç tipine, sürüş koşullarına ve maliyet beklentilerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Fren balataları seçilirken bu faktörlerin dikkate alınması, güvenli ve verimli bir sürüş deneyimi sağlamada önemli rol oynar.

Gelecekte, fren balatası üretiminde karbon ayak izinin azaltılması, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ve toksik özellikleri daha az olan katkıların tercih edilmesi yönündeki çalışmaların artması öngörülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

References

- [1] Borawski, A. (2020). Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads-review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 27(1), 374-396.
- [2] Gawande, S. H., Banait, A. S., & Balashowry, K. (2023). Study on wear analysis of substitute automotive brake pad materials. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 21(1), 144-153.
- [3] Saindane, U. V., Soni, S., & Menghani, J. V. (2021). Dry sliding behavior of carbon-based brake pad materials. *International Journal of Engineering*, 34(11), 2517-2524.
- [4] Eriksson, M., & Jacobson, S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology international*, 33(12), 817-827.
- [5] Marin, E., Daimon, E., Boschetto, F., Rondinella, A., Inada, K., Zhu, W., & Pezzotti, G. (2019). Diagnostic spectroscopic tools for worn brake pad materials: A case study. *Wear*, 432, Article 202969.
- [6] Sugoza, I., Mutlu, I., & Sugoza, K. B. (2018). The effect of ulexite to the tribological properties of brake lining materials. *Polymer Composites*, 39(1), 55-62.
- [7] Hendre, K. N., & Bachchhav, B. D. (2019). Friction and wear characteristics of rubber resin-bonded metallic brake pad materials. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6), 1312-1316.
- [8] Österle, W., Prietzel, C., Kloth, H., & Dmitriev, A. I. (2010). On the role of copper in brake friction materials. *Tribology International*, 43(12), 2317-2326.
- [9] Tavangar, R., Moghadam, H. A., Khavandi, A., & Banaeifar, S. (2020). Comparison of dry sliding behavior and wear mechanism of low metallic and copper-free brake pads. *Tribology International*, 151, Article 106416.
- [10] Zhang, P., Zhang, L., Ren, S., Fu, K., Wu, P., Cao, J., Shijia, C., & Qu, X. (2019). Effect of matrix alloying of Fe on friction and wear properties of Cu-based brake pad materials. *Tribology Transactions*, 62(4), 701-711.

- [11] Krishnan, G. S., Kumar, S., Suresh, G., Akash, N., Kumar, V. S., & David, J. P. (2021). Role of metal composite alloys in non-asbestos brake friction materials-A solution for copper replacement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 926-929.
- [12] Lyu, Y., Leonardi, M., Wahlström, J., Gialanella, S., & Olofsson, U. (2020). Friction, wear and airborne particle emission from Cu-free brake materials. *Tribology International*, 141, Article 105959.
- [13] Yanar, H., Purcek, G., & Ayar, H. H. (2020). Effect of steel fiber addition on the mechanical and tribological behavior of the composite brake pad materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (pp. Article 012018). IOP Publishing.
- [14] Blau, P. J. (2001). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives (No. ORNL/TM-2001/64). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [15] Liew, K. W., & Nirmal, U. (2013). Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. *Materials & Design*, 48, 25-33.
- [16] Mulani, S. M., Kumar, A., Shaikh, H. N. E. A., Saurabh, A., Singh, P. K., & Verma, P. C. (2022). A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system. *Materials Today: Proceedings*, 56, 447-454.
- [17] Zagurskiy, A. (2024). Technical overview of the main types, designs, and materials of brake pads for mobile agricultural machinery. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 4(20), 119-130.
- [18] Akpınar, G. (2008). Modifiye edilmiş karaçam kozalaklarının otomotiv fren balatalarında kullanımının araştırılması. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [19] Toros, M. (2011). Fren balatalarında nano malzemelerin kullanımının frenleme performansına etkilerinin deneysel araştırılması. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- [20] Kara, F. (2011). Karbon elyaf takviyeli otomotiv fren balata özelliklerinin araştırılması. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [21] Sugözü, I., & Mutlu, I. (2008). Fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(4), 33-40.
- [22] Raghunathan, V., Sathyamoorthy, G., Ayyappan, V., Srisuk, R., Singaravelu, D. L., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2024). Advances in brake friction materials: A comprehensive review of ingredients, processing methods, and performance characteristics. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 30(6), 1396-1431.
- [23] Bashir, M., Qayoum, A., & Saleem, S. S. (2021). Experimental investigation of thermal and tribological characteristics of brake pad developed from eco-friendly materials. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 7, 1-13.
- [24] Pujari, S., & Srikanth, S. (2019). Experimental investigations on wear properties of Palm kernel reinforced composites for brake pad applications. *Defence Technology*, 15(3), 295-299.
- [25] Boz, M., & Kurt, A. (2006). Antimon trisülfürün bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özelliklerine etkisi. *Teknoloji*, 9(2), 79-90.
- [26] Sugözü, B., & Dağhan, B. (2017). Fren sürtünme malzemelerinde aşındırıcıların (alümina, silika, zirkon) tribolojik özellikleri. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 14-23.
- [27] Üstün, N. S. (2011). Otomotiv endüstrisi için bir disk fren balatası üretimi ve performansının incelenmesi. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [28] Ertan, R. (2008). Fren balata malzemelerinin optimizasyonu ve üretim parametrelerinin analizi. [Yayınlanmış doktora tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Derleme Makale

Peynir Altı Suyunun İşlemesi ve Değerlendirilmesindeki Son Gelişmeler

Nihat Akın ¹  ve Damla Özışık ^{2,*} 

Gönderim: 30.11.2024

Kabul: 20.06.2025

¹ Gıda Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye; nakin@selcuk.edu.tr² Gıda Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye; damlaozisik29@gmail.com

*Sorumlu yazar

Özet: Süt endüstrisi, dünyanın en büyük su tüketicilerinden biri olarak kabul edilmekte olup, bu endüstriden kaynaklanan atıklar çevreyi ciddi şekilde kirletmektedir. Arıtılmamış atık suyun çevreye salınması durumunda, süt endüstrisinden kaynaklanan organik ve inorganik kirlenimler karasal ve su ekosistemlerini bozabilir, bu da ekosistemin dengelessizliğine yol açabilir. Süt endüstrisinden kaynaklanan atık sular, fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle arıtılabilmektedir. Ancak, işletme maliyetlerinin düşürülmesi, verimliliğin artırılması, atık suyun geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması ile çevresel bozulmanın azaltılması için arıtma yöntemlerinde daha fazla ilerleme sağlanması gerekmektedir. Peynir altı suyunun atık olarak su sistemlerine salınması çeşitli çevresel riskler taşır. Ancak, bu atığı değerli ve son derece besleyici ürünlere dönüştürmek için birçok değerlendirme tekniği bulunmaktadır. Membran filtreleme gibi teknikler uygulanabilir, ancak bunlar her peynir altı suyu tipi için uygun olmayabilir. Değişkenliğe uyum sağlayabilen ve değerli ürünler üretebilen yeni metodolojiler geliştirilmelidir. Bu derleme, peynir altı suyu işleme tekniklerinin kapasitesini, uygulamalarını ve metodolojilerini değerlendirerek, ürün geliştirmede daha fazla yenilik yapabilecek ilgili araştırmaları tartışmaktadır. Peynir altı suyunun atık olarak çevresel etkilerine odaklanmakta ve bu etkileri en aza indirmek için çözüm yollarını araştırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: atık su arıtma; çevresel etki; membran filtreleme; peynir altı suyu; süt endüstrisi

Review Article

Recent Advances in Whey Processing and Valorisation

Abstract: The dairy industry is considered one of the largest water-consuming industries in the world, and waste from the dairy industry seriously pollutes the environment. If wastewater is released into the environment without treatment, these organic and inorganic pollutants from the dairy industry can disrupt terrestrial and aquatic ecosystems, thereby leading to ecosystem imbalance. Wastewater from the dairy industry can be treated by various methods such as physical, chemical and biological. However, further advances in treatment methods have become the need of the hour to reduce operating costs, increase efficiency, recycle and reuse wastewater, and reduce degradation of environmental resources. Whey has several environmental risks if disposed of as waste in watercourses. However, there are numerous valorisation techniques to convert it into valuable and highly nutritious products. Techniques such as membrane filtration may be utilised, but these are not applicable to all categories of whey. Novel methodologies that are agile enough to deal with whey variability can produce valorised products. This

review assesses the capability of whey processing techniques, applications and methodologies, discussing pertinent research that can innovate product development further. It focuses on environmental impacts of whey as a waste and ways of minimising it.

Keywords: wastewater treatment; environmental impact; membrane filtration; whey; dairy industry

1. Giriş

Küresel süt ürünleri sektörü, örneğin Avrupa Birliği'nde uygulanmaya başlanan yeni bölgesel süt ürünleri politikası ve Dünya Ticaret Örgütü'ndeki devam eden müzakerelerin sonuçlarına bağlı olarak sürekli değişim içerisinde. Süt ürünleri pazarındaki dalgalanmalar ve fiyat hareketlilikleri, gelecekteki süt ürünleri endüstrisi için sürekli bir zorluk teşkil etmektedir [1].

Peynir ve kazein bazlı süt ürünlerinin üretimi sırasında oluşan yan ürün olan peynir altı suyu, besin açısından zengindir ve çeşitli ticari kullanımlara sahiptir. Ancak peynir altı suyu, yüksek organik yükü nedeniyle doğa için kirlletici özellik taşımaktadır [2]. Farklı süt endüstrilerinde oluşan atıklar, ileri teknolojilerin yardımıyla farklı katma değerli ürünlerde değerlendirilebilmektedir.

Peynir üretiminde kullanılan sütün (üretilen peynirin türüne bağlı olarak) yaklaşık %80-90'ı peynir altı suyu olarak ayrılır. Her yıl küresel olarak tahmini 180-190 milyon ton atık peynir altı suyu üretilmektedir ve bu peynir altı suyunun 100 milyon tonu peynir suyudur [3,4]. Bu rakam ilk olarak 2018'de rapor edilmiştir. Yıllık %1-2'lik bir artış oranına dayanarak, bu miktarın bu yıl 187-206 milyon ton civarında olduğu ve öngörülen büyümenin devam etmesi durumunda 2030 yılında 203-241 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu toplam miktarın 40 milyon tonu yalnızca Avrupa Birliği (AB) içinde üretilmekte olup, bu yıllık peynir altı suyu fazlasının 13 milyon tonuna eşdeğerdir [5]. Üretilen yüksek hacimli atık peynir altı suyu çevresel riskler taşımakta ve bu nedenle atık suyun arıtılması gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Süzme yoğurt gibi pıhtılaşmış fermente süt ürünlerine yönelik tüketici talebinin son yıllarda üç katına çıkması nedeniyle atık yoğurt serumu üretim hacimleri artmıştır. Sonuç olarak, üretilen yoğurt suyu hacminin yıllık %1-2 arttığı tahmin edilmektedir [6, 7].

Daha önce, atık peynir altı suyunun arazi uygulamaları yoluyla, ön arıtmaya tabi tutulmadan doğrudan atık sulara deşarj edildiği, tanklarda depolandığı veya kanalizasyona deşarj edildiği belirtilmiştir [8, 9]. Alternatif bertaraf yöntemleri arasında, mevcut besin içeriği nedeniyle peynir altı suyunun gübre olarak kullanılması da yer almaktadır. Ancak, bu yöntemler yüksek biyolojik oksijen ihtiyacı (BOD) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) nedeniyle çevresel riskler taşımakta olup su kütlelerinde kirliliğe ve sucul organizmaların ölü-müne yol açma potansiyeline sahiptir. Atık düzenlemeleri bu bertaraf yöntemlerini kısıtlamış ve bunun sonucunda artan atık su arıtma maliyetleri, peynir altı suyu ürünleri pazarının gelişimini teşvik etmiştir. Süt endüstrisinin çevresel etkisine ilişkin tüketici farkındalığının artması, endüstrinin peynir altı suyu atıklarının bertaraf edilmeden önce daha verimli şekilde işlenmesini gündeme getirmiş ve bu amaca yönelik yenilikçi teknikleri teşvik etmiştir [12,13].

Peynir altı suyunun atık arıtma tesisleri aracılığıyla bertaraf edilmesi, süt ürünleri üreten işletmeler için maliyetli bir süreç olabilir ve düşük kâr marjlı, yüksek hacimli bir sektörde işletmenin başarı ile başarısızlık arasındaki farkı belirleyebilir. Asidik peynir altı suyunun (APAS) işlenmesi ve bertarafı, tatlı peynir altı suyuna (TPAS) kıyasla bileşim farklılıkları nedeniyle genellikle daha sorunludur. Genel olarak, APAS'ın pH, protein ve laktoz içeriği daha düşük, ancak kalsiyum, fosfor ve laktik asit içeriği daha yüksektir [14]. Bu durum, APAS bileşenlerinin konsantrasyon sırasında farklı davranışlarına neden olmakta ve akışın işlenmesini zorlaştırmaktadır [15]. Bu nedenle, güçlü kirleticilerin işlenmesi, değerlendirilmesi ve azaltılması için alternatif teknikler geliştirilmiştir [13].

Ek olarak, Peynir altı suyu, Lor peyniri ve Ricotta gibi asit-ısı kaynaklı pıhtılaşma düzenine sahip bazı peynir çeşitlerinin üretilmesinde kullanılır. Ancak, bu işlem 100 kg peynir altı suyu ve 5 kg süt içeren 105 kg'lık bir formülasyondan yaklaşık 5 kg lor/ricotta elde edilen katma değeri düşük bir işlemdir [16]. Bu nedenle, ilave atık su arıtma işlemleri çok önemlidir. Peynir yapımında ortalama olarak, süt hacminin %85-95'i, sütteki besin maddelerinin yaklaşık %55'ini içeren peynir altı suyu olarak açığa çıkar [17].

