

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue : 1 Mart/March 2025



İmtiyaz Sahibi / Owner

Deanery of Engineering and Natural Sciences Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKIYE

Editörler / Editors

Nevzat Özgü YİĞİT

Suleyman Demirel University, Isparta
(Baş Editör / Editor-in-Chief)

Fatma AKSEVER

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Fatih Ahmet SENEL

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Karani KURTULUS

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Caglayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yil University, Van

Mehmet AVCAR

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

İskenderun Technical University, İskenderun

Ahmet CAGLAR

Akdeniz University, Antalya

Habib GURBUZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf ÖZTÜRK

Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK

Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Işıl BARUTÇU MAZI

Ordu University, Ordu

Muhammed Maruf OZTURK

Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOGLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT

Pamukkale University, Denizli

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Ali YALCIN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Savaş ÖZÜN

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Meltem KAÇIKOÇ

Suleyman Demirel University, Isparta

Onur GÖLBAŞI

Middle East Technical University, Ankara

Selma Demer

Suleyman Demirel University, Isparta

Celal Fadıl KUMRU

Suleyman Demirel University, Isparta

Fehmi MUTLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Alper DEMİRAY

Suleyman Demirel University, Isparta

Hüsnü Arda YURTSEVER

*Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University,
Adana*

Turgay AYDOĞAN

Suleyman Demirel University, Isparta

İ. Ethem KARADİREK

Akdeniz University, Antalya

Can BAŞARAN

Afyon Kocatepe University, Afyon

Güncel SARIMAN

Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla

Gülhan GÜLER

Erciyes University, Kayseri

Bilge ERTEKİN FİLİZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

Erol TUTUMLUER
University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

Gerhard-Wilhelm WEBER
Poznan University of Technology, Poznan, PL

Yayın Editörleri / Technical Editors

Ayşe ÖZÇELİK
Suleyman Demirel University, Isparta

Yasemin SIMSEK TURKER
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa UZUM
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa ÜZÜM
Suleyman Demirel University, Isparta

Umut Bekçi
Suleyman Demirel University, Isparta

Burak İKİNCİ
Suleyman Demirel University, Isparta

Yabancı Dil Editörü / Foreign Language Editor

Ahmet UNAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / Abstracting & Indexing

/ TR-DIZIN / EBSCOhost / SCILIT / ROAD / EuroPUB / SOBIAD /
/ Google Scholar / CrossRef

Duyurular / Announcements

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.

As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

İçindekiler / *Contents*

<i>Araştırma / Research</i>	<i>Sayfa / Pages</i>
1. BİLİNMEYEN MARKOV ATLAMALI SİSTEMLERİN MODELLEMESİ VE ERGEN KİMLİK ARAMA ALGORİTMASI İLE AYARLANMIŞ PID KONTROLÜ Bedri Bahtıyar* , Meric Cetin , Selami Beyhan	1-16
2. KOMPOZİT MALZEME İLE KAPLANMIŞ KUMAŞLARIN KORUYUCU TEKSTİL OLARAK KULLANIMI ÜZERİNE TEKNİK BİR ANALİZ Güler Öncü* , Nükhet Şapcı	17-27
3. AGREGA DARBE DAYANIM İNDEKSİ İLE KAYA VE BETONUN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ KORELASYON İLİŞKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI Kadir Karaman*	28-36
4. ARSUZ OVASI TOPRAKLARININ BESİN ELEMENT İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE BUNLARIN MEKÂNSAL DAĞILIMLARININ COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE İNCELENMESİ Necat Ağca* , Seyfullah Ertuğral	37-48
5. RESNET-34 DERİN ÖĞRENME ALGORİTMASI İLE DEPREM SONRASI YIKILAN YAPILARIN TESPİTİ: 6 ŞUBAT 2023 DEPREMİ, ANTAKYA ÖRNEĞİ Firdevs Güzel* , Gülcan Sarp , Kadir Temurçin	49-63
6. BETON DAYANIMI TAHMİNİNDE İKİLİ VE ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI Nevbahar Ekin*	64-77

- [7. INVESTIGATION OF WASTE TRANSFORMER OIL/BIODIESEL/DIESEL TRIPLE FUEL MIXTURE IN SEARCH OF ALTERNATIVE FUEL](#) 78-89
[Tuba Karaca , Tuba Hatice Doğan*](#)
- [8. COMPARISON OF QUANTUM DEEP LEARNING METHODS FOR IMAGE CLASSIFICATION](#) 90-106
[Bekir Eray Kati*, Ecir Uğur Küçüksille , Güncel Sarıman](#)
- [9. POLYESTER LİF UZUNLUĞU VE KATKI ORANININ BETONUN MEKANİK VE ISI YALITIM ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ](#) 107-119
[Gülşah Susurluk*, Hakan Sarıkaya](#)
- [10. DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER BASED DATA ACQUISITION SYSTEM TO INCREASE EFFICIENCY IN GALVANOTECHNICAL PLATING BATHS](#) 120-132
[Süleyman Tokmak , Mohammad Ruhul Amin Bhuiyan , Hayati Mamur*](#)
- [11. TARIM TRAKTÖRLERİNDE HİDROLİK KALDIRMA KUVVETİNİN GERİYE DEVRİLME \(ŞAHLANMA\) NOKTASINA ETKİSİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA](#) 133-143
[Sadık Oğuz Yıldız*, Selçuk Olum , Hakan Velioğlu](#)
- [12. AA5754 ALAŞIMININ ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ İLE EĞİLME VE GERİ ESNEME DAVRANIŞININ ANALİZİ](#) 144-154
[Süleyman Kılıç*, Mehmet Fatih Demirdöğen](#)
- [13. ÜÇ KANALLI ISI DEĞİŞTİRİCİDE HİBRİT NANOAKIŞKANIN CEBRİ TAŞINIMA ETKİSİ](#) 155-164
[Gülenay Alevay Kılıç*, İmen Meriem , Ziad Saghir](#)
- [14. PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BACTERIAL CELLULOSE BIOCOSMOSITES BASED ON THYMUS SIPYLEUS BOISS. EXTRACT](#) 165-176
[Nur Kılınc , Dicle Özdemir Küçükçapraz*, Mustafa Cüce](#)
- [15. DETERMINATION OF OLIVE OIL PURITY BY S PARAMETER](#) 177-184
[Güllühan İrmak*, Emin Sapmaz , Atalay Kocakuşak , Selçuk Helhel](#)
- [16. INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVER DESIGN: FAN LOAD APPLICATION USED IN AIR CONDITIONING SYSTEMS](#) 185-201
[Buğra Er , Okan Bingöl*](#)

- [17. REVISITING BODE'S IDEAL LOOPS: INTEGRAL SQUARE ERROR OPTIMALITY OF BODE'S IDEAL LOOPS AND BODE'S IDEAL LOOP INVERSE CONTROLLER DESIGN](#) 202-220
Barış Baykant Alagöz , Furkan Nur Deniz , Cemal Keleş*
- [18. DETERMINATION OF CLIMATE TYPE AND EVAPOTRANSPIRATION FOR BURDUR LAKE BASIN USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS AND DIFFERENT METHODS](#) 221-233
İbrahim İskender Soyaslan* , Kerem Hepdeniz
- [19. CAM FİBER TAKVİYELİ PLASTİK MALZEMELERİN DELAMİNASYON DURUMUNUN İNCELENMESİ](#) 234-249
Nergizhan Anaç , Esra Şen , Eren Gül , Esra Acar , Muhammed Erdem Yıldız , Oğuz Koçar* , Furkan Parmaksız
- [20. COMPARİSON OF REBA, RULA AND OWAS ERGONOMIC RİSK ASSESSMENT METHODS: AN EXAMPLE OF A CAR TİRE BUSINESS](#) 250-262
Ali Ağar*
- [21. FUNCTIONAL YARN PRODUCTION CONTAINING NATURAL MATERIALS FOR MEDICAL TEXTILES](#) 263-274
Celal Demirtaş , Demet Yılmaz* , Ebru Önem
- [22. YENİŞARBADEMLİ \(ISPARTA, TÜRKİYE\) BATISINDAKİ MAFİK-ORTAÇ DAYKLARDAKİ EPİDOTLARIN MİNERALOGİSİ VE JEOKİMYASAL KARAKTERİ](#) 275-285
Deniz Dedeoğlu Yıldız*
- [23. YILDIRIM KAYNAKLI ENERJİ İLETİM HATTI ARIZALARININ İZOLATÖR BOYU VE TOPRAKLAMA DİRENCİ AÇISINDAN SINIR DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ](#) 286-305
Ahmet Yaşar Yoldaş* , Hamza Feza Carlak , Şükrü Özen
- [24. DÖKÜMHANE MAÇA ÜRETİM PROSESİNDE MAKİNE PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU İLE AMİN GAZI TÜKETİMİNİN AZALTIKMASI](#) 306-324
Onur Şahin* , Müge Ensari Özay , Rüştü Uçan , Emine Can
- [25. TRANSFER LEARNING-BASED CLASSIFICATION OF KNEE OSTEOARTHRİTİS SEVERİTY FROM X-RAY IMAGES](#) 325-339
Miyade Mahfus , Mustafa Tosun , Hanife Göker*