Bu derlemenin amacı, peynir altı suyunun atık olarak çevresel etkilerini ve peynir altı suyu arıtım ve işleme tekniklerindeki son gelişmeler ve sınırlamaları irdelemektir. Ayrıca, bu derleme, süt endüstrisinin sürdürülebilirlik yaklaşımlarıyla yenilikçi ürünler geliştirmesi için temel oluşturabilecek potansiyel peynir altı suyu ürünleri ve değerlendirme stratejilerini ve bunların gelecekteki eğilimlerini vurgulamayı hedeflemektedir. Süt ürünleri sektöründeki mevcut çevre ve sosyal yönetim (ESG) girişimleri, tam yağlı süt üretimi ve işlenmesiyle ilişkili sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasına odaklanmaktadır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması ve süt ürünleri tedarik zincirinin karbondan arındırılması, atıkların doğrudan azaltılması ve bu hedefe ulaşmak için peynir altı suyu gibi yan ürünlerin değerlendirilmesi yoluyla teşvik edilebilir.

2. Peynir Altı Suyu Atık Yönetimi

2.1. Peynir Altı Suyu Kategorileri (Uygulamalar ve Zorluklar)

Süt pıhtılaşma modeline göre peynir altı suyu, farklı besin bileşimi ve üretim araçlarıyla tatlı peynir altı suyu 'TPAS' ve Asidik peynir altı suyu 'APAS' olarak sınıflandırılır (Tablo 1). [18-21].

Asitle pıhtılaştırılmış ürünlere olan talep son yıllarda üç katına çıkmış ve 1.6 milyar litreden fazla APAS üretildiği belirtilmektedir [3]. Asidik peynir altı suyunun kuruma zorluklarını azaltmak için asitliği nötralize etmek amacıyla magnezyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit eklenebilir, böylece topak oluşumu önlenir. Kurumaya yardımcı olmak için sodyum silikat veya magnezyum silikat gibi serbest akışlı maddeler eklenebilir [22].

Tablo 1. *Peynir altı suyu çeşitleri, bileşimleri ve üretimleri*

Tip	Protein (g/l)	Laktoz (g/l)	Mineraller (g/l)	pH	Üretim
Tatlı peynir altı suyu (TPAS)	6-10	46-52	2.5-4.7	5.6-7	Peynir üretimi sırasında peynir mayasıyla pıhtılaşma sonucunda üretilir. Ayrıca peynir altı suyu olarak da anılır.
Asidik peynir altı suyu (APAS)	6-8	44-46	4.3-7.2	4.3 < 5.6	Laktozun laktik aside fermentasyonu yoluyla pıhtılaşma gerçekleşir; bu süreç süzme yoğurt üretiminde olduğu gibi veya asit kazein üretimi sırasında asit ilavesi yoluyla gerçekleşir. Asit kaynaklı pıhtılaşma, sütteki minerallerin dengesindeki değişiklikler nedeniyle kalsiyum seviyelerini büyük ölçüde artırır. Düşük pH, kazein misellerindeki kalsiyum fosfatın çözünmüş kalsiyum ve fosfata dönüşmesine neden olur, böylece asit peynir altı suyunda (APAS) tatlı peynir altı suyuna (TPAS) kıyasla artan mineral içeriğine yol açar.

2.1.1. Çevresel Etki (Enerji Talebi ve Karbon Ayak İzi)

Dünya genelinde peynir tüketiminin son 5 yılda yaklaşık %5 oranında arttığı bildirilmiştir [23] ve en popüler tür Cheddar peyniri olarak sınıflandırılmaktadır. Peynir üretimi, unlu mamuller endüstrisinden sonra (yılda 318 kt petrol eşdeğeri) Birleşik Krallık'taki ikinci en büyük enerji tüketicisidir (yılda 317 kt petrol eşdeğeri) (Birleşik Krallık Ulusal İstatistikleri 2020). Tatlı peynir altı suyu (TPAS) ve Asidik peynir altı suyu (APAS) ile ilgili uygulamalar ve zorluklar Tablo 2'de gösterilmektedir [3, 13, 21, 22, 24-29].

Tablo 2. Tatlı ve asidik peynir altı suyunun uygulamaları ve zorlukları

Kategori	Uygulamalar	Zorluklar	Referanslar
Tatlı Peynir Altı Suyu (TPAS)	• Süt bazlı içeceklerin hammaddesi; kefir gibi. • Peynir altı suyu proteini konsantresi • Peynir altı suyu proteini izolatu • İşlenmiş peynir türlerinin üretiminde kullanılan içerik maddesi.	• Peynir üretiminden kaynaklanan, lezzet katabilecek veya beslenme sorunlarına yol açabilecek artık bileşikler içerebilir. Gliko-makropeptid (GMP), peynir yapımından önce mikrofiltrasyon kullanılarak peynir altı suyunun ayrılmasıyla uzaklaştırılan bir örnektir. • Bebek mamasının amino asit profili üzerindeki etkisi nedeniyle GMP uzaklaştırılır; ancak bunun çıkarılması, peynir altı suyunun protein içeriğini yaklaşık %20 oranında önemli ölçüde azaltır.	[21], [24-26], [28], [29]

Asidik peynir altı suyu (APAS)	• Genellikle hayvan yemi olarak kullanılır. • APAS'ın değerlendirilmesine, peynir altı suyundaki biyolojik oksijen ihtiyacını %75 oranında azaltan laktoz fermentasyonu yoluyla alkollü içkiler üretilmesi örnek verilebilir. • APAS, yenilenemeyen enerjinin potansiyel alternatifi olarak elektrik üretmek amacıyla biyogaz için bir substrat olarak kullanılabilir. • APAS'ye atfedilen düşük pH ($\text{pH} \leq 5.2$'de), kalsiyum fosfatın çoğunluğu, APAS ve APAS'den türetilmiş ürünlerin daha fazla stabilitesini sağlayabilen, çözünür bir kalsiyum tuzu halinde çözünebilir.	• Laktoz davranışını etkileyen bileşim farklılıkları nedeniyle membran filtrasyonu yoluyla değerlendirilemez; özellikle kristallizasyon. • APAS'nin yüksek mineral içeriği, TPAS kullanımına kıyasla işlemenin karmaşıklığı nedeniyle onu peynir altı suyu proteini üretimi için elverişsiz hale getirir. • APAS, peynir altı suyu proteinlerinin izoelektrik noktasına daha yakın bir pH'a sahiptir, dolayısıyla protein kirlenmesinin artmasına neden olur ve süt minerallerinin membran- dan geri kazanılması için onu uygunsuz hale getirir. • İçerdiği laktik asidin termoplastik ve higroskopik yapısı, özellikle %2'nin üzerinde laktik asit mevcut olduğunda APAS'nin kurumasını zorlaştırır.	[3], [13], [22], [24-29]

Çeşitli yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) çalışmaları, süt üretimini ana sıcak nokta olarak tanımlamıştır [30-33]. Yaşam döngüsü değerlendirmesi, bir litre tam yağlı süt gibi bir sistemdeki işlevsel bir birimin çevresel etki profilini sağlar. ISO 14040 standardında tanımlanan beşikten mezara yaklaşımıyla uyumludur. Bu değerlendirme, ürün ve süreçler için sera gazı emisyonlarının karbon ayak izini ve küresel ısınma potansiyelini (KIP) belirlemek için kullanılır.

Atık peynir altı suyunun yüksek biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), uygun şekilde bertaraf edilmediğinde çevresel kirliliğe yol açabilir. Bu durum, Tablo 3'te özetlenmiştir. Ancak, literatürde bildirilen bu değerler önemli ölçüde farklılık gösterebilir [5, 34-38].

Tablo 3. *Peynir ve asidik peynir altı suyunun kimyasal ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı*

Malzeme	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ) (g/L)	Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) (g/L)
Peynir altı suyu	30-50	60-80
Asidik peynir altı suyu (APAS)	52-62	35-51
Tatlı peynir altı suyu (TPAS)	40-102	27-60

1 kg süt yağı, laktoz ve proteinin KOİ değerleri sırasıyla 3 kg, 1.13 kg ve 1 kg'dır [39]. Ancak peynir altı suyu, su (%93.0-94.0), laktoz (%4.5-6.0), proteinler (%0.6-1.1), mineraller (%0.8-1.0), laktik asit (%0.05-0.9) ve yağlardan (%0.06-0.5) oluşur [8]. Dolayısıyla, peynir altı suyunun toplam kuru madde-lerinin %70-75'ini oluşturan laktoz, tatlı peynir altı suyunun (TPAS) KOİ ve BOİ değerlerinin yaklaşık %90'ından sorumludur. Karşılaştırıldığında, asidik peynir altı suyunda (APAS) tatlı peynir altı suyuna göre daha düşük laktoz konsantrasyonları (44-46 g/L karşısında 46-52 g/L) bulunmaktadır, bu da genellikle literatürde bildirilen daha düşük KOİ ve BOİ değerlerine işaret edebilir [40, 41].

Peynir altı suyu, Lor veya Ricotta gibi ikincil ürünlere dönüştürülebilse de, bu süreç ikincil bir peynir altı suyu biyoatığı üretir; bu atık ürünlerin bertarafı, önemli çevresel zararlar nedeniyle AB ve ulusal mevzuatlar tarafından geleneksel yöntemlerle yasaklanmıştır. Ayrıca, atık peynir altı suyunun hayvan yemi olarak kullanılması, yüksek laktoz içeriğinin hayvan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri ve özellikle çiftliklerin işleme tesislerine uzak olması durumunda, peynir altı suyunun olası asitlenmesi nedeniyle artık nadiren tavsiye edilmektedir [42]. Yeni Atık Yönetimi Yönetmeliği, atık bertarafını en aza indirmeyi amaçlamaktadır, bu da peynir altı suyu atıklarının daha verimli bir şekilde işlenmesini gündeme getirmiş ve bu amaca yönelik yenilikçi teknikleri teşvik etmiştir.

Gıda ürünlerinin yaşam döngüsü ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) hakkında detaylı bilgiler, çeşitli uluslararası raporlar ve kaynaklar ışığında ele alınmıştır. YDD'nin gelişimini destekleyen yaşam döngüsü envanterlerinde rapor edilen sera gazı emisyon verileri, çeşitli meta-analizler tarafından incelenmiş ve ürünlerin karbon ayak izi raporlamasında kullanılan Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) çıktılarına dönüştürülmüştür [43]. Özellikle süt ürünleri kategorilerinin enerji yoğun olduğu ve bu durumun ısı süreçlerinde daha fazla enerji verimliliği arayışını önemli kıldığı vurgulanmıştır [44]. Peynir altı suyu tozu üretimi, diğer süt ürünleri gibi süt tozu üretiminden daha yüksek bir GWP'ye sahiptir. Hem peynir altı suyu hem de süt tozlarının kurutulması gerektiği için enerji tüketimi artmaktadır; bazı araştırmacılar peynir altı suyu elde etmek için peynir işleme sırasında tüketilen enerjiyi de hesaba katmaktadır [45]. Farklı süt ürünlerinin tipik enerji tüketimi ve GWP değerleri Tablo 4'te özetlenmiştir [11, 46]. Örneğin, peynir altı suyu tozu üretimi, sıvı süt işlemeye göre daha fazla elektrik tüketir (8.69 kWh/kg ürün), ancak aynı miktarda su kullanımına sahiptir (2.9 L/kg). Sıvı süt ise daha az elektrik tüketir (0.32 kWh/kg) ancak aynı su miktarını gerektirir (2.9 L/kg). Süt tozu üretimi ise enerji yoğunluğu ve su kullanımı açısından benzer şekilde yüksektir (6.51 kWh/kg ve 19.3 L/kg) [46].

Tablo 4. Literatürde süt ürünlerinin işlemci kapısındaki toplam küresel ısınma potansiyeli

Günlük Ürünler	Küresel Isınma Potansiyeli (Kg CO ₂ eşdeğeri/kg)
Kaşar peyniri	14.02
Tam yağlı süt	1.589
Tereyağı	9.680-39.16
Süt tozu	12.353
Kurutulmuş peynir altı suyu (hayvan yemi)	12.100
Yoğurt	1.42-3.35
Peynir (ortalama)	6.7-9.47
Krema	3.5-4.5
Peynir altı suyu tozu	13.108

Peynir altı suyunun işlenmesinde değerlendirme işlemleri, ısıl işlem ve pastörizasyon verimliliğini artırma fırsatları sunar. Brooks ve ark. (2021) tarafından rapor edildiği üzere, yeni bir buhar infüzyon yöntemiyle işlem süresinin en az yarı yarıya azaltılması, yerinde bakım ve temizlik için aksama süresinin azaltılması ve enerji tüketiminin azaltılması gibi iyileştirmeler yapılmaktadır [47]. Bu yaklaşımlar, peynir altı suyu işleminin küresel ısınma potansiyelini (GWP) azaltmaya ve süt işleme tesisleri için net karbon sıfır sonuçlarına ulaşmaya yönelik belirlenmiş yolları göstermektedir [48].