[26. METANOLDEN DİMETİL ETER ÜRETİM PROSESİNİN TEKNO-EKONOMİK](#)

[ANALİZİ](#)

[Ali Yalçın*](#)

340-352

[27. DÖKÜM MAKİNELERİNDE EKED PROSEDÜRÜ UYGULAMALARININ](#)

[İNCELENMESİ](#)

[Kerem Topal*, Müge Ensari , Onur Şahin](#)

353-368

[28. ELEKTRİK KESİLMELERİNE KARŞI AKILLI PRİZ SİSTEMİ](#)

[Harun Sümbül*, Cansu Gülay](#)

369-381



BİLİNMEYEN MARKOV ATLAMALI SİSTEMLERİN MODELLEMESİ VE ERGEN KİMLİK ARAMA ALGORİTMASI İLE AYARLANMIŞ PID KONTROLÜ

Bedri BAHTİYAR^{1*}, Meriç ÇETİN², Selami BEYHAN³

¹Pamukkale Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

²Pamukkale Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

³Yıldız Teknik Üniversitesi, Yapay Zekâ ve Veri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Markov Atlamalı Sistemler,
Aşırı Öğrenme Makineleri,
PID Denetim,
Meta-Sezgisel Optimizasyon,
AISA.

Öz

Markov atlama sistemlerinin (Markov Jump System–MJS), bilinmeyen dinamikler, rastgele geçişler ve çevresel gürültüler nedeniyle denetlenmesi zordur. Bu makalede, gerçek zamanlı doğrusal MJS'ler optimizasyon yöntemleri kullanılarak genel modelleme ve denetim performansını iyileştirmek için gözden geçirilmiştir. Bu çalışmayla elde edilen katkılar iki başlıkta değerlendirilmektedir: i) gerçek zamanlı bir RLC devresinden toplanan veriler kullanılarak kara-kutu tanımlama, ii) oransal-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative - PID) denetleyicinin tasarımında sezgisel optimizasyon yöntemi olan Ergen Kimliği Arama algoritmasının (AISA) ilk kez kullanımı. Bu amaçla, bilinmeyen MJ'lerin dinamiklerini modellemek ve tahmin etmek için bir Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine- ELM) modeli oluşturulmuştur. Ardından, yığın optimizasyon içerisinde ELM modeli kullanılarak en uygun PID parametreleri kümesi bulunmuştur. Denetleyicinin parametrelerini optimize etmek için literatürde yaygın olarak kullanılan meta-sezgisel algoritmalar AISA ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre en iyi uygunluk değerine en kısa sürede ulaşan AISA ile gerçek zamanlı PID denetleyicisine ait parametreler 0.005 hata oranı ile tahmin edilmiştir. Önerilen yaklaşım, Markov davranışı sergileyen deneysel bir RLC devresinin modellenmesi ve denetimi için uygulanmıştır.

MODELLING OF UNKNOWN MARKOV JUMP SYSTEMS AND PID CONTROL TUNED BY ADOLESCENT IDENTITY SEARCH ALGORITHM

Keywords

Markov Jump Systems,
Extreme Machine Learning,
Pid Control,
Meta-Heuristic Optimization,
AISA.

Abstract

Markov jump systems (MJS) are difficult to control due to unknown dynamics, random transitions and environmental noises. In this paper, real-time linear MJSs are reviewed to improve general modeling and control performance using meta-heuristic optimization methods. Contributions are twofold as: i) black-box identification using collected data from a real-time RLC circuit, ii) first use of the Adolescent Identity Search algorithm (AISA), which is a meta-heuristic optimization method in the design of a proportional-integral-derivative (PID) controller. For this purpose, an Extreme Learning Machine (ELM) model is constructed to model and predict the dynamics of unknown MJs. Then, the optimal set of PID parameters are found using the ELM model in batch optimization. To optimize the parameters of the controller, meta-heuristic algorithms commonly used in the literature are compared with AISA. According to the simulation results, the parameters of the real-time PID controller have been estimated with an error rate of 0.005 with AISA, which achieved the best fitness value in the shortest time. The proposed approach is applied to model and control an experimental RLC circuit with Markovian behavior.

Alıntı / Cite

Bahtiyar, B., Çetin, M., Beyhan, S., (2025). Bilinmeyen Markov Atlamalı Sistemlerin Modellemesi ve Ergen Kimlik Arama Algoritması ile Ayarlanmış PID Kontrolü, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 1-16.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Bahtiyar, 0000-0002-8679-095X
M. Çetin, 0000-0002-7871-4850
S. Beyhan, 0000-0002-9581-2794

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	05.07.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.10.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.11.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: bedribahtiyar@pau.edu.tr, +90-505-409-5975

MODELLING OF UNKNOWN MARKOV JUMP SYSTEMS AND PID CONTROL TUNED BY ADOLESCENT IDENTITY SEARCH ALGORITHM

Bedri Bahtiyar^{1†}, Meriç Çetin², Selami Beyhan³,

¹Pamukkale Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

²Pamukkale Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

³Yıldız Teknik Üniversitesi, Yapay Zekâ ve Veri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Modelling of unknown Markov jump systems
- Adolescent identity search algorithm (AISA)
- Meta-heuristic optimization based PID parameter identification
- System modelling with Extreme Learning Machine via input-output data

Graphical Abstract

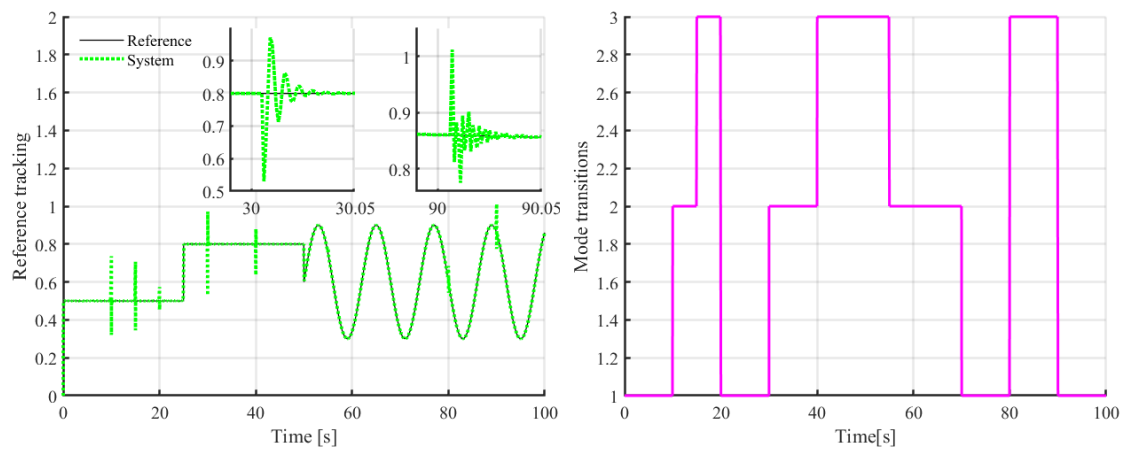


Figure. Real-Time Tracking Control Results of Unknown Markov Jump Systems

Purpose and Scope

In this paper, real-time linear Markov jump systems (MJSS) are reviewed to improve general modeling and control performance using meta-heuristic optimization methods. Contributions are twofold as i) black-box identification using collected data from a real-time RLC circuit, ii) first use of the Adolescent Identity Search algorithm (AISA), which is a heuristic optimization method in the design of a proportional-integrator-derivative (PID) controller.

Design/methodology/approach

To achieve the determined objectives, first the ELM model of the RLC circuit, which acts as a MJS, is obtained. Then, PID controller parameters are generated by simulating the ELM model with various well-known meta-heuristic algorithms. Finally, the PID controller parameters obtained by AISA are applied to the RLC circuit for real-time experiment.

Findings

Simulation results illustrate that the AISA has an acceptable performance to find PID controller parameters by using ELM model. Furthermore, real-time experiment results present that PID controller, parameters of which are obtained by AISA, can manipulate the RLC circuit, which behaves as MJS, to track a reference signal containing staircase and sinusoidal signals.

Originality

In this study, black-box identification of a RLC circuit by ELM and identification-model based design of PID controller using AISA are proposed. Comparative simulations and real-time results show that AISA is a very effective meta-heuristic optimization to find the parameters of PID controller to control RLC circuit which acts as MJS.

[†] Corresponding author: bedribahtiyar@pau.edu.tr, +90-505-409-5975

1. Giriş (Introduction)

PID denetleyici hem akademik araştırmalar hem de endüstri uygulamaları için basit, verimli ve uygulanabilir bir denetleyicidir. En önemli avantajlarından biri, gerçek zamanlı uygulamalar için çok önemli bir özellik olan sistem modelinin uygulanmasına gerek olmamasıdır. Temel amacının çıkış geri besleme denetimi olması nedeniyle sadece çıkış ölçümü denetleme işlemi için yeterlidir. Bir PID denetleyicisinin temel sorunu, istenen bir performansı karşılamak için parametrelerinin uygun değerlere ayarlanması gerektiğidir (Cetin ve Iplikci, 2015). Literatürde kararlılık, izleme ve düzenleme performansı, tesis modelleme belirsizliğine karşı dayanıklılık, gürültü azaltma ve çevresel belirsizliğe karşı dayanıklılık gibi kriterleri dikkate alan birçok farklı PID tasarım yöntemi bulunmaktadır (Ang vd., 2005).

Hedeflenen kriterlere göre farklılık gösteren PID tasarımları analitik, sezgisel, frekans yanıtı tabanlı, optimizasyon tabanlı veya uyarlanabilir ayar tabanlı olarak geliştirilebilir. PID parametrelerini hesaplamak için analitik ilişkileri kullanan performans ve dayanıklılık kriterlerine dayalı farklı frekans özelliklerine sahip genel bir denetleyici (Lennartson ve Kristiansson, 2009)'de önerilmiştir. Ziegler-Nichols (Z-N) PID denetleyicileri, işlemin gecikme ve birim reaksiyon hızı değerlerini kullanarak parametreleri en uygun şekilde ayarlar (Ziegler ve Nichols, 1942). Tasarım hedefleri arasında bir denge sağlayan yapay zekâ yöntemlerine (uzman sistemler, evrimsel hesaplama, bulanık mantık ve sinir ağları dahil) dayalı birçok PID denetleyici tasarımı vardır. Örneğin, (Chiou vd., 2012)'te bir süspansiyon sisteminin en uygun bulanık PID denetleyici parametrelerini belirlemek için Q-öğrenmeye dayalı evrimsel hesaplama sonuçları gösterilmiştir. (Paul vd., 2018)'da bilinmeyen belirsizlikleri telafi etmek için PD ve PID denetleyici ile birleştirilmiş bir tip-2 bulanık sistem uygulanmış ve denetleyicilerin kararlılığı kanıtlanmıştır. Hasan ve Abbas (Hasan ve Abbas, 2022), bir su altı robotik aracına uygulanan bozucu etkileri veya bilinmeyen dinamiklerinin etkilerini ortadan kaldırmak için doğrusal olmayan uyarlanabilir bulanık bir PID denetleyicisi önermiştir. (Van, 2018)'de belirsiz doğrusal olmayan sistemler için önerilen adaptif bulanık PID tabanlı tekil olmayan hızlı terminal kayma modu denetimi kullanılarak sistemin dayanıklılığının artırılması ve kararlı durum hatasının azaltılması amaçlanmıştır. Başka bir çalışmada, sinir ağlarının ağırlıklarının yerel optimale takılmasını önlemek için uyarlanabilir bir PID sinir ağı ve parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı denetleyici (Kang vd., 2014)'da sunulmuştur. Gerçek zamanlı tanımlama için genellikle çevrimiçi ayarlama yöntemleri tercih edilmektedir. Uyarlanabilir bir PID denetleyicisi (Chang ve Yan, 2005), Duffing-Holmes kaotik sistemi için bozucu etkilerin varlığında sistemin kapalı döngü kararlılığı garanti eden kayma modu denetimine dayalı olarak tasarlanmıştır. Kararlı bir gerçek zamanlı tanımlamaya dayalı yeni bir Radial Basis Function (RBF) ağı kullanılarak çevrimiçi uyarlanabilir PID ayarı önerilmiştir ve (Beyhan ve Alci, 2010)'deki sıvı seviye sisteminin denetiminde uygulanmıştır. Son zamanlarda, karmaşık eşlenik sıralı sistemler için (Cetintas ve Hamamci, 2022)'de PID kararlılık yöntemi sunulmuştur.

Öte yandan Markov atlama sistemleri, rastgele geçiş olasılıklarına sahip stokastik sistemlerin bir sınıfıdır (Saravanakumar ve Ali, 2022). Geçişlere göre, sistemin davranışı aniden değişir ve bu da tahmin edilmesini ve denetlenmesini zorlaştırmaktadır (Kang vd., 2018). (Zhu vd., 2020)'deki farklı gürültü durumları için zamanlama şeması için dağıtılmış bir filtre tasarımı önerilmiştir. Belirsiz zaman gecikmeli Markov atlama sistemlerini denetlemek için (Fang vd., 2019)'da kayan modlu sağlam bir denetleyici önerilmiştir. Ayrıca, (Zhang vd., 2021)'de eşzamanlı olmayan gözlemci tabanlı kayma modu denetimi ile zaman gecikmeli ve konik tip doğrusal olmayan özellikte bir ayırık zamanlı Markov atlama sistemi incelenmiştir. (Vargas vd., 2017)'de, Markov atlama lineer sistemlerinin denetim problemi, mod gözlemi olmadan gerekli optimal koşulu hesaplayan sayısal bir yöntemle tartışılmıştır.

Sistem modelinin bilinmediği durumlarda bir denetleyici tasarlamak belirsizlik, performans, uygulanabilirlik ve doğruluk gibi farklı kriterler açısından zorlu bir süreçtir. Bu zorlukları başarmak için, sistem modellenmeden önce tasarımda kullanılacak yöntemin belirlenmesi ve model tahmini için mümkün olan en iyi verilerin kullanılması gerekmektedir. ELM (Huang vd., 2006), bir sistem modelleme problemini çözerken kullanılacak hızlı ve verimli bir yapay sinir ağıdır. ELM, model doğruluğunu artırmak için girdi verilerinin özelliklerini tanımlayan farklı özellik çıkarma yöntemleriyle birlikte kullanılır. Bu yöntemler, veri kümesindeki değişkenlerin önem sıralamasını belirleyerek model performansını artırır. ELM, mevcut durum ve girdi verileri verilirken MJS'nin tüm olası durumlarını modellemek ve tahmin etmek için eğitilebilir. Bu tahmin daha sonra geçiş olasılıklarına göre MJS'nin durumunu güncellemek için kullanılabilir.

Bir MJS'nin çıkış geri besleme denetimi, sistem modelini kullanmayan denetleme yöntemleri için zorlu bir işittir. Bu nedenle, yazarların en iyi bilgisine göre, bu sistemler özellikle gerçek zamanlı deneylerde zamanla değişen referans sinyalleri için denetlenmemiştir. Bu çalışmada, bilinmeyen MJS'lerin denetimi için verimli parametre tasarımlarına sahip modelleme tabanlı bir PID denetim cihazı önerilmektedir. Bu makalenin katkısının ardındaki temel fikir, önce bilinmeyen MJS'ler için verimli bir sistem tanımlama modeli tasarlamak ve geleneksel PID denetleyicisini yığın optimizasyon yoluyla optimize etmek, ardından modelleme tabanlı PID denetleyicisinin

avantajını gerçek zamanlı uygulamada sergilemektir. Bu amaçla, ergen kimlik arama algoritması (AISA) optimizasyon yöntemini kullanarak ilk kez optimal bir PID denetleme cihazı tasarlanması amaçlanmıştır. Karşılaştırma amacıyla, elde edilen ELM modeli kullanılarak benzer bir PID denetleyicisi parçacık sürüsü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO), yapay arı kolonisi algoritması (Artificial Bee Colony - ABC), gri kurt optimizasyon algoritması (Grey Wolf Optimization - GWO) ve balina optimizasyonu (Whale Optimization - WO) gibi popüler meta-sezgisel algoritmalar ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin tercih edilebilirliğini göstermiş ve AISA ile elde edilen PID parametreleri MJS olarak davranan bir RLC devresinin gerçek zamanlı denetiminde kullanılmıştır.