3. Çevresel Etki Değerlendirmesi

3.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Sıcak Nokta Analizi

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), bir ürünün üretimden tüketime ve imhaya kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkisini ölçen standartlaştırılmış bir metodolojidir [49]. Bu metodoloji, ötrofikasyon potansiyeli ve ozon tahribatı gibi çeşitli etki sonuçlarını belirleyip sağlar ve aynı zamanda bir ürünün üretimden tüketime kadar olan küresel ısınma potansiyelini (GWP) de tanımlar [50, 51]. Peynir üretimi ve depolaması için enerji tüketimi yaklaşık olarak 0,91 kWh/kg peynir olarak rapor edilmiştir [52]. İşlemenin elektrik gereksinimi olsa da, atık peynir altı suyu elektriğe dönüştürülerek genel çevresel etki azaltılabilir. Örneğin, asidik peynir altı suyu (APAS), biyogaz üretimi için bir substrat olarak kullanılarak yenilenemeyen enerjinin potansiyel bir alternatifi olan elektrik üretimine katkıda bulunabilir. APAS ve tatlı peynir altı suyu (TPAS), fosil yakıtların yerine geçebilir ve bir süt işletmesinin enerji ihtiyacının önemli bir kısmını anaerobik sindirim yoluyla karşılayabilir. Süt endüstrisindeki karbon ayak izinin büyük bir kısmının (%78-85) çiftlik düzeyinde meydana geldiği kabul edilmektedir. Bu durum, özellikle hayvanların enterik fermentasyonundan kaynaklanan metan emisyonları ve gübre yönetimi ile gübre kullanımından kaynaklanan nitrojen oksit emisyonlarıyla ilişkilidir. Karşılaştırmalı olarak, çiftlik sonrası işleme faaliyetleri (örneğin paketleme, taşıma ve fosil yakıt yakma), bir süt ürünleri işlemecisinin değer zinciri boyunca toplam emisyonların küçük bir kısmını oluşturur (%8, %4 ve %3) [52]. YDD metodolojisi, hayvancılık sistemleri için biyojenik metan emisyonlarının yeniden değerlendirilmesinin önemini göstermiştir [48]. Son değerlendirmeler, özellikle Yeni Zelanda gibi bazı

ülkelerin hayvancılık ve mandıracılık sistemlerinin, kısa bir süre içinde ürettikleri sera gazı emisyonlarını bertaraf edebilecekleri ve bu nedenle net sıfır sera gazı emisyonu sağlayabilecekleri görüşünü ileri sürmektedir.

Süt ürünleri üretiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) içindeki önemi, sera gazı (GHG) emisyonlarının verimliliğe, hammaddelerin tam kullanımına ve ürün hacmine tahsis edilmesine dayanan uygulamaları kapsar. Tahsis modelleri, gıda ürünlerinin genellikle tek bir ürün için üretildiğinin nadiren olduğunu vurgular. İnek üretimi örneğinde, süt ve et birincil sonuçlar oluştururken, aynı süreçlerle ilişkili birçok diğer ürün tedarik zinciri de bulunmaktadır. Bu durum, süt ve et sistemlerinin çevresel etkilerini önemli ölçüde azalttığı bildirilen ve YDD yöntemleri kullanılarak yeniden değerlendirilen yeni yaklaşımlarla araştırılmıştır [53]. Bu yaklaşımlar, hammaddelerin optimal kullanımını sağlamayı, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmayı ve ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini minimize etmeyi hedefler. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, süt ve et sistemlerinin daha geniş bir bakış açısıyla değerlendirilmesini ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarını desteklemektedir.

Süt endüstrisinin çevresel etkisini değerlendirilmesini zorlaştıran neden olan birkaç faktör bulunmaktadır. Endüstrinin parçalı yapısı, birçok küçük ölçekli üreticinin varlığı, kayıtlı peynir altı suyu geri kazanımı ve atık su veya arazi uygulamaları yoluyla deşarjın olmaması gibi sebepler, veri toplamanın ve doğru bir değerlendirme yapmanın zorluğunu artırmaktadır. Bu durum, süt endüstrisinin genel çevresel etkisinin tam olarak anlaşılmasını engellemektedir. Bazı araştırmalar, atık peynir altı suyunun değerlendirilmesinin bazı peynir türlerinin çevresel etkisini %15'e kadar azaltabileceğini öne sürmektedir [31, 54]. Bu tür değerlendirme süreçleri, süt endüstrisinde çevresel sürdürülebilirliği artırmak için potansiyel sunmaktadır. Ancak, küçük ölçekli üreticiler için bu süreçlere erişim veya uygun fiyatlı çözümler sunma konusunda bazı zorluklar olabilir. Atık peynir altı suyunun ileri işlemler için satılabilir hale getirilmesi, bu süreçlerin finanse edilmesi, gerekli kaynakların sağlanması ve altyapının oluşturulması gibi önemli adımları gerektirebilir. Sonuç olarak, süt endüstrisinin çevresel etkilerini daha iyi anlamak ve azaltmak için hem büyük ölçekli üreticilerin hem de küçük ölçekli üreticilerin katılımını teşvik edecek, erişilebilir ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi önemlidir.

3.1.1. Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi

Şirketlerin, kullandıkları doğrudan enerjinin yanı sıra tedarik zincirleriyle ilişkili sera gazı emisyonlarını da değerlendirmeleri gerektiğinden, dünya çapındaki işletmelerin küresel ısınmaya katkısı için değerlendirme araçlarına ve hafifletme seçeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Birçok şirket, kurumsal karbon ayak izini, enerji kullanımı ve ulaşım ile ilişkili toplam emisyonlara göre hesaplamaktadır [52].

Flysjö ve ark. (2014), çeşitli süt ürünleri için çiftlikten müşteriye karbon ayak izini hesaplamak için bir model önermiştir [52]. Bu model, süt ürünlerinin karbon ayak izinin çoğunlukla çiftlik düzeyinde oluştuğunu dikkate alarak, çiğ süt üretiminin farklı ürünler arasında nasıl dağıtılacağını belirlemeyi amaçlamaktadır. Özellikle, çiğ sütün karbon ayak izi, ağırlıklı olarak yağ ve protein içeriğine (1:1.4 oranında) göre tahsis edilmektedir. Arla Foods'un verilerine göre, süt ürünleri için kg başına karbondioksit eşdeğerleri şu şekildedir: taze süt ürünü için 1.1 kg, tereyağı için 8.1 kg, tereyağı karışımı için 6.5 kg, peynir için 7.4 kg, süt tozu için 1.2 kg [52]. Ancak, bu modelin kritik bir yönü, peynir altı suyu gibi

yan ürünlerin nasıl ele alındığıdır. Sütün laktoz içeriği için ayrıca ödeme yapılmadığından, bu yaklaşım peynir altı suyu üretiminin çevresel etkilerini tam olarak hesaba katmamaktadır. Modelde, süt serumundaki kuru maddenin emisyonları hesaba katılmadığından dolayı, peynir altı suyu içeren ürünlerin görünüşte daha düşük bir çevresel etkiye sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle, modelin, peynir altı suyu ve süt tozu gibi yan ürünlerin üretimi ve çiftlik dışı atıkların çevresel etkilerini doğru bir şekilde yansıtacak şekilde iyileştirilmesi gerekmektedir [46, 52, 55].

Evrensel olarak uygulanabilir bir analiz, atık üretmemenin ve peynir altı suyu gibi yan ürünleri kullanmanın veya değerlendirmenin faydalarını göz önünde bulundurarak ürün kaynak kullanımının gerçekçi bir ölçümünü elde eden bir hesaplama matrisi kullanır. Bu yaklaşıma girdi-çıktı YDD yaklaşımı denir ve süt ve süt ürünlerinin kuru madde içeriğinin yanı sıra bireysel süt ürünleri için ortalama operasyonel verileri belirler. Çiftlikte en büyük etkiye sahip olan peynir altı suyu tozları gibi yüksek konsantrasyonlu ürünlerle, süt ürünlerinin çiftçilik faaliyetlerinden kaynaklanan etkilerle ilişkilendirilmesini sağlar. Ancak böyle bir yaklaşım, benzer düzeyde teknolojiyi paylaşan farklı üretim tesislerine bir şekilde bağlı olabilir [56]. Bu yaklaşım, Uluslararası Sütçülük Federasyonu'nun süt ürünlerinin karbon ayak izini hesaplamaya yönelik yönergeleri tarafından tavsiye edilmektedir; burada farklı girdiler belirli tahsis faktörlerine sahiptir ve çiğ süt, süt kuru maddelerine göre tahsis edilir. Sonuç olarak, daha yüksek kuru maddeleri daha yüksek bir karbon ayak izi sağlar. Ancak farklı süt kuru maddeleri arasında ayırım yapmaz [52]. Dolayısıyla bu yaklaşım, tartışıldığı gibi, farklı süt bileşenlerinin daha yüksek karbon ayak izi değerleriyle ilişkili daha yüksek çevresel etkiyi belirlemede başarısız olabilir [39].

Yöntemler, operasyonların daha geniş etkilerini gerçekleştirmekte başarısız olurken, süt ürünleri üretim zincirinin tamamını dikkate alan diğer YDD yaklaşımları, en büyük sorunları değerlendirerek ve iyileştirmeler sağlamak için adımlar atarak çevresel zararın daha etkili bir şekilde azaltılmasını sağlayabilir. Böyle bir yaklaşımın, üreticilerin sürdürülebilir uygulamalara girişmelerine yardımcı olduğu, böylece çevreye verilen zararı hafiflettiği ve aynı zamanda bu tür çabaların performansını endüstri ortalamalarıyla karşılaştırdığı bildirilmektedir [32].

4. Peynir Altı Suyunun Değerlendirmesi

Peynir altı suyunun ekonomik sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi, atık yönetimi ve geri kazanım açısından önemli rol oynamaktadır. Geleneksel olarak, peynir altı suyu, değerli bileşenlerin geri kazanılabilmesi için filtreleme işlemleriyle işlenir. Bu süreç, içeceklerden, reçellere, konservelelere, soslara, bebek mamalarına, unlu mamullere, et ürünlerine, kozmetiklere, fonksiyonel gıdalara, diyet ve nutrasötik ürünlere kadar geniş bir yelpazede kullanılmadan önce uygulanır. Son yıllarda, peynir altı suyunun tüketim mallarında kullanımı hacim ve ekonomik değeri açısından artmaktadır, bu da atık peynir altı suyu üretiminin artışıyla ilgili umut verici bir gelişmedir [57]. Bu artış, peynir altı suyunun potansiyelini değerlendirme ve farklı endüstrilerde kullanımını genişletme fırsatı sağlamaktadır. Literatürde, peynir altı suyunun değerlendirilmesi için çeşitli teknikler ve yöntemler rapor edilmiştir. Bu yöntemler arasında filtreleme, ayırma işlemleri, sıcaklık işlemleri, membran teknolojileri ve biyoteknolojik süreçler gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu teknikler, peynir altı suyundan faydalı bileşenlerin geri kazanılmasını ve ekonomik olarak değerlendirilmesini sağlar. Peynir altı suyunun değerlendirilmesi

için tek bir nihai çözüm olmamasına rağmen, sürekli olarak gelişen ve yenilikçi değerlendirme teknikleri literatürde yer almaktadır. Bu tekniklerin ilerlemesi, peynir altı suyu gibi süt endüstrisi yan ürünlerinin sürdürülebilir yönetimini ve ekonomik kullanımını desteklemeye yönelik önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Peynir altı suyu, zengin bir laktoz ve protein kaynağı olarak doğası nedeniyle atık yönetimi açısından çekici bir alternatif sunmaktadır. Bu özellikleri, atık peynir altı suyunun katma değerli ürünlere veya bileşenlere dönüştürülmesini teşvik ederek atık bertaraf sorunlarının üstesinden gelinmesine yardımcı olur [25, 35]. Geleneksel imha yöntemlerine kıyasla, bu tür değerlendirme süreçleri "daha temiz" kullanım araçları sağlayarak sürdürülebilirliği artırmaya odaklanır [2]. Ancak, ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından bazı zorluklar bulunmaktadır. Özellikle küresel atık miktarlarının artmasıyla birlikte, tek bir değerlendirme süreci veya yaklaşımının tüm işletmeler için uygun olmadığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle, ekonomik olarak dezavantajlı işletmeler ve ekonomiler için uygun maliyetli ve verimli tekniklerin geliştirilmesi gerekmektedir, bu da daha sonra fırsatlar ve dayanıklılık sağlayabilir [42]. Son yıllarda, biyoyakıtların, biyo bazlı kimyasalların ve organik yan ürünlerin üretiminde atık kullanımının potansiyeli konusunda artan bir farkındalık bulunmaktadır. Bu süreçlerin benimsenmesi, 2050 yılına kadar dünya genelinde ilk iklim nötr bölgelerinin oluşturulması ve Avrupa Birliği'nin döngüsel bir bioekonomiye doğru ilerlemesi gibi hedeflerle uyumlu olduğu belirtilmektedir [58]. Peynir altı suyu atıklarına yönelik çeşitli değerlendirme stratejileri bulunmaktadır. Bu stratejiler, atık peynir altı suyunun ekonomik olarak değerlendirilmesini ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamak için çeşitli teknikler ve yaklaşımları içermektedir. Bu konuda daha fazla bilgi ve ayrıntı, aşağıdaki Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Değerleme tekniklerine genel bakış

Değerleme	Örnek teknikler	Ürünler	Referanslar
Peynir altı suyu proteini ve laktoz geri kazanımı	• İki Aşamalı Ultrafiltrasyon • Nanofiltrasyon • İyon değişim kromatografisi • Membran filtrasyonu	• Geri kazanımın: • Sığır serum albumini • Laktoferrin • İmmünoglobulinler • β-Laktoglobulin • α-Laktalbumin • Yüksek saflıkta peynir altı suyu proteinleri • Laktoz	[22], [59]