Makalede önce 2. bölümde Markov atlamalı sistemler tanıtılmış ve ardından 3. bölümde PID denetleyicisi ve ELM ile model oluşturma tanıtıldıktan sonra, 4. bölümde meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları tanıtılmıştır. Daha sonra 5. bölümde simülasyon çalışmaları ve deneysel çalışma detaylandırılmış ve son olarak 6. bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Markov Atlama Sistemleri (Markov Jump Systems)

Markov atlama sistemleri, gelecekteki sistem durumlarının yalnızca mevcut sistem durumuna göre belirlendiği rastgele değişen süreçleri modellemek için kullanılan bir tür stokastik süreçtir. Bir geri besleme mekanizması ile MJS durumunu istenen duruma yaklaştırmak için çeşitli denetim yöntemleri vardır. Sürekli zamanlı tek girişli tek çıkışlı doğrusal olmayan bir sistem

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, u, r_t) \\ y &= \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (1)$$

şeklinde verilebilir. Burada $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$ durum vektörü, $u \in \mathcal{R}$ giriş işareti, $y \in \mathcal{R}$ çıkış işareti ve r_t Markov atlama girdisidir. $\mathbf{f}(\cdot) \in \mathcal{R}^n$ ve $\mathbf{h}(\cdot) \in \mathcal{R}$ doğrusal-olmayan türevlenebilir fonksiyonlardır. r_t teriminin, $r \in S = \{1, 2, \dots, N\}$ şeklinde verilen bir sonlu durum kümesinde değerler alan, ayrık-zamanlı Markov stokastik sürecine dayalı zamanla-değişen bir girdi olduğu varsayılmaktadır. Bu girdinin durum geçiş matrisi $\Pi = \pi_{rk}, r, k \in S$ ile verilmektedir. Geçiş olasılığı

$$P_r\{r_{t+\Delta t} = k \mid r_t = r\} = \begin{cases} \pi_{rk}\Delta t + o(\Delta t), & r \neq k \\ 1 + \pi_{rr}\Delta t + o(\Delta t), & r = k \end{cases} \quad (2)$$

olarak verilebilir. Burada $\Delta t > 0$ ve $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} o(\Delta t)/\Delta t$ şeklindedir. $\pi_{rk} \geq 0$ ifadesi ise $\pi_{rk} = -\sum_{k=1, k \neq r}^N \pi_{rk}$ olmak üzere t anında r kipinden ve $t + \Delta t$ anında k kipinden geçiş oranlarını göstermektedir.

3. Yöntemler (Methods)

Bu çalışmada, dinamiklerinin bilinmediği varsayılan MJS'lerin çıkışlarının, zamanla değişen bir referans işaretini izleyebilmesi için verimli basit bir denetleyici olan PID denetleyicisinin parametrelerinin meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri ile belirlenmesi ele alınmıştır.

3.1 Oransal-İntegral-Türev (PID) Denetimi (Proportional-Integral-Derivative Control)

Tasarımının sadeliği, verimliliği, işlevselliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda halen sıklıkla tercih edilen geleneksel PID denetleyicileri, bir sistemde istenen bir set noktasına ulaşmak veya bir işlemi istenen bir şekilde yönetmek için kullanılır. Geleneksel bir PID denetleyicisi, aktarım işlevi genellikle aşağıdaki gibi "paralel biçimde" yazılan bir denetleyici olarak da bilinir (Astrom ve Hagglund, 1995).

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (3)$$

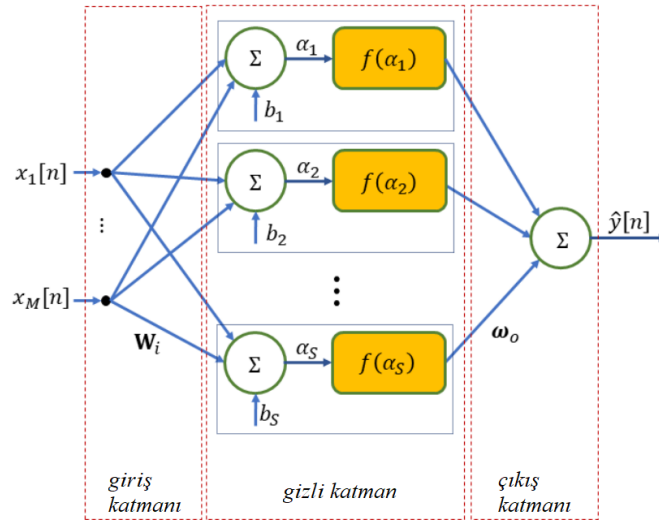
Burada s terimi Laplace değişkenidir. K_p ; genel denetim eylemini sağlayan oransal-kazanç girdisidir. K_i ; sürekli-hal hatasını azaltmak için integral terimidir. K_d ; geçici hal cevabını iyileştiren türev terimidir (Ang vd., 2005). Bir geleneksel PID denetleyicisinin genel gösterimi

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}, \\ u(t) &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

şeklindedir. Burada $T_i = K_p/K_i$ olmak üzere integral zaman sabitini, $T_d = K_d/K_p$ olmak üzere türev zaman sabitini, $e(t) = r(t) - y(t)$ olmak üzere izleme hatasını, $y(t) \in \mathfrak{R}$ sistemin gerçek çıkışını ve $r(t)$ referans işareti ya da ayar-noktasını ifade etmektedir. Bir PID denetleyicisinin başarımı en uygun PID girdilerinin seçimine bağlıdır. PID denetleyicisinin kazanç değerleri doğru bir şekilde ayarlanmazsa özellikle gerçek zamanlı sistemlerde bazı sorunlar ortaya çıkabilir (Abd-Elazim ve Ali, 2018). Örneğin, yanlış ayarlanmış PID kazançları, sistemde osilasyonlara ve titreşimlere neden olabilir ki bu durum, kontrol sinyali üzerinde aşırı tepki ve kararlılık problemleriyle sonuçlanabilir (Özay vd., 2022). Düşük kazanç değerlerine sahip sistem istenen set noktasına ulaşmakta zorlanabilir veya tepki süresi uzayabilir. PID denetleyicisinin kazançları yanlış ayarlandığında, sistemde istenmeyen geçici tepkiler ortaya çıkabilir. PID denetleyicisinin kazançlarının doğru bir şekilde ayarlanması, istenen performansı elde etmek ve kontrol sistemini kararlı tutmak için önemlidir. PID denetleyici parametrelerinin optimum değerlerine ayarlanması bir optimizasyon problemi olarak düşünülebilir. Denetleyici parametrelerinin optimal değerlerinin bulunması sürecinde meta-sezgisel algoritmaların kullanılması denetleyicinin daha verimli çalışmasını sağlar (Izci ve Ekinci, 2023; Vincent ve Nersisson, 2017; Hekimoğlu, 2019; Qi vd., 2019; Joseph vd., 2022). Bu algoritmaların temel amacı, bir popülasyondaki bireylerin genetik operatörler aracılığıyla evrimleştirilmesi sonucunda yeni ve daha iyi bireyler oluşturmak ve bu sayede optimizasyon problemlerinin üstesinden gelmektir. Dördüncü bölümde, PID denetleyicisinin en uygun parametrelerini bulmak için bu çalışmada kullanılan bazı meta-sezgisel yöntemler özetlenmiştir.

3.2 Aşırı Öğrenme Makineleri (Extreme Learning Machines)

ELM ilk olarak gizli katman ileri-beslemeli sinir ağları (Hidden Layer Feedforward Neural Network - HLFN) için en küçük eğitim hatası, en küçük ağırlık normu ve en iyi genelleme performansı ile daha hızlı öğrenme oranları elde etmek için (Huang vd., 2004)'de önerilmiştir. ELM algoritması diğer HLFN algoritmalarından daha hızlı çıktı üretebilmektedir. ELM algoritması, bir tek katmanlı ileri-beslemeli sinir ağının (Single Layer Feedforward Neural Network - SLFN) giriş ağırlıkları ve giriş ofset değerleri keyfi olarak seçilirse, gizli katman çıkış matrislerinin genelleştirilmiş Moore-Penrose tersi kullanılarak çıkış ağırlıklarının elde edilebileceğini önermektedir. Şekil 1'de ELM modelinin yapısı görülmektedir.



Şekil 1. ELM modeli (ELM model)

Giriş katmanı $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]^T \in R^M$ şeklinde tanımlanan M boyutlu giriş vektöründen ve $(S \times M)$ boyutlu ve

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} w_i^{(1,1)} & w_i^{(1,2)} & \dots & w_i^{(1,M)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_i^{(S,1)} & w_i^{(S,2)} & \dots & w_i^{(S,M)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

şeklindeki giriş ağırlıklarından oluşmaktadır. Gizli katman, her biri toplama blokları ve aktivasyon işlevlerine sahip olan S adet sinirden oluşmaktadır. Son olarak, çıkış katmanı, $\mathbf{w}_o = [w_o^{(1)}, \dots, w_o^{(S)}]^T$ çıkış ağırlıkları ve toplama bloğundan oluşmaktadır. Böylece ELM modelin çıkışı \hat{y}

$$\hat{y} = \mathbf{w}_o^T \mathbf{f}(\mathbf{W}_i \mathbf{x} + \mathbf{b}) \quad (6)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_S]^T$ ofset vektörünü ifade etmekte olup, giriş ağırlıkları gibi değerleri rastgele seçilebilir ya da ihmal edilebilir. $\mathbf{f} = (x_1, \dots, x_M, w_i^{(1,1)}, \dots, w_i^{(S,M)}, b_1, \dots, b_S)$ ise aktivasyon işlevidir ve tanjant-hiperbolik, Gaussian vb. işlevler bu amaçla kullanılabilir. NARX model biçiminde olduğu varsayılan bir bilinmeyen sistem,

$$y[n] = f(u_n, \dots, u_{n-n_u}, y_{n-1}, \dots, y_{n-n_y}) \quad (7)$$

şeklinde verilebilir. Burada $[u_n, \dots, u_{n-n_u}]$ giriş ve $[y_{n-1}, \dots, y_{n-n_y}]$ çıkış vektörleri sırasıyla sistemin $(n_u + 1)$ adet girişi ve (n_y) adet çıkışını içermektedir. N adet giriş ve çıkış veri çifti için ELM modeli elde edilmek istenirse ilk olarak ϕ regresyon matrisi

$$\phi = \begin{bmatrix} f(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x}_1 + b_1) & \dots & f(\mathbf{w}_i^{(S)} \mathbf{x}_1 + b_S) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x}_N + b_1) & \dots & f(\mathbf{w}_i^{(S)} \mathbf{x}_N + b_S) \end{bmatrix} \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $\mathbf{w}_i^{(1)}, \dots, \mathbf{w}_i^{(S)}$; \mathbf{W}_i giriş ağırlıkları matrisinin $(n_u + n_y + 1)$ adet bileşenli bir satır vektörünü ifade etmektedir. $[\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N]^T$ ise