Peynir altı suyu proteini bazlı içecekler	• Peynir altı suyu yan ürünlerinin fermentasyonu • Ultrafiltrasyondan sonra kalan proteinsizleştirilmiş peynir altı suyu veya peynir altı suyu süzöntüsü • Peynir altı suyundan türetilen laktozun fermentasyonu • Etanol damıtma	• Probiyotik içecekler • Spor İçecekleri • Fonksiyonel içecekler • Fermente edilmemiş fonksiyonel içecekler • Etanol • Peynir altı suyu votkası, beyaz viski ve butik alkollü içkiler	[60-63]
Peynir altı suyu fermentasyon yan ürünleri	• Fermentasyon ve damıtma • Koyu fermentasyon	• Etanol • Biyohidrojen ve uçucu yağ asitleri	[58],[62],[64], [65]
Gıda ve Malzemeler	• Buharlaştırma, ters ozmoz, kristalizasyon ve kurutma • Membran teknolojileri • Asit ısı kaynaklı pıhtılaşması • Membran filtrasyonu • Mikropartiküle peynir altı suyu proteini • Asit-ısı kaynaklı pıhtılaşma	• Peynir altı suyu tozları • Peynir altı suyu proteini izolatları ve konsantreleri • Paneer, Queso Blanco ve Ricotta gibi peynirler • Peynir altı suyu kreması • Diyetetik/fonksiyonel gıdaların güçlendirilmesi • Yağ ikame maddesi olarak kullanın • Lor peyniri üretimi • Ricotta üretimi	[2],[16],[24], [66-69]
Kimyasallar ve koruyucular	• Asidik peynir altı suyunun hardalla otoklavlanması	• Koruyucular • Gıda koruması • Biyoetanol	[70-73]

	• Biyoaktif bileşikleri serbest bırakmak için peynir altı suyunun hidrolizi veya fermentasyonu • Enzimatik ve mikrobiyal katalizli hidroliz ve fermentasyon • Mezofilik laktik asit bakterileri fermentasyonu • Membran entegre hibrit reaktör sistemi • Anaerobik çamurun aşısı olarak kullanıldığı asidojenik fermentasyon	• Bakteri öldürücü dezenfektan • Asetik asit (%98 saflık) • Hidrojen, asetat, bütirat, propiyonat, valerat, laktat ve etanol üretimi
Hat içi süreçler	• Biyorafineriler ve biyoproses entegrasyonu • Hat içi ultrafiltrasyon • Beslemeli Kesikli Biyoreaktör	• Biyoyakıtlar ve biyokimyasallar [58], [74-76] • Besin, antioksidan ve biyoaktif geri kazanım • Hidrojeller, biyoplastikler ve biyoyakıtlar • Protein ve laktoz geri kazanımı • Gıda jelleri, protein konsantreleri, probiyotikli peynir altı suyu peynirleri • Asidik peynir altı suyunun <i>Pseudomonas taetrolens</i> tarafından laktobiyonik asit üretimi için substrat olarak kullanılması
Plastikler, filmler ve kaplamalar	• Biyorafineriler	• Polihidroksialkanoatlar [58],[68],[77] • Yenilebilir filmler [78]

	• Protein-polisakkarit/antimikrobiyal ajan biyofilmlerinin dehidrasyonu • Peynir altı suyu fermentasyonu ve polivinil alkol filminin hazırlanması	• Peynir için peynir altı suyu proteini-polisakkarit/anti-mikrobiyal madde kaplamaları • Peynir dilimlerinin korunması için laktik asit bakterileri fermente edilmiş peynir altı suyu taşıyan antifungal plastik filmler
İleri teknoloji	• Konsantrasyon ve fraksiyonlama için çok aşamalı membran filtrasyonu • Nanofiltrasyon elektrodializi	• Kirlenmeye veya kalite sorunlarına neden olan istenmeyen protein agregatlarının, kazeinlerin, mikroorganizmaların ve yağ globüllerinin uzaklaştırılması nedeniyle potansiyel olarak artan fonksiyonel özelliklere sahip peynir altı suyu proteini konsantreleri veya izolatları • Asidik peynir altı suyunun içerdiği mineraller (kalsiyum ve magnezyum)
Mikrobiyal ve Enzimatik Biyoprosesler	• Yağ üreten mikroorganizmalar biyokütle üretimi • Mikrobiyal ekim • Mikrobiyal ve enzimatik biyoprosesler • <i>Saccharomyces cerevisiae</i> tarafından fermentasyon • Batık fermentasyon	• Substrat olarak peynir altı suyunu kullanarak endüstriyel açıdan ilgi çekici tek hücreli yağların üretimi • Peynir altı suyunun teknik enzim üretimi için substrat ve indükleyici olarak kullanılması • Nutrasötikler ve biyoaktif peptitler, prebiyotikler, ekzopolisakkaritler, organik asitler, bakteriyosinler, izof-

		lavon aglikonlar ve endüstriyel açıdan önemli enzimlerin üretimi • Gıdaların fonksiyonel ve besinsel açıdan zenginleştirilmesi ve yeni fonksiyonel gıdaların geliştirilmesi için biyoaktif bileşiklerle zenginleştirilmiş peynir altı suyu • Laktoz kaynağı olarak peynir altı suyu tozu kullanılarak resveratrol üretimi • Sürdürülebilir yem için mantar biyokütlesi üretiminde peynir altı suyu ve portakal pekmezinin kullanımı
Geleneksel Olmayan İşleme	• Termal, ultrasonik ve termosonikasyon ön işlemleri • Peynir altı suyu proteini izolasyonunun ultrasonik modifikasyonu • Darbeli elektrik alanları • Ohmik Isıtma • pH değişimi ve ultrason işlemi • Çoklu frekanslı ıraksak ultrason • Yüksek hidrostatik basınç/elektroteknolojiler/ultrason • Elektroaktivasyon	• Peynir altı suyundan geliştirilmiş laktoz geri kazanımı [86-93] • Yapısal ve fonksiyonel özellikleri değiştirilmiş peynir altı suyu proteini izolasyonunun üretimi • Peynir yapımında ve üretilen peynir altı suyunda ileri işlemler için veya süzme peynirden peynir altı suyunun daha iyi uzaklaştırılmasında termal olmayan patojenik kontroller olarak darbeli elektrik alanlarının kullanılması

- Yeni işlevler için değiştirilmiş fizyokimyasal özelliklere sahip peynir altı suyu proteini izolatının üretimi
- Peynir altı suyu proteini izolatının emülsiyon stabilitesi de dahil olmak üzere fizyokimyasal özelliklerin modifikasyonu
- Emülsiyonların jelleşme özelliklerini geliştirmek için peynir altı suyu proteini emülsiyon jellerinin modifikasyonu
- Peynir altı suyunda ısıtılmanın tuzaklarından kaçınırken yeni gıda ürünleri/bileşikleri üretmek için özel işlemlerde kullanılabilir
- Geleneksel kimyasal izomerizasyona göre geliştirilmiş laktuloz üretimi

4.1. Peynir Altı Suyu Proteini Bazlı İçecekler

Peynir altı suyu proteinleri, çeşitli alanlarda önemli özelliklere sahiptir. Isıya duyarlılık, diğer proteinler ve karbonhidratlarla etkileşimler ve modifikasyonlar (hidroliz, agregasyon, konjugasyon), endüstriyel üretim, işleme uygunluk bu proteinlerin temel özelliklerindendir. Ayrıca, lezzet ve depolama üzerindeki etkileri, kalite yönleri ve beslenme, spor, egzersiz ve sağlık alanlarındaki rolleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu proteinler, spor ve egzersiz bilimi, bebek beslenmesi ve tıp/eczacılık gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [94].

Peynir altı suyu geleneksel olarak bir atık ürün olarak görülse veya kompozit gıdalarda bir bileşen olarak kullanılsa da, ticari peynir altı suyu bazlı yiyecek ve içecek ürünlerine olan ilgi giderek artmaktadır. Ticari peynir altı suyu içeceklerinin üretimi 1970'li yıllarda başlamış olsa da son yıllarda peynir altı suyu bazlı içeceklere olan ilgi ve çeşitlilik artmıştır [2]. Son on yılda peynir altı suyu ve peynir altı suyu bileşenleri, sade veya katkılı meyve suyu, süt veya süt permeatı veya nutrasötik bileşikler ve/veya probiyotikler/prebiyotikler gibi peynir altı suyu bazlı içeceklerin üretiminde ticari olarak giderek daha

fazla kullanılmaktadır. Piyasada pek çok peynir altı suyu proteinli içecek mevcuttur. Bu bağlamda, gıda bileşenlerinin inovatif kullanımına yönelik yapılan çalışmalar, ürünlerin duyu ve işlevsel özelliklerini geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır [95]. Bununla birlikte, antimikrobiyal aktivite, büyük ölçüde ilgili bakteriyosin ve asitlerin üretimi nedeniyle uygulanan fermentatif suştan etkilenmiştir. Bununla birlikte, geliştirilen üretim süreçleri üretim hatlarına kolayca dahil edilebilir, böylece atık su hacmi ve arıtma maliyetleri en aza indirilebilir. Bu, yeni ürün geliştirme seçenekleri ve potansiyel pazar fırsatları sunabilir. Bununla birlikte literatürde çok çeşitli peynir altı suyu bazı içecekler geliştirildiği bildirilmiştir [2].

Dünya genelinde sütlü içeceklere, özellikle de sağlıklı ve fonksiyonel içeceklere olan yüksek talep, peynir altı suyu gibi yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından fırsatlar sunmaktadır. Peynir altı suyu fermentasyonunda probiyotik mikroorganizmaların kullanılması, organik asitler bakımından zengin içecekler elde edilmesini sağlayabilir. Bu kapsamda kefir, fermente süt ürünleri içinde önemli bir örnek teşkil etmektedir. Eryılmaz ve ark. (2021), farklı kefir kültürleri ve süt markalarından elde edilen kefirlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini karşılaştırdığı çalışması, fermente ürünlerin özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemler açısından önemli bir referans sunmaktadır. Bu çalışma, süt endüstrisinde katma değerli ürün geliştirme ve peynir altı suyu gibi yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından önemli bir bağlam oluşturmaktadır [96].

4.1.1. Peynir Altı Suyu Proteini ve Laktoz Geri Kazanımı

Laktoz, glikoz ve galaktoz üretmek için doğrudan fermentasyona veya hidrolize edilmeye uygunken, proteinler yüksek besin değerine sahip olup gıda ve farmasötik ürünlerde çok yönlü fonksiyonel özellikler sunarlar [97]. Bu nedenle, laktoz ve proteinin geri kazanımı, peynir altı suyunun biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) yükünün azaltılmasına yardımcı olabilir ve peynir altı suyunun bertaraf edilmesinden kaynaklanan çevre kirliliği sorununun çözülmesine katkı sağlayabilir.

Peynir altı suyunu içeren proteinler ve laktoz peynir altı suyu çözeltilerinden geri kazanılabilir veya uzaklaştırılabilir [26]. 30 kDa'lık bir membran kullanan iki aşamalı bir ultrafiltrasyon işlemi, sığır serum albümini (BSA), laktoferrin (LF) ve immünoglobulinleri (Igs) tutulmasını sağlar. Sıralı bir 10 kDa membranı, beta-laktoglobulin (β -LG) ve alfa-laktalbumini (α -La) tutabilir. 1-kDa'lık bir nanofiltrasyon membranı, izole edilmiş peptitleri, ultra filtrelenmiş permeatta bulunan laktozdan ayırmaktadır. pH, membran seçiciliğini etkiler. İzoelektrik noktanın (pI) üzerindeki veya altındaki bir pH, peynir altı suyu proteinlerinin boyutunu ve dolayısıyla dağılımını etkilemektedir [59]. Dikkatlice seçilmiş membran molekül ağırlığı kesintileri kullanılarak seçici ayırma mümkündür ve protein denatürasyonunu önler [98].

İyon değiştirme kromatografisi (IEC), peynir altı suyu proteinlerini yüksek saflıkta üretmek için kullanılan etkili bir yöntemdir [99]. Bu yöntem genellikle dört adımdan oluşur ve proteinlerin elektrik yüklerine ve izoelektrik noktalarına (pI) dayanır (Tablo 6). Proteinler, pH değerine bağlı olarak pozitif veya negatif yüklü olabilir. pI'nin altındaki pH değerlerinde proteinler pozitif yüklüdür ve bu durumda katyonik iyon değiştiriciler tarafından emilirler. pI'nin üzerindeki pH değerlerinde ise proteinler negatif

yüklüdür ve anyonik iyon değiştiriciler tarafından emilirler. pH seviyesinin kontrol edilmesi, proteinlerin belirli koşullarda seçici olarak ayrılmasını sağlar. Ancak, proteinlerin denatürasyonu veya iyon değiştirici matrislere geri dönüşümsüz bağlanması, prosesin verimliliğini azaltabilir. Bu nedenle, işlem sırasında aşırı pH değerlerinden kaçınılmalıdır [22]. Peynir altı suyundan geri kazanılan proteinlerin özellikleri Tablo 6'da özetlenmiştir.

Tablo 6. *Peynir altı suyu proteinlerinin bileşimi ve fiziksel özellikleri*

Protein	Peynir altı suyu içeriği (%)	Molekül ağırlığı (kDa)	İzoelektrik nokta (pH)	Beslenme ve fonksiyonel faydalar
β -Laktoglobulin	48-58	18.0-18.36	5.2-5.5	• Esansiyel ve dallanmış amino asitlerin kaynağı • Retinol alımını artırır ve mükemmel jelleşme, emülsifiye etme ve köpürme özelliklerine sahiptir • Bir alerjen olarak kabul edilir
α -Laktoglobulin	13-25	14.0-14.15	4.2-4.8	• Başlıca insan sütü proteini • Esansiyel ve dallanmış amino asitlerin kaynağı • Kalsiyumu bağlar. Jelleřmeyen bir proteindir
Glikomakropeptid	10-20	7.0-8.6	<3.8	•Dallanmış amino asitlerin kaynağı
Sığır Serumu Al-bümini	5-10	66.0-69.0	4.7-5.1	• Esansiyel amino asit kaynağı

İmmünoglobulin-ler	8-15	150-1000	5.0-8.3	• 'Pasif bağışıklık' sağlayabilir
Laktoferrin	1-2	77.0-78.0	7.9	• Bakterisidal bir protein. • Demiri bağlar ve tümör oluşumunu engelleyebilir.
Laktoperoksidaz	0.5	78.0-89.0	9.6	• Antibakteriyel aktiviteye sahiptir.
Lizozim	0.0002	14.30	11.0	• Antimikrobiyal aktiviteye sahiptir.

Spesifik gelişmiş fiziksel işlevsellğe veya besinsel/fizyolojik işlevsellğe sahip bireysel peynir altı suyu proteinlerinin fraksiyonlarının daha da geliştirilmesi mümkün olabilir. Peynir altı suyu proteinlerini parçalamak için şu anda kromatografik ve membran ayırma yöntemleri kullanılmaktadır, ancak sulu iki fazlı ekstraksiyon ve manyetik balıkçılık gibi gelecek için umut vaat eden alternatif yöntemler de vardır [100]. Bununla birlikte, peynir altı suyu protein konsantresi ve hidroksipropil metil selülozdan oluşan iki fazlı sulu sistemler, α -laktalbumin ve β -laktoglobulinin seçici ayrılması için kullanılabilir [101].

Laktoz, genellikle ultrafiltrelenmiş ve proteinden arındırılmış peynir altı suyu permeatından izole edilir. Bu izolasyon süreci, konsantrasyon, kristalleşme, ayırma ve kurutma adımlarını içerir. Konsantrasyon aşamasında, ultrafiltrelenmiş permeat buharlaştırma ile yoğunlaştırılır. Daha sonra, konsantre edilmiş permeat içindeki laktoz kristalleştirilir ve santrifüjleme veya dekantörler gibi yöntemlerle ayrılır [26]. Son olarak, ayrılan laktoz kristalleri kurutulur. Mikrofiltrasyon (0.2 μ m gözenek boyutu), ultrafiltrasyon (5 kDa moleküler ağırlık sınırı), iyon değişimi ve ters ozmoz gibi teknikler kullanılarak %99.8 saflıkta ve %74 verimle laktoz geri kazanılabilir [102]. Ancak, peynir altı suyunun elektrodiyaliz işlemine tabi tutulması veya tuz içeriğini azaltmak için iyon değişim membranları (demineralizasyon) kullanılması, ardından buharlaştırma, kristalleştirme, santrifüjleme ve kurutma işlemlerinin sırasıyla yapılmasıyla laktozun %87.5'i geri kazanılabilir. Proteini uzaklaştırmak için iyon değiştirme reçineleri ile işlenmediğinde ise peynir altı suyundan yaklaşık %97 oranında daha yüksek laktoz saflığı elde edilebilir [24, 103, 104].

4.1.2. Peynir Altı Suyu Fermantasyon Yan Ürünleri

Peynir altı suyunda bulunan laktozun etanole dönüştürülmesi, bu yan ürünün çevresel etkisini azaltmanın etkili bir yoludur. Bu dönüşüm süreciyle biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) yaklaşık %75 oranında azaltılmakta ve daha önce atık olarak değerlendirilen peynir altı suyu ekonomik bir girdiye dönüştürülmektedir [13]. Peynir altı suyunun laktoz içeriği, onu fermantasyon ile alkollü içki üretimine

uygun kılmaktadır. Bazı araştırmacılar çalışmalarında, laktozu glikoz ve galaktoza hidrolize eden ve bu monosakaritleri fermantasyon yoluyla etanole metabolize eden *Kluyveromyces marxianus*'ın yanısıra ekzojen enzimler ve *Saccharomyces cerevisiae* gibi diğer maya türleri de kullanılmıştır. Peynir altı suyundan etanol üretim verimliliği %75.9 ile %96.6 arasında değişmektedir. Bu farkın, farklı fermantasyon substratlarından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [13].

Düşük laktoz içeriğine sahip (%3-5 a/a) peynir altı suyunun fermantasyonu, genellikle düşük etanol konsantrasyonlarıyla (%2-3 v/v) sonuçlanmaktadır. Öte yandan, konsantre peynir altı suyu permeatı (%9.8 laktoz) kullanıldığında, elde edilen etanol konsantrasyonu belirgin şekilde artmakta ve ortalama %5.45 v/v düzeyine ulaşmaktadır. Ayrıca, konsantre permeat kullanımıyla elde edilen üretim verimliliği %89.4 olup, bu oran konsantre olmayan permeatın %87.4'lük verimliliğine kıyasla anlamlı olmasa da hafif bir artış göstermektedir [62, 64]. Bununla birlikte, konsantre peynir altı suyu permeatının üretimi ek işlem gerektirir, bunun sonucunda üretim süresi ve maliyetleri artar, dolayısıyla genel verimlilik azalır ve muhtemelen marjinal olarak iyileşen üretim verimliliği de olumsuz etkilenir. Benzer şekilde %80 laktoz konsantrasyonuna sahip demineralize peynir altı suyunun artan etanol konsantrasyonları gösterdiği rapor edilmiştir [105]. %10, %15 ve %20 w/v demineralize peynir altı suyu konsantrasyonları, ham peynir altı suyu fermantasyonu ile karşılaştırıldığında benzer şekilde artan kabul edilebilirlik ile sırasıyla %5.0, %7.6 ve %9.5 v/v etanol konsantrasyonları vermiştir [105]. Diğer peynir altı suyu içeceklerine benzer şekilde bu, ustalık isteyen ürünler pazarının önceki on yılda istikrarlı bir şekilde genişlemesiyle gelişim fırsatları sağlayabilir. Peynir altı suyu bazlı yeni ürünlerin geliştirilmesi, işletmelere ekonomik bir avantaj sağlarken, aynı zamanda yüksek bir fiyata satılabilecek bir ustalık becerisi ile üretilen bir ürünü de sağlayabilir. Buna karşılık, fermente peynir altı suyunun distilasyonunun, CO₂ emisyonlarını işlevsel birim başına 8.4 kg azalttığı ve maltlı arpa eşdeğerlerine kıyasla üretim sürecine 0.44 kg daha az su eklenmesini gerektirdiği gösterilmiştir [62]. Bununla birlikte, atık peynir altı suyundan mevcut mikroorganizma kültürleri ile alkol üretimi, gelişmekte olan ülkeler ve küçük kuruluşlar için uygun ve ucuz bir yöntem olarak değerlendirilebilir [64].

Atık peynir altı suyu yönetimi için belki de daha umut verici bir başka seçenek de ışıksız şartlarda yapılan fermantasyondur (IF). IF, çeşitli bakteri türlerinin (yani Clostridium ve Enterobacter) asidojenik metabolik yoluyla H₂, CO₂ ve organik asitler üretmek için karbonhidratları, proteinleri ve lipitleri substrat olarak kullanabildiği dolaylı bir teknolojidir [106]. IF, atık peynir altı suyunun yüksek karbonhidrat içeriğini kullanarak anaerobiyoz yoluyla biyohidrojen ve uçucu yağ asidi (VFA) üretimini içerir. Ancak IF termodinamik olarak elverişsizdir, kontrolü zordur ve substrat bileşimine, organik yükleme hızına, aşı tipine ve ön işleme, reaktör tipine ve çalışma rejimine, sıcaklığa, pH'ya, su basıncı ve hücrenin ortamda bekleme süresine duyarlıdır. Bu, laktoz ve VFA üretimi nedeniyle teorik maksimum 8 mol H₂/mol olmasına rağmen 1-4 mol H₂/mol verimle sonuçlandığı belirlenmiştir [58, 65]. Bununla birlikte IF, yenilenebilir substratların kullanımı, işlem basitliği ve ışıktan bağımsız olması nedeniyle alternatif biyolojik proseslerle karşılaştırıldığında, büyük ölçekli uygulama potansiyeli yüksek olan yenilenebilir H₂ üretebilmektedir. Bununla birlikte, hidrojen verimi ve üretim oranları genellikle endüstriyel uygulama için çok düşüktür, ancak yüksek hızlı reaktörlerin çalıştırılması, iki aşamalı bir IF sisteminin ve bunu

takip eden metanojenik aşamanın kullanılması bu sorunları önemli ölçüde azaltabilir. Ancak bu tür teknikler ve konfigürasyonlar daha kapsamlı araştırmalar gerektirir [107].

Günümüzde biyoyakıt üretimi için kullanılan hammaddeler, biyodizel veya biyoetanol genellikle gıda ve tarım kökenli ürünlerdir [108]. Araştırmalar, uçucu yağ asitlerinin (VFA), yağ üreten mikroorganizmalar tarafından ucuz alternatif karbon kaynakları olarak kullanılabileceğini ve bu asitlerin lipitlere, ardından biyodizele dönüştürülebileceğini göstermiştir [109]. Ancak fermente atık sudaki VFA konsantrasyonu çok düşüktür ve bu da ticarileştirme için bir engeldir [110]. Ticari üretim taleplerini tam olarak karşılayan VFA üretimi için arıtma çamuru fermantasyonunun tam ölçekli uygulamaları, zayıf fermantasyon yoğunluğu, düşük VFA konsantrasyonu ve zayıf substrat dönüşüm oranı nedeniyle hala nadiren rapor edilmektedir. Liu ve ark. (2019) tarafından, VFA üretiminde potansiyel ticari uygulama için kanalizasyon çamurundan VFA üretimini artırmak amacıyla anaerobik dinamik membran reaktörü (AnDMBR) kullanan yeni bir sıvı fermantasyon stratejisi önerilmiştir [111]. VFA üretkenliği ve konsantrasyonunun yanı sıra substrat dönüşüm oranı da sırasıyla 7.8 kg VFA - COD/m³ gün, 60 g/L ve 0.38 kg VFA – COD/kg VS'ye ulaştığı bildirilmiştir. Ayrıca dinamik membran yaklaşık 70 gün boyunca stabil olarak çalıştırılabilmiştir. Bu teknolojileri kullanarak VFA'ların üretilmesi, gelecekte biyodizelin ticari üretimine yardımcı olacaktır.

5. Gıda Katkı Maddeleri

Peynir altı suyu ayrıca gıdaların içinde bir bileşen olarak veya nano, mikro ve ultrafiltrasyon gibi katı bileşen geri kazanım teknikleri kullanılarak atık peynir altı suyundan kompozit gıda ürünleri üretmek için de kullanılabilir. Sonuç olarak, %25-30 yağ içeriğine sahip peynir altı suyu kreması, atık peynir altı suyundan çıkarılabilir ve peynir veya tereyağı üretiminde sütün standardizasyonu için kullanılabilir. Benzer şekilde, tatlı koyulaştırılmış peynir altı suyu, ters ozmoz ve nanofiltrasyon teknikleri kombine edilerek ya da ayrı ayrı kullanılarak üretilir. Bu tür teknikler, peynir altı suyu kuru madde miktarını %65'e kadar artırarak viskoz bir ürün oluşturur [2]. Benzer şekilde, içerilen laktoz benzer bir ultrafiltrasyon, iyon değişimi ve ters ozmoz serisi yoluyla geri kazanılabilir ve %99.8'lik bir saflık ve %74'lük genel bir geri kazanım elde edilebilir. Bununla birlikte, benzer filtreleme işlemleri laktoz ve peynir altı suyu proteininin sırasıyla %90 ve %80 oranında geri kazanılmasını sağlar [2].

Bu tür yan ürünler, daha önce tartışıldığı gibi içeceklerde bir bileşen olarak veya içeceklerin protein, esansiyel amino asit ve C vitamini içeriğini arttırmak için kullanılabilir. Sonuç olarak bu ürünler rahatsızlıklardan ve dejeneratif hastalıklardan muzdarip olanlar için uygun olabilir [2]. Benzer şekilde peynir altı suyu proteinleri, önemli biyolojik aktiviteleri ve kan şekeri homeostazisi, metabolizma ve sinir fonksiyonu için hayati önem taşıyan yüksek orandaki dallı zincirli amino asitler nedeniyle fonksiyonel nutrasötiklerdir [68]. Ek olarak, biyoaktif peynir altı suyu bileşenleri yağlanmayı, kardiyovasküler ve gastrointestinal sistemleri modüle edebilir. Bu nedenle, bu bileşiklerin fonksiyonel veya diyetel gıdaların zenginleştirilmesinde kullanılma potansiyeli nedeniyle bilim insanlarının ve tüketicilerin ilgisini çekmeye devam etmektedir [68].

Alternatif olarak, peynir altı suyu proteininden türetilen peptitler (proteaz enzimi kullanılarak farklı enzimatik işlemlerle üretilen protein hidrolizatları), sınırlı gastrointestinal stabiliteye ve biyoyararlanıma sahip olan geleneksel tuz bazlı zenginleştirme yöntemlerine kıyasla iyi bir demir bağlayıcı alternatif olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla peynir altı suyu proteinleri, demir emilimini ve biyoyararlanımını artırdığı iddiasıyla gıda maddeleri ve takviyelerde demir takviyesi için bir alternatif sağlayabilir. Peynir altı suyu proteininin alkalazla hidrolizi sırasında salınan peptitler, güçlü demir bağlayıcı özellikler gösterir. Bu nedenle peynir altı suyundan türetilen peptid-demir kompleksleri, biyoyararlanımlı bir demir taşıyıcı olarak kullanılabilecek potansiyel yeni fonksiyonel bileşenlerdir [112].