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} u_0 \\ \vdots \\ u_{-n_u} \\ y_{-1} \\ \vdots \\ y_{-n_y} \end{bmatrix}, \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_{-n_u+1} \\ y_{-0} \\ \vdots \\ y_{-n_y+1} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{x}_N = \begin{bmatrix} u_N \\ \vdots \\ u_{-n_u+N} \\ y_{-1+N} \\ \vdots \\ y_{-n_y+N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

şeklinde verilmiş olup, bir doğrusal olmayan (Nonlinear AutoRegressive eXogenous - NARX) modelin girişlerini temsil etmektedir. Buradan ELM model

$$\phi \mathbf{w}_o = \mathbf{y} \quad (10)$$

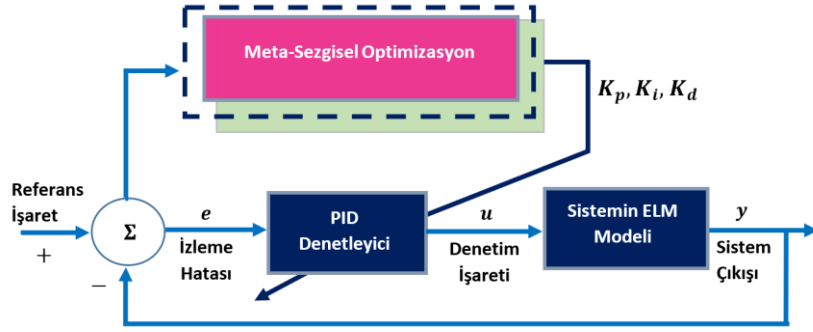
olarak oluşturulabilir ki burada $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_N]^T$ terimi çıkış vektörünü ifade etmektedir. Son olarak, problem bir doğrusal regresyon problemi biçimine dönüşür çünkü giriş ağırlıkları ve ofset değerleri rastgele olarak seçilmiştir ve geriye sadece bilinmeyen çıkış ağırlıklarının bulunması kalmıştır. Çıkış ağırlıkları da

$$\mathbf{w}_o = \phi^\dagger \mathbf{y} \quad (11)$$

şeklinde elde edilebilir ki burada $\phi^\dagger = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T$ Moore-Penrose tersidir ve örneğin tekil değer ayrıştırması ile elde edilebilir.

4. Meta-sezgisel Optimizasyon Yöntemleri (Metaheuristic Optimization Methods)

Birçok alanda önemli uygulamaları olan bilinmeyen sistem tanımlama, özellikle sistem modeli kullanılmadan denetleyici tasarımı gerektiğinde daha da zor bir görev haline gelmektedir. Bilinmeyen sistem tanımlama sürecinde sağlamlıkları, hızlı yaklaşımları ve yerel minimum sorunlarından kaçınmaları nedeniyle meta-sezgisel yöntemler tercih edilebilmektedir (Deng ve Liu, 2017). Bu bölüm, bilinmeyen MJS'lerin denetimi için çeşitli meta-sezgisel parametre tasarım metodolojilerine sahip modelleme tabanlı denetleyiciler önermektedir. Tasarım sürecinde, sistem modelinin ve geçişlerinin bilinmediği, ancak zamanla değişen referans sinyalinin bilindiği varsayılmaktadır. Daha sonra verimli bir yığın optimizasyon yöntemi ile denetleyicinin en uygun parametrelerinin bulunması hedeflenmiştir. Şekil 2'de uygulanan yönteme ait blok şema verilmiştir.



Şekil 2. Meta-sezgisel optimizasyon temelli PID denetleyici parametrelerinin ayarlanması (Tuning of PID controller parameters based on meta-heuristic optimization)

Aşağıdaki alt bölümlerde, PID denetleyicisinin en uygun parametrelerini bulmak için çeşitli meta-sezgisel yöntemler özetlenmiştir. Bu yöntemler arasında bulunan, ergen kimliği arama yaklaşımına dayanan AISA optimizasyonu denetleyici tasarımı amacıyla ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır.

4.1 Ergen Kimlik Arama Algoritması (Adolescent Identity Search Algorithm - AISA)

Ergen Kimlik Arama Algoritması (Bogar ve Beyhan, 2020), ergenlerin kimlik geliştirme/arama sürecinden esinlenen ve optimizasyon problemlerini çözmek için matematiksel olarak modellenen meta-sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Ergenlerin kimlik keşfi sırasında üç farklı davranış ortaya çıkabilir. Bir ergen, akran grubunun davranışını gözlemleyerek ve akıl yürüterek kendi kimliğini oluşturabilir. Ergenlerin akran grubundaki en iyi özellikleri tanımlayıp taklit ettiklerini varsayarsak, en iyi özellikler ortogonal işlev yaklaşımı kullanan bir özellik seçim süreci ile bulunur (Durum 1). Ergenin kimliği, güç düzeyi yüksek bir rol modeli taklit edilerek oluşturulursa, en uygun uygunluk değerine sahip birey akran grubunda rol model olarak seçilebilir (Durum 2). Ergen negatif bir kimlik özelliği benimserse, bu kimlik özelliği algoritmayı keşfedici hale getirmek için kullanılır (Durum 3). AISA 'da kısıtlanmamış tek amaçlı bir tercih

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \underline{b}_j \leq x_j \leq \bar{b}_j \end{aligned} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $f(\cdot)$ hedef işlevdir. x_j terimi $j = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere j^{inci} karar değişkenidir. \underline{b}_j terimi alt sınır ve \bar{b}_j terimi de üst sınır olmak üzere x_j terimini sınırlandırmaktadır.

AISA'da, çözüm uzayının sınırları içerisinde, N ve n'nin sırasıyla ergenleri ve her ergenin kimliğini temsil ettiği yapay bir akran grubu ile rastgele bir başlangıç popülasyonu (\mathbf{X}) oluşturulur. Her \mathbf{x}_j^i içinde i^{inci} ergen kimlik vektörü $\{\mathbf{x}^i\}_{i=1,2,\dots,N}$, kimlik özelliği $x_j^i = \underline{b}_j + U(0,1) \times (\bar{b}_j - \underline{b}_j)$ şeklinde olan j^{inci} ergenin kimliğini tanımlar. Burada $U(0,1)$, $[0, 1]$ aralığındaki rastgele bir sayıdır. Daha sonra, Ortogonal Chebyshev Polinomları (OCP) $\{T_k(X)\}_{k=0,1,2,\dots}$ kimlikleri eşlemek için kullanılır (Cetin vd., 2019) ve ardından ağırlık parametreleri, regresyon matrisi (Ψ) kullanılarak tahmin edilir. Gruptaki bireylerin, $\hat{x}_j^i = 2 \frac{x_j^i - \underline{b}_j}{\bar{b}_j - \underline{b}_j} - 1$ olarak ifade edilen bir işlev ile normalleştirilmesi sağlanır. Ardından, regresyon matrisi (Ψ) tanımlanır ve ağırlık parametreleri en küçük kareler hata yaklaşımı $\hat{\omega} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \mathbf{f}$ kullanılarak tahmin edilir. Her bir \hat{x}_j^i 'T için uygunluk değeri hesaplanır ve kaydedilir. Son olarak, algoritmanın yinelemelerinin her adımında her bir ergenin rastgele bir şekilde önerilen üç durumdan birini seçtiği varsayılır. AISA'ya ait işlem adımları Algoritma 1'de sunulmuştur.