5.1. Hat İçi Süreçler

Son çalışmalar, tartışıldığı gibi, biyoyakıt (metan, hidrojen ve etanol), elektrik enerjisi ve/veya kimyasal emtia (karboksilik asitler, proteinler ve biyopolimerler) üretimi yoluyla atık peynir altı suyunun değerlendirilmesi amacıyla biyorafineriler olarak adlandırılan arıtma süreçlerinin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Bu tür süreçler uygun maliyetli ve verimli değerlendirme için çok önemlidir. Süt endüstrisinde çeşitli değerli ürünler üretmek ve sıfır atık yaklaşımına ulaşmak için iki veya daha fazla fiziksel, kimyasal ve biyolojik sürecin bir kombinasyonu (aynı zamanda biyoproses entegrasyonu olarak da bilinir) kullanılabilir [58]. Ana fikir, gelişmiş biyotransformasyon ekstraksiyon teknikleri kullanılarak yeni gıdalara dahil edilmek üzere yüksek katma değerli bileşiklerin (besinler, antioksidan, biyoaktif moleküller) geri kazanılması da dahil olmak üzere, peynir altı suyunun toplam değerlendirilmesi için tüm süreçleri çok adımlı bir biyolojik arıtma stratejisine entegre etmektir. Geriye kalan üründen hidrojeller, biyoplastikler ve biyoyakıtlar gibi başka yeni malzemeler de elde edilebilmektedir. Örnek tekniklere mükemmel bir genel bakış Asunis ve ark. (2021) tarafından sağlanmıştır [58].

Daha yeni çalışmalar, peynir atığı akışlarındaki entegre ultrafiltrasyon süreçlerine odaklanılmış ve böylece küçük ve orta ölçekli süt ürünleri üreticilerine, proteinlerin ve laktozun geri kazanılması yoluyla daha fazla değer kazanma fırsatları sunarak sürdürülebilirliklerine katkıda bulunmuştur. Yakın zamanda tatlı keçi peynir altı suyu bileşenlerinin geri kazanılmasına yönelik entegre bir süreç tasarlanmıştır. Bu süreç filtrasyon, santrifüjleme ve pastörizasyon, ardından sıralı membran işlemleri, ultrafiltrasyon/seyreltme, ultrafiltrasyon permeatın seyreltme modunda nanofiltrasyonu ve nanofiltrasyon filtreden geçen maddelerin konsantrasyonunu/seyreltilmesini içermekte olup bu tür yenilikçi prosesler gıda jelleri, toz halindeki protein konsantreleri ve probiyotikli peynir altı suyu peynirleri dahil olmak üzere yenilikçi peynir altı suyu türevi ürün üretimini mümkün kılabilir. Dolayısıyla bu tür sistemler küçük ve orta ölçekli işletmeler için muhtemelen ekonomik açıdan uygundur [74, 75].

5.1.1. Diğer Kullanımlar ve Geleneksel Olmayan Teknikler

Karbondioksitin atmosferden uzaklaştırılması, küresel ısınmayı azaltmak için son zamanların cazip yöntemlerinden biridir. Peynir altı suyunun potansiyel bir uygulaması, karbondioksiti yakalamak için bir karbondioksit havuzu (sorbent) olarak kullanılması olabilir. Böyle bir teknik, ticari peynir altı suyu proteini izolatu (WPI) kullanılarak maksimum %0.4 karbon yakalama kapasitesi ve 130°C ve 170°C giriş gazı sıcaklıkları altında yapılan test koşullarında, püskürtürerek kurutulmuş WPI sırasıyla %0.78 ve %0.74 yakalama kapasitesi göstererek ümit verici sonuçlar elde etmiştir. Ancak bu değerler, endüstriyel

uygulamalar açısından yetersiz kalmaktadır. Ayrıca bu strateji, yakalama kapasitesi azaldığında bile, kullanılmış TEPA-fonksiyonlandırılmış epoksi reçinesi (TEFE) biçiminde atık üretmeye devam eder. Ek olarak, TEFE üretimi atık peynir altı suyunun daha fazla işlenmesini gerektirir; bu da daha fazla sera gazı emisyonuna yol açar. Bu nedenle, TEFE'nin bir karbon havuzu olarak kullanımı, üretim sürecindeki emisyonlar nedeniyle etkisini kaybedebilir; ancak aynı proses içinde yerinde (hat içi) bir karbon havuzu olarak yine de faydalı olabilir [99].

Literatürde, peynir altı suyunun arıtılması için kullanılan termal, ultrasonik ve termosonikasyon ön işlemleri gibi geleneksel olmayan teknikler rapor edilmiştir. Bu ön işlemler, değerli bileşiklerin peynir altı suyundan geri kazanımını artırmayı amaçlamaktadır [62]. Ayrıca, peynir altı suyu proteini izolatının ultrasonik modifikasyonu ile yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin değiştirilmesi rapor edilmiştir [113]. Peynir yapımında termal olmayan teknolojiler olarak elektrik teknolojileri, örneğin darbeli elektrik alanları kullanılarak yeni işlevler elde edilmesi de araştırılmıştır [44]. Ohmik ısıtma gibi yöntemlerin kullanılmasıyla da peynir altı suyu için fizyokimyasal özelliklerin değiştirilmesi mümkün olabilir [93].

6. Gelecek Trendleri

Hayvansal ürünlere olan talebin 2050 yılına kadar %70 oranında artması beklenmektedir. Bu artışın, özellikle gıda atığı ve atık peynir altı suyu gibi sorunların daha da kötüleşmesine neden olurken gıda üreticilerinin sürdürülebilirlik ve verimlilik konularına daha fazla odaklanmalarını da beraberinde getirebileceği düşünülmektedir [114, 115]. Pek çok ülkede, atık peynir altı suyunun yönetimine ilişkin maliyetlerin ve yasal gerekliliklerin arttığı, daha sıkı düzenlemelerin gelecekte yürürlüğe girmesi olasıdır. Bu durum, atık suların değerli bileşenlerin daha fazla geri kazanılmasını teşvik edebilir; geri kazanılan malzemelerin doğru kullanımı potansiyel olarak büyük kazançlar sağlayabilir ve üretim süreçlerinin tamamında değer yaratılmasına olanak tanıyabilecektir. Ancak, çevresel düzenlemeler ve kirlilik önleme baskıları, süt endüstrisini peynir altı suyu atığı sorunuyla ilgili çözümler üretmeye zorlamaya devam edecektir [114]. Bu tür baskılar, plastik ambalaj işleyicilerine plastik ambalaj vergilerinin getirilmesi sonrasında yaşanan benzer baskılar gibi etkili olabilir.

Günümüzde, AB içerisinde atıkların taşınması ve yönetimi, 2008/98/EC sayılı direktif kapsamındadır. Biyoatıklardan üretilen çevre açısından güvenli malzemelerin kullanımı teşvik edilmektedir. Ayrıca, atık ve yan ürünler arasında ayırım yapan 'genişletilmiş üretici sorumluluğu' kavramı, atık üreticisinin atık yönetimi maliyetini ödemesi gerektiğini belirten 'kirleten öder ilkesi'ni onaylamaktadır. Bununla birlikte, atık değerlendirilmesinden üretilen ürünleri düzenleyen mevzuatlar pek çok ülkede sürdürülebilir alternatiflere duyulan ihtiyaca yanıt olarak ortaya çık-maktadır [116]. Ancak, belirlenen yasal gerekliliklerin gerçekçi ve ulaşılabilir kalması gerekmektedir. Ayrıca, bazı politika önerileri, ürün tasarımının, geri dönüştürülebilirlik gibi döngünün her aşamasındaki sorun gelişimini dikkate alarak ürün yaşam döngüsünün tamamını dikkate aldığı döngüsel ekonomilerin benimsenmesini teşvik etmelidir. Ayrıca politika uyumlu hale getirilmeli ve toplum, işletmeler ve tüketiciler için aynı şekilde uygulanmalıdır [117]. Bununla birlikte, bu tür döngüsel sistemler gıda üretimi ve israfın olumsuz çevresel etkilerini azaltacaktır [115]. Bununla birlikte, AB'de gıda tedarik zinciri genelinde gıda israfıyla mücadelede yönelik tutarlı ve iddialı bir yaklaşım mevcut değildir. Bazı uzmanlar, bu mevzuat alanlarının, uluslararası

çevresel hedeflere uygun şekilde gıda israfını önemli ölçüde azaltmak için yeterli yönlendirmeyi sağlamadığını öne sürmektedir. Bu nedenle, gıda zincirinin tamamındaki davranışları değiştirmek için artan gıda fiyatlarının yanı sıra, vergilendirme gibi bazı ekonomik araçlar önererek mevcut atık mevzuatında iyileştirmeler yapılması gerekmektedir [118]. Mevcut ekonomik koşullar altında, artan gıda fiyatlarının önerilen gıda israfının azaltılmasına yol açma potansiyeli incelenmeye değer bir konudur. Bu durum, gıda tedarik zinciri genelinde sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından önemli sonuçlar doğurabilir.

Ayrıca Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, gıda üreticilerinin ve işleyicilerinin, 2030 yılına kadar besin açısından zengin ürünlerin geliştirilmesi yoluyla döngüsellüğün artırılması adına, yan ürün ve yan üretim oluşumunu azaltmak için harekete geçmesini gerektirmektedir [119]. Bununla birlikte, yeni, potansiyel olarak işlevsel, süt ürünleri ve peynir altı suyu türevi gıdaların geliştirilmesi basit değildir; çünkü yerel mevzuata uyumun sürdürülmesi ve ürünlerin aynı zamanda ekonomik, ticari ve lojistik açıdan uygun kalması da gerekir. Bu nedenle, Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşılmasını sağlamak için yeni gıda mevzuatlarının bilimsel ilerleme ve yeni gıda ürünü geliştirmeyle eş zamanlı olarak güncellenmesi ve gelişmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, yeni üretim sistemleri sürdürülebilir kalmalı ve özellikle daha zorlu sürdürülebilirlik mevzuatı uygulamaya konduğunda süt endüstrisinin çevresel etkisini azaltmaya çalışmalıdır. Bununla birlikte endüstrinin, çevresel bozulmayı azaltmak için uygun işleme ve sanitasyon ile atık bertaraf standartlarına uymak için uygun bertaraf tekniklerini kullanması gerekir. Ancak yönetim tekniklerinin üretken, karlı ve sürdürülebilir kalması gerekir [120].

7. Sonuç

Peynir altı suyu besin açısından zengindir ve çeşitli ticari kullanım alanlarına sahiptir. Ancak yüksek hacimli üretimi nedeniyle peynir altı suyu atıkları çevresel riskler oluşturmaktadır. Peynir altı suyunun GWP (Küresel Isınma Potansiyeli) değerleri, enerji yoğunluğu açısından dikkate değerdir ve ısıl işlem uygulamalarında enerji verimliliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Peynir altı suyunun çevresel etkilerini ve karbon ayak izini değerlendirmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Ancak bu yöntemler, peynir altı suyu ve süt tozu üretiminin ve çiftlik sonrası atıkları çevresel zararını tam olarak anlamada yetersiz kalmaktadır. YDD (Yönetim Derecelendirme) yaklaşımları, süt ürünleri üretim zincirinin tümünü kapsar ve üreticilerin sürdürülebilir uygulamalar benimsemelerine yardımcı olarak çevresel zararı azaltır; bu çabaların performansını sektör ortalamalarıyla karşılaştırır.

Peynir altı suyu, zengin bir laktoz ve protein kaynağı olması nedeniyle atık peynir altı suyunun katma değerli ürünlere veya bileşenlere dönüştürülmesini çekici bir alternatif haline getirir, bu da atık bertarafı sorunlarından kaçınmayı sağlar. Peynir altı suyunun tüketici mallarında çeşitli tüketici ürünlerinde kullanılabilmesi, her yıl üretilen atık peynir altı suyunun artmasıyla bağlantılı olarak umut vericidir. Ancak ekonomik ve sürdürülebilirlik zorluklarıyla birlikte, küresel atık üretiminin artmasıyla tek bir değerlendirme süreci veya yaklaşımının tek başına nihai bir çözüm sağlayamayacağı da belirtilmelidir.

Peynir altı suyunun çevresel etkisini azaltmaya yönelik stratejiler arasında peynir altı suyu ve atık su arıtımı, enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için ısı entegrasyonu, anaerobik sindirim (AS) ve peynir altı suyunun fermantasyonu yoluyla biyogaz ve biyoetanol üretimi gibi çeşitli enerji

tasarrufu ve geri kazanım teknolojilerinin uygulanması bulunmaktadır. Asidik peynir altı suyunun biyogaz için bir substrat olarak kullanılması, yenilenemeyen enerji kaynaklarının potansiyel bir alternatifi olarak elektrik üretimini mümkün kılar. Ayrıca, atık kullanımının biyoyakıtlar, biyo bazlı kimyasallar ve organik yan ürünler üretimi için potansiyelinin artan bir farkındalığa sahip olduğu görülmektedir.

2008/98/EC sayılı Atık Çerçeve Direktifi (WFD), atık oluşumunun önlenmesine öncelik vermekte ve bu doğrultuda işleme, geri dönüşüm ve geri kazanım gibi adımlara odaklanmaktadır; bertaraf ise en son seçenek olarak kabul edilmektedir. Bu direktif, 2008 yılında yürürlüğe gelse de, günümüzde hâlâ Avrupa Birliği'nin atık yönetimi politikalarına yön veren temel yasal çerçeveyi oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, biyo-ekonomi stratejisinin önemli bir parçası olarak gıda israfını azaltmayı hedefleyen AB politikalarıyla uyumludur. AB, gıda üretimi ve tedarik zincirleri boyunca gıda kayıplarını azaltma konusunda BM'nin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ni (SDG'ler) karşılamaya daha fazla kararlılıkla yaklaşmaktadır. Bu bağlamda, Avrupa ülkeleri biyolojik kaynakların üretimi, geri dönüşümü ve imhasına yönelik yaklaşımlarını yeniden gözden geçirmek zorunda kalacaklar. Gelecekte, atık peynir altı suyu yönetimi ile ilgili daha katı mevzuatın getirilmesi muhtemeldir. Bu durum, atık sularından değerli bileşenlerin daha fazla geri kazanılması için teşvik edici olabilir, aynı zamanda "genişletilmiş üretici sorumluluğu" ve "kirleten öder ilkesi" gibi kavramların atık yönetimindeki önemini vurgulamaktadır. Üreticilerin atık yönetimi maliyetlerini üstlenmesi, atık ve yan ürünler arasında ayırım yapılmasını teşvik eder ve sürdürülebilir atık yönetimi için önemli bir adım olarak kabul edilir.

Son olarak, BM'nin Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşılmasını desteklemek için yeni gıda mevzuatı, bilimsel ilerlemeler ve yeni gıda ürünleri geliştirme süreçleriyle eşzamanlı olarak güncellenmeli ve geliştirilmelidir. Bu yaklaşım, sürdürülebilirlik açısından daha uyumlu ve etkili bir gıda sistemine doğru ilerlemeyi sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Çalışma kapsamında herhangi bir kişisel ve/veya finansal çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Referanslar

- [1] Geary, U., Lopez-Villalobos, N., Garrick, D. J., & Shalloo, L. (2010). Development and application of a processing model for the Irish dairy industry. *Journal of Dairy Science*, 93(11), 5091-5100.
- [2] Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., Khatkar, S. K., Gat, Y., & Sindhu, N. (2018). Whey valorization: Current options and future scenario—a critical review. *Nutrition & Food Science*, 48(3), 520-535.
- [3] Chandrapala, J., Duke, M. C., Gray, S. R., Zisu, B., Weeks, M., Palmer, M., & Vasiljevic, T. (2015). Properties of acid whey as a function of pH and temperature. *Journal of Dairy Science*, 98(7), 4352-4363.

-
- [4] Flinois, J. C., Dando, R., & Padilla-Zakour, O. I. (2019). Effects of replacing buttermilk with yogurt acid whey in ranch dressing. *Journal Of Dairy Science*, 102(9), 7874-7883.
- [5] Zotta, T., Solieri, L., Iacumin, L., Picozzi, C., & Gullo, M. (2020). Valorization of cheese whey using microbial fermentations. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 104(7), 2749-2764.
- [6] Sharma, D., Manzoor, M., Yadav, P., Sohal, J. S., Aseri, G. K., & Khare, N. (2018). Bio-valorization of dairy whey for bioethanol by stress-tolerant yeast. In *Fungi And Their Role In Sustainable Development: Current Perspectives*, 349-366.
- [7] Mano, J., Liu, N., Hammond, J. H., Currie, D. H., & Stephanopoulos, G. (2020). Engineering *Yarrowia lipolytica* for the utilization of acid whey. *Metabolic Engineering*, 57, 43-50.
- [8] Prazeres, A. R., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal Of Environmental Management*, 110, 48-68.
- [9] Solak, B. B., & Akin, N. (2012). Health benefits of whey protein: A review. *Journal of Food Science and Engineering*, 2(3), 129.
- [10] Lindsay, M. J., Walker, T. W., Dumesic, J. A., Rankin, S. A., & Huber, G. W. (2018). Production of monosaccharides and whey protein from acid whey waste streams in the dairy industry. *Green Chemistry*, 20(8), 1824-1834.
- [11] Pal, P., & Nayak, J. (2016). Development and analysis of a sustainable technology in manufacturing acetic acid and whey protein from waste cheese whey. *Journal of Cleaner Production*, 112, 59-70.
- [12] Rivas, J., Prazeres, A. R., & Carvalho, F. (2011). Aerobic biodegradation of pre-coagulated cheese whey wastewater. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 59(6), 2511-2517.
- [13] Risner, D., Tomasino, E., Hughes, P., & Meunier-Goddik, L. (2019). Volatile aroma composition of distillates produced from fermented sweet and acid whey. *Journal Of Dairy Science*, 102(1), 202-210.
- [14] Schmidt, R. H., Packard, V. S., & Morris, H. A. (1984). Effect of processing on whey protein functionality. *Journal of Dairy Science*, 67(11), 2723-2733.
- [15] Dec, B., & Chojnowski, W. (2006). Characteristics of acid whey powder partially demineralised by nanofiltration. *Polish Journal Of Food And Nutrition Sciences*, 15(1), 87.
- [16] Farkye, N. Y. (2017). Quark, quark-like products, and concentrated yogurts. In *Cheese* (pp. 1103-1110). Academic Press.
- [17] Geiger, B., Nguyen, H. M., Wenig, S., Nguyen, H. A., Lorenz, C., Kittl, & Nguyen, T. H. (2016). From by-product to valuable components: Efficient enzymatic conversion of lactose in whey using β -galactosidase from *Streptococcus thermophilus*. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 45-53.
- [18] Guo, M., & Wang, G. (2019). History of whey production and whey protein manufacturing. In *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications* (pp. 1-12).
- [19] Mulcahy, E. M. (2017). Preparation, characterisation and functional applications of whey protein-carbohydrate conjugates as food ingredients.
- [20] Stout, M., & Drake, M. (2019). Flavor aspects of whey protein ingredients. In *Whey Proteins* (pp. 377-406). Academic Press.
- [21] Tallapragada, P., & Rayavarapu, B. (2019). Recent trends and developments in milk-based beverages. In *Milk-based beverages* (pp. 139-172). Woodhead Publishing.
- [22] Huffman, L. M., & de Barros Ferreira, L. (2011). Whey-based ingredients. In *Dairy ingredients for food processing*, 1, 179-198.
- [23] Masotti, F., Cattaneo, S., Stuknytė, M., & De Noni, I. (2018). Status and developments in analogue cheese formulations and functionalities. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 158-169.
-

- [24] Bansal, N., & Bhandari, B. (2016). Functional milk proteins: Production and utilization—whey-based ingredients. In *Advanced Dairy Chemistry: Volume 1B: Proteins: Applied Aspects*, 67-98.
- [25] Bolwig, S., Brekke, A., Strange, L., & Strøm-Andersen, N. (2019). 9 Valorisation of whey. In *From waste to value*, (pp. 162–182).
- [26] Bozanic, R., Barukcic, I., Lisak, K., & Jakopovic, T. L. (2014). Possibilities of whey utilisation. *Austin Journal of Nutrition and Food Sciences*, 2(7), 1036-1042.
- [27] Farkye, N. Y. (2004). Acid-and acid/rennet-curd cheeses part C: Acid-heat coagulated cheeses. In *Cheese: Chemistry, physics and microbiology* (Vol. 2, pp. 343-348). Academic Press.
- [28] Shon, J., Lee, S. H., Lee, F. Z., Lee, B. D., & Eun, J. B. (2007). The effects of heating on the physicochemical and functional properties of acid whey compared to sweet whey. *Food Science And Biotechnology*, 16(5), 836-842.
- [29] Zargar, M., Jin, B., & Dai, S. (2015). Development and application of reverse osmosis for separation. In *Membrane processing for dairy ingredient separation* (pp. 139–175).
- [30] Broekema, R., & Kramer, G. (2014). *LCA of Dutch semi-skimmed milk and semi-mature cheese*. Netherlands: Blonk Consultants..
- [31] González-García, S., Hospido, A., Moreira, M. T., Feijoo, G., & Arroja, L. (2013). Environmental life cycle assessment of a Galician cheese: San Simon da Costa. *Journal Of Cleaner Production*, 52, 253-262.
- [32] Kim, D., Thoma, G., Nutter, D., Milani, F., Ulrich, R., & Norris, G. (2013). Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1019-1035.
- [33] Van Middelaar, C. E., Berentsen, P. B. M., Dolman, M. A., & De Boer, I. J. M. (2011). Eco-efficiency in the production chain of Dutch semi-hard cheese. *Livestock Science*, 139(1-2), 91-99.
- [34] Chwialkowska, J., Duber, A., Zagrodnik, R., Walkiewicz, F., Łężyk, M., & Oleskowicz-Popiel, P. (2019). Caproic acid production from acid whey via open culture fermentation—Evaluation of the role of electron donors and downstream processing. *Bioresource technology*, 279, 74-83.
- [35] Das, B., Sarkar, S., Sarkar, A., Bhattacharjee, S., & Bhattacharjee, C. (2016). Recovery of whey proteins and lactose from dairy waste: A step towards green waste management. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 27-33.
- [36] Dufrene, A., Park, D., Olson, D., & Aryana, K. (2021). Survival of lactobacillus acidophilus in fruit-flavored Greek yogurt acid whey. *Food and Nutrition Sciences*, 12(7), 681-692.
- [37] Luo, N., Ye, A., Wolber, F. M., & Singh, H. (2021). Effect of gel structure on the in vitro gastrointestinal digestion behaviour of whey protein emulsion gels and the bioaccessibility of capsaicinoids. *Molecules*, 26(5), 1379.
- [38] Pandey, A., Srivastava, S., & Kumar, S. (2020). Development and cost-benefit analysis of a novel process for biofuel production from microalgae using pre-treated high-strength fresh cheese whey wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 23963-23980.
- [39] Kasmi, M., Hamdi, M., & Trabelsi, I. (2017). Processed milk waste recycling via thermal pretreatment and lactic acid bacteria fermentation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13604-13613.
- [40] Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., & Pereira, C. D. (2021). Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*, 10(5), 1067.
- [41] Xia, J., He, J., Xu, J., Liu, X., Qiu, Z., Xu, N., & Su, L. (2021). Direct conversion of cheese whey to poly malic acid by mixed culture of *Aureobasidium pullulans* and permeabilized *Kluyveromyces marxianus*. *Bioresource Technology*, 337, 125443.

- [42] Isipato, M. (2021). *Application of microbial electrochemical systems for valorisation of cheese whey in biorefinery framework*.
- [43] Clune, S., Crossin, E., & Verghese, K. (2017). Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal Of Cleaner Production*, 140, 766-783.
- [44] Ladha-Sabur, A., Bakalis, S., Fryer, P. J., & Lopez-Quiroga, E. (2019). Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 270-280.
- [45] Foster, C., Green, K., & Bleda, M. (2007). *Environmental impacts of food production and consumption: final report to the Department for Environment Food and Rural Affairs*.
- [46] Finnegan, W., Goggins, J., Clifford, E., & Zhan, X. (2017). Global warming potential associated with dairy products in the Republic of Ireland. *Journal Of Cleaner Production*, 163, 262-273.
- [47] Brooks, C., Swainson, M., Beauchamp, I., Campelos, I., Ishak, R., & Martindale, W. (2021). Transformational steam infusion processing for resilient and sustainable food manufacturing businesses. *Foods*, 10(8), 1763.
- [48] Allen, M. R., Shine, K. P., Fuglestedt, J. S., Millar, R. J., Cain, M., Frame, D. J., & Macey, A. H. (2018). A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 16.
- [49] Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal Of Food Engineering*, 90(1), 1-10.
- [50] Berardy, A., Johnston, C. S., Plukis, A., Vizcaino, M., & Wharton, C. (2019). Integrating protein quality and quantity with environmental impacts in life cycle assessment. *Sustainability*, 11(10), 2747.
- [51] Finnegan, W., Goggins, J., & Zhan, X. (2018a). Assessing the environmental impact of the dairy processing industry in the Republic of Ireland. *Journal of Dairy Research*, 85(3), 396-399.
- [52] Flysjö, A., Thrane, M., & Hermansen, J. E. (2014). Method to assess the carbon footprint at product level in the dairy industry. *International Dairy Journal*, 34(1), 86-92.
- [53] Ineichen, S., Schenker, U., Nemecek, T., & Reidy, B. (2022). Allocation of environmental burdens in dairy systems: Expanding a biophysical approach for application to larger meat-to-milk ratios. *Livestock Science*, 261, 104955.
- [54] Finnegan, W., Yan, M., Holden, N. M., & Goggins, J. (2018b). A review of environmental life cycle assessment studies examining cheese production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 1773-1787.
- [55] Palmieri, N., Forleo, M. B., & Salimei, E. (2017). Environmental impacts of a dairy cheese chain including whey feeding: An Italian case study. *Journal of Cleaner Production*, 140, 881-889.
- [56] Feitz, A. J., Lundie, S., Dennien, G., Morain, M., & Jones, M. (2007). Generation of an industry-specific physico-chemical allocation matrix. Application in the dairy industry and implications for systems analysis (9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 109-117.
- [57] Rocha, J. M., & Guerra, A. (2020). On the valorization of lactose and its derivatives from cheese whey as a dairy industry by-product: an overview. *European Food Research and Technology*, 246(11), 2161-2174.
- [58] Asunis, F., De Gioannis, G., Francini, G., Lombardi, L., Muntoni, A., Polettini, A., ... & Spiga, D. (2021). Environmental life cycle assessment of polyhydroxyalkanoates production from cheese whey. *Waste Management*, 132, 31-43.
- [59] Bonnaillie, L. M., & Tomasula, P. M. (2008). Whey protein fractionation. In *Whey Processing, Functionality and Health Benefits* (pp. 15-38).