Algoritma 1. AISA algoritması (AISA algorithm)

1	N, n, k, m_{in} girdilerini belirle,
	$x_j^i, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, n$ olacak şekilde ergen gruplarını rasgele başlat.
	Her grubun uygunluk işlev değerini hesapla
	$t < m_{in}$ YA DA en iyi uygunluk işlevi $< \epsilon$ olduğu sürece
2	<ul style="list-style-type: none"> • Normalize edilmiş giriş matrisi $\hat{\mathbf{X}}$ oluştur, • Ağırlık vektörlerini ($\hat{\omega}$) hesapla, • Kısmi uygunluk matrisi ($\hat{\mathbf{F}}$) tanımla, • En iyi uygunluk değerine sahip ergen grubunu belirle (\mathbf{x}^*).
	Her 1'den N'ye kadar i için
3	$r_4 \sim U(0,1)$ güncellemesi yap
	Eğer $r_4 \leq \frac{1}{3}$ ise
4	<ul style="list-style-type: none"> • $r_1 \sim U(0,1)$ güncellemesi yap • $x_{yeni}^i = x_i - r_1(x^i - x^*)$
5	Değil Fakat $r_4 > \frac{1}{3}$ VE $r_4 \leq \frac{2}{3}$ ise
6	<ul style="list-style-type: none"> • $r_2 \sim U(0,1)$ güncellemesi yap • \mathbf{x}^{rm} rol modelini bul • $p \neq rm$ olacak şekilde rastgele bir ergen seç • $x_{yeni}^i = x_i - r_2(x^p - x^{rm})$
7	Değil ise
8	<ul style="list-style-type: none"> • $r_3 \sim U(0,1)^n$ güncellemesi yap • Negatif kimlik vektörü (\mathbf{x}^q) oluştur. • $x_{yeni}^i = x_i - r_3(x^i - x^q)$
9	Son
10	Sınır değerleri denetimi ve güncelleme mekanizmalarını uygula
11	Son
12	Son

4.2 Balina Optimizasyonu Algoritması (Whale Optimization Algorithm- WO)

Balonlu ağ saldırısını simüle ederek kambur balinaların avlanma davranışlarını taklit eden WO (Mirjalili ve Lewis, 2016), son zamanlarda çok değişkenli karmaşık işlevleri optimize etmek için popüler hale gelmiştir. Kambur balinalar küçük balıkları avlarlar, kabarcık ağı besleme yöntemi olarak bilinen özel bir balık avı türü ile yüzeyi kapatırlar. Bu beslenme yönteminde kabarcıkla ilgili iki manevra vardır: "yukarı doğru spiraller" ve "çift döngüler". İlk manevrada balinalar yaklaşık 12 m derinliğe dalarlar ve yüzeye yüzerek avın etrafında spiral kabarcıklar oluştururlar. Diğer manevra 3 farklı aşamadan oluşur: mercan döngüsü, lobtail ve yakalama döngüsü. (Mirjalili ve Lewis, 2016)'de kambur balinaların balon ağı besleme manevrası matematiksel olarak modellenmiştir. WO'ye göre rastgele değerlerle oluşturulan bir balina grubundaki lider balina (x^*) av aramak için farklı hızlarda ve yönlerde manevralarla yüzer. x^* 'in hareketlerini taklit eden gruptaki en düşük fonksiyon değerine sahip balina diğer balinalara (x) rehberlik eder. Balinalar hareketlerini ve konumlarını x^* 'dan olan uzaklıklarına göre belirler. Balina optimizasyonu için işlem adımları Algoritma 2'de sunulmuştur (Mirjalili ve Lewis, 2016).

Algoritma 2. WO algoritması (WO algorithm)

```

1   $x_i$  balina grupları vektörlerini başlat
   Tüm balina gruplarının uygunluk işlevini hesapla ve en iyisini ( $x^*$ ) bul tanımla
    $t < m_{in}$  olduğu sürece
2  Her balina grubu için
3   $a, A, C, l$  ve  $p$  değişkenlerini güncelle
   Eğer  $p < 0.5$  ise
4  Eğer  $|A| < 1$  ise
5   $D = |Cx^*(t) - x(t)|$  olmak üzere  $x(t+1) = x^*(t) - AD$ 
6  Değil Fakat  $|A| \geq 1$  ise
   Bir rastgele arama ajanı  $x_{rand}$  oluştur
    $D = |Cx_{rand} - x(t)|$  olmak üzere  $x(t+1) = x_{rand} - AD$ 
   son
   Değil Fakat  $p \geq 0.5$  ise
    $D' = |x^*(t) - x(t)|$  olmak üzere  $x(t+1) = D'e^{bl} \cos(2\pi l) + x^*(t)$ 
   son
7  son
   Herhangi bir balinanın arama alanının ötesine geçip geçmediğini denetle ve düzelt değiştir
8  Her balina grubunun uygunluk işlevi değerini belirle  $x(t+1)$ 
   Eğer daha iyi bir sonuç varsa en iyi balina  $x^*(t)$  bilgisini değiştir
10 son

```

WO'da x^* , en iyi çözümün konum vektörüdür. A ve C katsayı vektörleridir. Bu vektörler $A = 2ar - a$, $C = 2r$ olarak tanımlanır ki burada a doğrusal olarak 2'den 0'a düşürülür ve r , $[0,1]$ cinsinden rastgele bir vektördür. b , logaritmik spiralin şeklini tanımlayan bir sabittir ve l , $[-1,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır. m_{in} ve t sırasıyla en çok yineleme sayısı ve geçerli yinelemedir.

4.3 Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimization- GWO)

GWO, gri kurtların (Canis lupus) liderlik hiyerarşisinden ve avlanma davranışından ilham alan meta-sezgisel bir yöntemdir. GWO için işlem adımları Algoritma 3'de sunulmuştur (Mirjalili vd., 2014).

Algoritma 3. GWO algoritması (GWO algorithm)

```

1   $x_i$  gri kurt grupları vektörlerini başlat
    $\alpha, A$  ve  $C$  değişkenlerini başlat
   Her grubun uygunluk işlev değerini hesapla
    $x_\alpha, x_{beta}$  ve  $x_\delta$  bireylerini belirle
    $t < m_{in}$  olduğu sürece
2  Her grup için
3   $x_1 = x_\alpha - A_1 D_\alpha$ ,  $x_2 = x_\beta - A_2 D_\beta$  ve  $x_3 = x_\delta - A_3 D_\delta$  olmak üzere
    $x(t+1) = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$  şeklinde güncelle
4  son
5   $\alpha, A$  ve  $C$  değişkenlerini güncelle
   Her grubun uygunluk işlevi değerini belirle
    $x_\alpha, x_{beta}$  ve  $x_\delta$  bireylerini güncelle
6  son

```

GWO, en uygun çözüme ulaşmak için her biri aday çözüm olarak kabul edilen dört tür gri kurt (alfa, beta, delta ve omega) kullanır. Avlanma, uyuma yeri, uyanma zamanı vb. konularda karar verici olan alfa'nın kararları sürüye dikte edilir. Betalar, alfa'nın komutlarını güçlendiren, alfa'ya geri bildirim veren ve ona yardım eden ikincil kurtlardır. En düşük rütbeli omega kurtları, baskın kurtların yanında sürünün dengede kalmasına yardımcı olur. İziciler, yaşlılar, avcılar ve bakıcılar kategorisindeki delta kurtları alfalara ve betalara boyun eğerler, ancak omega'ya hükmederler. Algoritmada, avlanma davranışını simüle etmek için üç davranış taklit edilir: av aramak,

avı kuşatmak ve ava saldırmak. Algoritmaya göre, α en iyi çözüm olarak kabul edilir. İkinci ve üçüncü en iyi çözümler sırasıyla β ve δ çözümleridir. Kalan aday çözümler ω olarak kabul edilir. Gri kurtlar, avlarını bir grup olarak takip ettikleri ortak bir avlanma stratejisi kullanırlar. Avı kuşatarak ve yörüngesini değiştirerek, onu başarılı bir şekilde yakalama olasılığını artırır. Kurtların konumu α değerine göre güncellenir. β kurdu, α 'ya en yakın kurt olarak belirlenir ve liderliği altında bir grup oluşturur. δ kurdu, α ve β 'dan uzakta bir kurt olarak tanımlanır ve bir grup oluşturur. ω kurdu diğer kurtların etrafında dolaşarak yeni aday çözümler üretir. GWO algoritmasında $D_\alpha = |C_1x_\alpha - x|$, $D_\beta = |C_2x_\beta - x|$, $D_\delta = |C_3x_\delta - x|$. A ve C katsayı vektörleri şu şekilde hesaplanır: $A = 2ar_1 - a$, $C = 2r_2$. Yinelemeler sırasında, a bileşenleri doğrusal olarak 2'den 0'a düşerken, r_1 ve r_2 [0,1] aralığında rastgele vektörlerdir.