- [60] Barukčić, I., Lisak Jakopović, K., & Božanić, R. (2019). Valorisation of whey and buttermilk for production of functional beverages—an overview of current possibilities. *Food Technology And Biotechnology*, 57(4), 448-460.
- [61] Lawton, M. R., Dana, L. D., & Alcaine, S. D. (2021). Lactose utilization by *Brettanomyces claussenii* expands potential for valorization of dairy by-products to functional beverages through fermentation. *Current Opinion in Food Science*, 42, 93-101.
- [62] Risner, D., Shayeitz, A., Haapala, K., Meunier-Goddik, L., & Hughes, P. (2018). Fermentation and distillation of cheese whey: Carbon dioxide-equivalent emissions and water use in the production of whey spirits and white whiskey. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 2963-2973.
- [63] Tirloni, E., Vasconi, M., Cattaneo, P., Moretti, V., Bellagamba, F., Bernardi, C., & Stella, S. (2020). A possible solution to minimise scotta as a food waste: A sports beverage. *International Journal of Dairy Technology*, 73(2), 421-428.
- [64] Koushki, M., Jafari, M., & Azizi, M. (2012). Comparison of ethanol production from cheese whey permeate by two yeast strains. *Journal of Food Science And Technology*, 49, 614-619.
- [65] Lovato, G., Augusto, I. M. G., Júnior, A. D. N. F., Albanez, R., Ratusznei, S. M., Etchebehere, C., ... & Rodrigues, J. A. D. (2021). Reactor start-up strategy as key for high and stable hydrogen production from cheese whey thermophilic dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27364-27379.
- [66] Akan, E., Yerlikaya, O., Akpınar, A., Karagozlu, C., Kinik, O., & Uysal, H. R. (2021). The effect of various herbs and packaging material on antioxidant activity and colour parameters of whey (Lor) cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 74(3), 554-563.
- [67] Chudy, S., Makowska, A., Krzywdzińska-Bartkowiak, M., Piątek, M., Henriques, M., Borges, A. R., ... & Pereira, C. D. (2021). The effect of microparticulated whey protein on the characteristics of reduced-fat cheese and of the corresponding microwave vacuum-dried cheese puffs and finely ground puffs. *International Journal of Dairy Technology*, 74(4), 747-758.
- [68] Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E., & Kop-sahelis, N. (2019). Cheese whey processing: Integrated biorefinery concepts and emerging food applications. *Foods*, 8(8), 347.
- [69] Wang, G., & Guo, M. (2019). Manufacturing technologies of whey protein products. In *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications*, (pp. 13-37).
- [70] Addai, F. P., Lin, F., Wang, T., Kosiba, A. A., Sheng, P., Yu, F., ... & Shi, H. (2020). Technical integrative approaches to cheese whey valorization towards sustainable environment. *Food & Function*, 11(10), 8407-8423.
- [71] Santos, M. I. S., Fradinho, P., Martins, S., Lima, A. I. G., Boavida Ferreira, R. M. S., Pedroso, L., ... & Sousa, I. (2019). A novel way for whey: Cheese whey fermentation produces an effective and environmentally safe alternative to chlorine. *Applied Sciences*, 9(14), 2800.
- [72] Wójciak, K. M., Karwowska, M., & Dolatowski, Z. J. (2014). Use of acid whey and mustard seed to replace nitrites during cooked sausage production. *Meat Science*, 96(2), 750-756.
- [73] Xiong, X., Iris, K. M., Tsang, D. C., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Igalavithana, A. D., ... & Vikrant, K. (2019). Value-added chemicals from food supply chain wastes: State-of-the-art review and future prospects. *Chemical Engineering Journal*, 375, 121983.
- [74] Macedo, A., Azedo, D., Duarte, E., & Pereira, C. (2021a). Valorization of goat cheese whey through an integrated process of ultrafiltration and nanofiltration. *Membranes*, 11(7), 477.
- [75] Macedo, A., Bilau, J., Cambóias, E., & Duarte, E. (2021b). Integration of membrane processes for by-product valorization to improve the eco-efficiency of small/medium size cheese dairy plants. *Foods*, 10(8), 1740.

- [76] Sarenkova, I., Sáez-Orviz, S., Ciprovica, I., Rendueles, M., & Díaz, M. (2022). Lactobionic acid production by *Pseudomonas taetrolens* in a fed-batch bioreactor using acid whey as substrate. *International Journal of Dairy Technology*, 75(2), 361-371.
- [77] Dopazo, V., Luz, C., Calpe, J., Vila-Donat, P., Rodriguez, L., & Meca, G. (2022). Antifungal properties of whey fermented by lactic acid bacteria in films for the preservation of cheese slices. *International Journal of Dairy Technology*, 75(3), 619-629.
- [78] Tamošaitis, A., Jaruševičienė, A., Strykaitė, M., & Damašius, J. (2022). Analysis of antimicrobial whey protein-based biocomposites with lactic acid, tea tree (*Melaleuca alternifolia*) and garlic (*Allium sativum*) essential oils for Edam cheese coating. *International Journal of Dairy Technology*, 75(3), 611-618.
- [79] Blais, H. N., Schroën, K., & Tobin, J. T. (2022). A review of multistage membrane filtration approaches for enhanced efficiency during concentration and fractionation of milk and whey. *International Journal of Dairy Technology*, 75(4), 749-760.
- [80] Nielsen, E. N., Skibsted, L. H., Yazdi, S. R., Merkel, A., & Ahrné, L. M. (2022). Improving electrodialysis separation efficiency of minerals from acid whey by nano-filtration pre-processing. *International Journal of Dairy Technology*, 75(4), 820-830.
- [81] Chourasia, R., Phukon, L. C., Abedin, M. M., Padhi, S., Singh, S. P., & Rai, A. K. (2022). Whey valorization by microbial and enzymatic bioprocesses for the production of nutraceuticals and value-added products. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101144.
- [82] Costa, C. E., Romani, A., Teixeira, J. A., & Domingues, L. (2022). Resveratrol production for the valorisation of lactose-rich wastes by engineered industrial *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology*, 359, 127463.
- [83] Gutiérrez-Hernández, C. A., Hernández-Almanza, A., Hernández-Beltrán, J. U., Balagurusamy, N., & Hernández-Teran, F. (2022). Cheese whey valorization to obtain single-cell oils of industrial interest: An overview. *Food Bioscience*, 50, 102086.
- [84] Hausjell, J., Miltner, M., Herzig, C., Limbeck, A., Saracevic, Z., Saracevic, E., ... & Spadiut, O. (2019). Valorisation of cheese whey as substrate and inducer for recombinant protein production in *E. coli* HMS174 (DE3). *Bioresource technology reports*, 8, 100340.
- [85] Ibarruri, J., & Hernández, I. (2019). Valorization of cheese whey and orange molasses for fungal biomass production by submerged fermentation with *Rhizopus* sp. *Bioprocess And Biosystems Engineering*, 42, 1285-1300.
- [86] Barba, F. J. (2021). An integrated approach for the valorization of cheese whey. *Foods*, 10(3), 564.
- [87] Cheng, Y., Yeboah, G. B., Guo, X., Donkor, P. O., & Wu, J. (2022). Gelling Characteristics of Emulsions Prepared with Modified Whey Protein by Multiple-Frequency Divergent Ultrasound at Different Ultrasonic Power and Frequency Mode. *Polymers*, 14(10), 2054.
- [88] Gentès, M. C., Caron, A., & Champagne, C. P. (2022). Potential applications of pulsed electric field in cheesemaking. *International Journal of Dairy Technology*, 75(2), 270-288.
- [89] Jiang, Z., Gao, Y., Li, J., Wang, K., Ma, C., Sun, D., ... & Hou, J. (2022). Consecutive pH-shift and ultrasound treatment modify the physicochemical properties of whey protein isolate. *International Dairy Journal*, 127, 105211.
- [90] Karim, A., & Aider, M. (2020). Contribution to the process development for lactulose production through complete valorization of whey permeate by using electro-activation technology versus a chemical isomerization process. *ACS Omega*, 5(44), 28831-28843.
- [91] Khaire, R. A., & Gogate, P. R. (2018). Intensified recovery of lactose from whey using thermal, ultrasonic and thermosonication pretreatments. *Journal of Food Engineering*, 237, 240-248.

- [92] Meng, Y., Liang, Z., Zhang, C., Hao, S., Han, H., Du, P., ... & Liu, L. (2021). Ultrasonic modification of whey protein isolate: Implications for the structural and functional properties. *LWT*, 152, 112272.
- [93] Rocha, C. M., Genisheva, Z., Ferreira-Santos, P., Rodrigues, R., Vicente, A. A., Teixeira, J. A., & Pereira, R. N. (2018). Electric field-based technologies for valorization of bioresources. *Biore-source Technology*, 254, 325-339.
- [94] de Souza, R. R., Bergamasco, R., da Costa, S. C., Feng, X., Faria, S. H. B., & Gimenes, M. L. (2010). Recovery and purification of lactose from whey. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(11), 1137-1143.
- [95] Erdoğan, S. L., Tekgül, Y., & Koç, G. Ç. (2022). Farklı meyve çekirdekleri yağlarının keklerin kalite karakteristikleri üzerine etkisi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(2), 342-350.
- [96] Eryılmaz, H., Ince, O. K., & Ince, M. (2022). Comparison of some physical and chemical properties of kefir obtained from different kefir cultures and brands of milk. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(2), 468-477.
- [97] Jayaprakasha, H. M., Yoon, Y. C., & Paik, H. D. (2005). Probiotic functional dairy foods and health claims: an overview. *Food Science And Biotechnology*, 14(4), 523-528.
- [98] Zydney, A. L. (1998). Protein separations using membrane filtration: new opportunities for whey fractionation. *International Dairy Journal*, 8(3), 243-250.
- [99] Imtiaz-Ul-Islam, M., Hong, L., & Langrish, T. (2011). CO₂ capture using whey protein isolate. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 1069-1081.
- [100] El-Sayed, M. M., & Chase, H. A. (2011). Trends in whey protein fractionation. *Biotechnology Letters*, 33, 1501-1511.
- [101] Jara, F., & Pilosof, A. M. (2011). Partitioning of α -lactalbumin and β -lactoglobulin in whey protein concentrate/hydroxypropylmethylcellulose aqueous two-phase systems. *Food Hydrocolloids*, 25(3), 374-380.
- [102] de Souza, R. R., Bergamasco, R., da Costa, S. C., Feng, X., Faria, S. H. B., & Gimenes, M. L. (2010). Recovery and purification of lactose from whey. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(11), 1137-1143.
- [103] Chandan, R. C. (2014). Dairy-fermented products. In Clark, S., & Jung, S. (Eds.), *Food processing: Principles and applications* (pp. 405-436). Hoboken, NJ: Wiley.
- [104] Patel, S. R., & Murthy, Z. V. P. (2012). Lactose recovery processes from whey: a comparative study based on sonocrystallization. *Separation & Purification Reviews*, 41(4), 251-266.
- [105] Yamahata, N., Toyotake, Y., Kunieda, S., & Wakayama, M. (2020). Application of multiple sensory evaluations to produce fermented beverages made from sole whey using *Kluyveromyces marxianus*. *International Journal Of Food Science & Technology*, 55(4), 1698-1704.
- [106] Ferreira, A., & Gouveia, L. (2020). Microalgal biorefineries. In I. G. B. dos Santos & M. J. C. da Silva (Eds.), *Handbook of microalgae-based processes and products* (pp. 771-798). London: Academic Press..
- [107] Weide, T., Peitzmeier, J., Wetter, C., Wichern, M., & Bruegging, E. (2021). Comparison of thermophilic and hyperthermophilic dark fermentation with subsequent mesophilic methanogenesis in expanded granular sludge bed reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29142-29159.
- [108] Srivastava, S., Jhariya, U., Purohit, H. J., & Dafale, N. A. (2021). Synergistic action of lytic polysaccharide monooxygenase with glycoside hydrolase for lignocellulosic waste valorization: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-19.

- [109] Zhang, P., Chen, Y., & Zhou, Q. (2009). Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions: Effect of pH. *Water Research*, 43(15), 3735-3742.
- [110] Reyhanitash, E., Zaalberg, B., Kersten, S. R., & Schuur, B. (2016). Extraction of volatile fatty acids from fermented wastewater. *Separation and Purification Technology*, 161, 61-68.
- [111] Liu, H., Wang, L., Zhang, X., Fu, B., Liu, H., Li, Y., & Lu, X. (2019). A viable approach for commercial VFAs production from sludge: Liquid fermentation in anaerobic dynamic membrane reactor. *Journal Of Hazardous Materials*, 365, 912-920.
- [112] Athira, S., Mann, B., Sharma, R., Pothuraju, R., & Bajaj, R. K. (2021). Preparation and characterization of iron-chelating peptides from whey protein: An alternative approach for chemical iron fortification. *Food Research International*, 141, 110133.
- [113] Meng, Y., Liang, Z., Zhang, C., Hao, S., Han, H., Du, P., ... & Liu, L. (2021). Ultrasonic modification of whey protein isolate: Implications for the structural and functional properties. *LWT*, 152, 112272.
- [114] Henriques, M. H. F. (2013). *Recovery and application of whey proteins in conventional and non-conventional food systems* (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra, Portugal).
- [115] Torok, V. A., Luyckx, K., & Lapidge, S. (2021). Human food waste to animal feed: Opportunities and challenges. *Animal Production Science*, 62(12), 1129-1139.
- [116] Talbott, T. C. (2022). Extended Producer Responsibility: Opportunities and challenges for waste pickers. *Social Contracts and Informal Workers in the Global South*, (pp. 126–143). Oxford: Oxford University Press..
- [117] Momete, D. C. (2020). A unified framework for assessing the readiness of European Union economies to migrate to a circular modelling. *Science of the Total Environment*, 718, 137375.
- [118] Garske, B., Heyl, K., Ekardt, F., Weber, L. M., & Gradzka, W. (2020). Challenges of food waste governance: An assessment of European legislation on food waste and recommendations for improvement by economic instruments. *Land*, 9(7), 231.
- [119] Granato, D., Carochio, M., Barros, L., Zabetakis, I., Mocan, A., Tsoupras, A., ... & Pimentel, T. C. (2022). Implementation of sustainable development goals in the dairy sector: Perspectives on the use of agro-industrial side-streams to design functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 128-139.
- [120] Roufou, S., Griffin, S., Katsini, L., Polańska, M., Van Impe, J. F., & Valdramidis, V. P. (2021). The (potential) impact of seasonality and climate change on the physicochemical and microbial properties of dairy waste and its management. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 1-10.