4.4 Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm - ABC)

ABC algoritması (Karaboga ve Basturk, 2007), çok değişkenli fonksiyonları optimize etmek için yapay arı kolonilerinin beslenme davranışından esinlenen basit ve etkili bir meta-sezgisel yaklaşımdır. Algoritma, kolonideki arıların beslenme, dans etme ve gezinme davranışlarına benzer arama yaparak arama alanında en iyi çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Yapay arı kolonisinde, besin kaynağını seçen seyirci arılar, daha önce ziyaret edilen besin kaynağına giden istihdam edilen arılar ve rastgele arama yapan keşif arıları vardır. Algoritma başlangıcında bir yapay arı kolonisi oluşturulur, rastgele bir dizi besin kaynağı konumu seçilir ve miktarları belirlenir. İstihdam edilen arılar rastgele seçilmiş bir çözüm etrafında çalışır ve o noktaya yakın başka aday çözümler arar. Keşfedilen besin kaynağı, önceki konumdaki çalışan arının kaynağından fazlaysa, çalışan arı eski konumunu unuttur ve yeni konumu günceller. Bu bilgi kovanda bekleyen seyirci arılarla paylaşılır. İzleyici arı hem açgözlü bir seçim yaklaşımıyla besin kaynağını seçer hem de miktarını denetler. Besin kaynağının konumu bir sınır toleransı ile daha da iyileştirilemezse, o besin kaynağının terk edildiği varsayılır. Arılar bir besin kaynağını terk ederse, izci arı rastgele yeni bir tane seçer. ABC algoritmasının her döngüsü, yeni bir besin kaynağı aramak için en fazla bir izci kullanır. ABC algoritmasında v_i yeni aday çözümdür ve ϕ_i [-1,1] cinsinden tekdüze bir rasgele sayıdır. ABC yöntemine ait belirtilen işlem adımları Algoritma 4 (Karaboga ve Basturk, 2007)'de sunulmuştur.

Algoritma 4. ABC algoritması (ABC algorithm)

```

1  Başlangıç girdilerini belirle;
    $m_{in}$ :en fazla tekrarlama adedi,  $x_1, \dots, x_N$ : arı kolonilerini  $x_i = x_{min} + \text{rand}(0,1)(x_{max} - x_{min})$  şeklinde oluştur

   Her grubun uygunluk işlev değerini hesapla
    $t < m_{in}$  olduğu sürece
2  |   Her işçi arı için
   |   •  $v_i = x_i + \phi_i(x_i - x_k)$  olmak üzere yeni  $v_i$  çözümlerini oluştur
   |   • Her  $v_i$  için uygunluk işlevini  $f(v_i)$  hesapla
   |   •  $x_i$  ve  $v_i$  arasında açgözlülüğe dayalı eleme mekanizmasını uygula
3  |
4  |   son
5  |    $p_i = \frac{f_i}{\sum_{n=1}^N f_n}$  ile olasılık değerini hesapla
   |   Her seyirci arı için
6  |   |   Eğer  $\text{rand} < p_i$  ise
   |   |   •  $v_i = x_i + \phi_i(x_i - x_k)$  olmak üzere yeni  $v_i$  çözümlerini oluştur
   |   |   • Her  $v_i$  için uygunluk işlevini  $f(v_i)$  hesapla
   |   |   •  $x_i$  ve  $v_i$  arasında açgözlülüğe dayalı eleme mekanizmasını uygula
7  |   |
8  |   |   son
9  |   |   son
10 |   İzci Arı fazı
    |   Eğer izci için ayrı bir çözüm var ise
11 |   |   Bu çözümü,  $x_i = x_{min} + \text{rand}(0,1)(x_{max} - x_{min})$  şeklinde rastgele oluşturulan bir çözümle
12 |   |   son
13 |   son

```

4.5 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO)

PSO, kuş sürüleri, balıklar veya böcek sürüleri gibi belirli hayvanların kolektif davranışlarından ilham alan güçlü bir meta-sezgisel algoritmadır (Kennedy ve Eberhart, 1995). PSO algoritmasının prensibi, nesnel bir fonksiyonun optimizasyonunu ve arama alanındaki bir grup parçacığın hareketi ile en iyi çözümü bulmayı içerir. PSO'daki her parçacık, optimizasyon probleminin potansiyel bir çözümünü temsil eder ve nesnel işleve göre değerlendirilen konumu, hızı ve uygunluk değeri ile karakterize edilir. Her yinelemede bir parçacık, kendisinin ve sürünün en iyi çözümlerini kaydederek küresel optimum çözümü bulmaya çalışır. D boyutlu arama alanında rastgele oluşturulmuş bir gruptaki N adet parçacıktan her birinin ($\mathbf{x}_i = [x_{i1}, \dots, x_{iD}]$) şeklinde bir konum vektörü ve ($\mathbf{v}_i = [v_{i1}, \dots, v_{iD}]$) şeklinde bir hız vektörü vardır. g_{best} koordinatı, sürünün en iyi çözümünün bulunduğu arama alanındaki konumu tanımlar. Her yinelemede, uygunluk işlevi, her parçacığın önceki en iyi konumu p_{best_i} için değerlendirilir. Karşılık gelen yerel konum güncellemesi, parçacığın mevcut konumuna ve hızına göre belirlenir. Her parçacık, tüm parçacıklar arasında en iyi uygunluk değerini seçerek tüm sürüde en iyi küresel konum güncellemesinin belirlenmesine yol açar. Yeni konumlar ve hızlar güncellendikten sonra, her parçacığın uygunluk değeri yeniden hesaplanır. PSO'nun çıktısı, en iyi uygunluk değerinden ve buna karşılık gelen en iyi konumdan oluşur. PSO için belirtilen işlem adımları Algoritma 5'te sunulmuştur.

Algoritma 5. PSO algoritması (PSO algorithm)

```

1   $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i$  vektörlerini başlat
    $p_{best_i} = x_i$  ve  $g_{best} = (g_{best} | \min(f_{p_{best_i}}))$  tanımla
    $t < m_{in}$  olduğu sürece
2  |   Her  $p$  pozisyonundaki  $x_p$  parçacık grubu için
3  |   |   Uygunluk işlevini hesapla  $f(x_p)$ 
4  |   |   |   Eğer  $f(x_p) < p_{best_p}$  ise
5  |   |   |   |    $p_{best_p} \leftarrow f(x_p)$ 
6  |   |   |   |    $g_{best} \leftarrow x_p$ 
7  |   |   son
8  |   Her mevcut grup parçacığı için
9  |   |    $V_i^{t+1} = k_w V_i^t + k_p a_1 (p_{best_p}^t - x_i^t) + k_g a_2 (g_{best_p}^t - x_i^t)$ 
10 |   |    $x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$ 
11 |   son
12 son

```

5. Uygulama Sonuçları (Application Results)

Bu çalışmada, bir RLC devresi, matematiksel modelinin bilinmediği ve parametresinde rastgele geçişlerin meydana geldiği düşünülen bir ELM modeli ile tanımlanmıştır. Ardından, yaklaşık sistem modelinin elde edildiği bu devreyi denetlemek için geleneksel bir PID kontrol cihazı tasarlanmıştır. Ek olarak, çeşitli meta-sezgisel parametre tasarım metodolojileri kullanılarak modellenme tabanlı denetleyiciler önerilmiştir.

5.1 Markov davranışlı RLC Devresinin ELM ile Tanımlanması (ELM Identification of Markovian RLC Circuit)

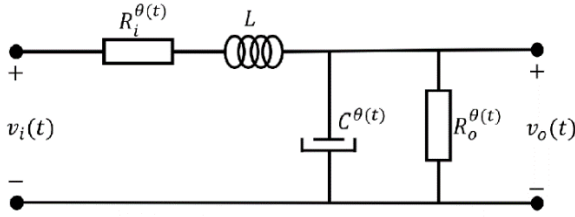
RLC devresinin şematik gösterimi ve gerçek zamanlı deney kurulumu sırasıyla Şekil 3(a) ve Şekil 3(b) 'de gösterilmiştir. Devrenin matematiksel modeli aşağıdaki dinamiklerle verilebilir:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{-x_1(t)}{C^{\theta(t)} R_0^{\theta(t)}} + \frac{x_2(t)}{C^{\theta(t)}} + d_1(t), \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{-x_1(t)}{L} - \frac{R_i^{\theta(t)} x_2(t)}{L} + \frac{u(t)}{L} + d_2(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Burada $u(t)$ denetim işaretini temsil eder, $x_1(t)$ kapasitans voltajıdır ($v_C(t)$) ve $x_2(t)$ endüktans akımıdır ($i_L(t)$). Tasarlanan devre için denetim işareti $u_{min} = 0$ V, $u_{max} = 2$ V aralığında ve örnekleme süresi de $\tau_{min} = 0$ ms, $\tau_{max} = 1$ ms aralığında tutulmuştur. Ayrıca, $d_1(t)$ ve $d_2(t)$ parametreleri, parametre belirsizlikleri ve bilinmeyen bozucu etkiler vb. nedeniyle toplam belirsizlik işlevlerini ifade etmektedir. Denklem 13'teki sistem, (Vargas vd., 2017)'deki gibi üç Markov atlama sistemi elde etmek için her $t \geq 0$ için $\theta(t) = 1, 2, 3$ geçiş değişkenine bağlı olarak üç farklı mod geçişine sahiptir. Bu devrede L endüktans değeri sabit olacak şekilde 10 mH olarak seçilirken,

dirençlerin değerleri $R_i^{\theta(t)} = \{10 \Omega, 5 \Omega, 3.3 \Omega\}$, $R_o^{\theta(t)} = \{100\Omega, 50 \Omega, 33.3 \Omega\}$ ve kondansatör $C^{\theta(t)} = \{10 \mu f, 110 \mu f, 440 \mu f\}$. Devre alt sistemleri arasındaki geçişleri üretmek için, sürekli zamanlı Markov RLC devresi için geçiş olasılık matrisi şu şekilde kullanılmıştır:

$$P = \begin{bmatrix} -0.2936 & 0.2016 & 0.0920 \\ 0.2758 & -0.5634 & 0.2876 \\ 0.1127 & 0.2343 & -0.3470 \end{bmatrix} \quad (14)$$



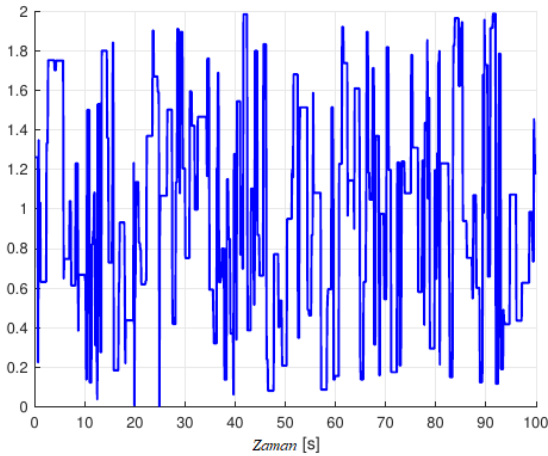
(a) RLC devresi (RLC circuit)



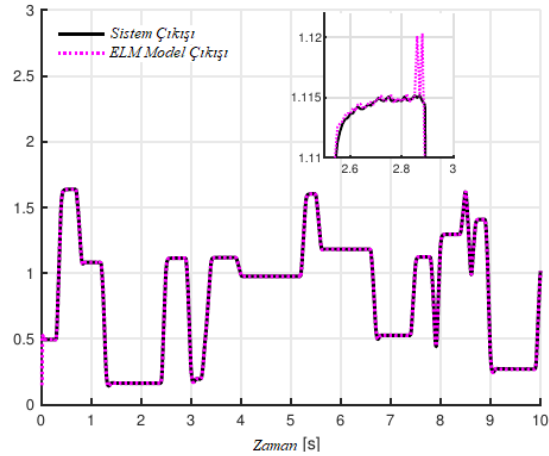
(b) Gerçek-zamanlı deney düzeneği (Real-time set up)

Şekil 3. Markovian RLC devresinin deneysel kurulumu (Experimental set-up of the Markovian RLC circuit)

Tasarım aşamasında bileşenlerin tüm değerleri bilinmesine rağmen, ilgili belirsizlikler nedeniyle RLC devresinin dinamikleri bu çalışmada bilinmeyen olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, PID parametre optimizasyonu için gerçek zamanlı sistem yerine bir ELM modeli kullanılmıştır. Verimli bir ELM modeli elde etmek için önce devreye $T_{son} = 100$ s olacak şekilde rastgele bir giriş sinyali uygulanır ve sistemin çıkışı $T_s = 1$ ms örnekleme periyodunda ölçülmüş ve ELM modelin eğitimi için gerekli giriş-çıkış verileri hazırlanmıştır. Giriş sinyalinin genliği, Şekil 4(a)'da gösterildiği gibi sistemin tüm dinamik özelliklerini ortaya çıkarmak için keyfi olarak değişen zaman dilimleri için keyfi olarak 0-2 V olarak değişmektedir. Sistem modelinin, Denklem 7'deki gibi NARX modeli biçiminde olduğu varsayılmıştır. Bu giriş-çıkış veri çiftleri, ELM modelinin girdilerini Denklem 9'daki gibi oluşturmak için deneysel olarak seçilen $n_u = 3$ ve $n_y = 3$ için yeniden düzenlenmiştir. Ardından, ELM modelinin rastgele giriş ağırlıkları ve ofset değerleri kullanılarak çıkış katman ağırlıkları tahmin edilmiştir. Daha sonra, en iyi performansa sahip yaklaşım modeli, RLC devresinin dinamiklerini temsil eden son ELM modeli olarak seçilmiştir. ELM modelinin test verilerinin 0-10 s aralığındaki test performansı Şekil 4(b)'de gösterilmiştir. Ayrıca ELM modelinin gerçek zamanlı RLC devresi ile hemen hemen aynı çıkış değerlerini ürettiğini de ortaya koyulmuştur. Sonuç olarak, test verilerinin modelleme performansı Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error - MSE) cinsinden 1.3092×10^{-4} olarak hesaplanmıştır.



(a) Uygulanan giriş işareti (Applied control signal)



(b) Modelleme başarımı (Modelling performance in (0-10)s)

Şekil 4. Gerçek zamanlı veri temelli ELM modelleme (Real-time data based ELM modelling)

5.2 Optimizasyon Temelli PID Denetleyicisi Tasarımı (Optimization Based PID Controller Design)

Önceki bölümde detaylandırılan meta-sezgisel optimizasyon algoritması AISA, PID kontrol cihazının parametrelerinin optimal değerlerini bulmak için kullanılmıştır. Optimizasyon ile çözümlenmesi istenen hedef işlev

$$\min_{\theta} F(e) = 0,5 e^2 = 0,5(y_{ref} - y)^2 \quad (15)$$

$$0 < \theta < 1$$

şeklinde Lyapunov fonksiyonu olarak seçilmiştir. Burada y_{ref} referans işaretini, y aktif nüfusun bir üyesi kullanılarak oluşturulan PID denetleyicisi tarafından üretilen giriş işareti ile manipüle edilen sistem çıkışı ve e bunlar arasındaki farkın oluşturduğu izleme hatasını ifade etmektedir. $\theta = [K_p, K_i, K_d]$ ise şeklinde olup K_p, K_i ve K_d , Denklem 16 ile verilen PID denetleyicisinin parametreleridir. θ parametresine ait alt ve üst sınırlar ızgara-arama (grid-search) yöntemi ile deneysel olarak elde edilmiştir.

$$u[k + 1] = u[k] + K_p(e(k) - e(k - 1)) + K_i e(k) + K_d(e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)) \quad (16)$$

AISA optimizasyonunun performansı, literatürde en çok tercih edilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından biri olan PSO (Kennedy ve Eberhart, 1995) ile karşılaştırılmıştır. PSO'ya ek olarak, literatürde popüler meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları olan ABC algoritması (Karaboga ve Basturk, 2007), GWO (Mirjalili vd., 2014) ve WO (Mirjalili ve Lewis, 2016)'de karşılaştırma için kullanılmıştır. Algoritmalar, 16 GB RAM bellek ile 2,60GHz'de Intel (R) Core (TM) i7-5600U merkezi işlem birimine sahip bir kişisel bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Optimizasyon sürecinde, referans sinyali ile sistemin çıkışı arasındaki izleme hatasını grubun bir üyesinin başarımını ortaya çıkaran bir uygunluk değeri olarak hesaplamak için bir sistem modeli gereklidir. Bu amaçla, dinamikleri bilinmediği varsayıldığı için gerçek zamanlı RLC devresi yerine tasarlanmış ELM modeli kullanılmıştır. ELM modelinin çıktısı, mevcut gruptaki bireylerle oluşturulan aday PID denetim cihazı tarafından manipüle edilen giriş işareti ile hesaplanmaktadır. AISA yöntemi istenen parametre optimizasyonunu sağlamak üzere çalışmaya başlamak için popülasyon miktarı, yapılacak en fazla iterasyon adedi, optimize edilecek parametre sayısı ve bu sayı kadar alt ve üst sınır bilgisinin baştan belirlenmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle karşılaştırma amacıyla kullanılan yöntemler de bu özelliklere sahip olacak şekilde seçilmişlerdir. ABC, GWO ve WO algoritmaları da benzer özelliktedir. Bunlar dışında literatürdeki referans algoritmalar arasında gösterilebilecek olan PSO algoritması ise belirtilen temel başlangıç atamaları haricinde $v_{min}, v_{max}, c_1, c_2$ gibi başka başlangıç parametreleri tanımına ihtiyaç duymaktadır. PSO'ya ait bu parametreler hedef çalışmaya uymak amacıyla standart ve literatürde kabul görmüş değerleriyle kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan algoritmaların arama sürecini aynı koşullar altında başlatmasını sağlamak için öncelikle PID denetleyicinin parametreleri olan K_p, K_i ve K_d için alt ve üst sınırlar $b_{lower} = [0,0,0], b_{upper} = [1,1,1]$ ile belirlenen tarama uzayında $nPop = 100$ üyeli bir rastgele bireyler grubu matrisi oluşturulmuş ve her algoritma başlangıç aday grubu olarak bu grubu kullanacak şekilde başlatılmıştır. Bu sınır değerlerinin seçilmesi için literatürce bilinen ızgara arama (grid-search) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma sonucunda K_p, K_i ve K_d için en uygun aralık belirtilen şekilde hesaplanmıştır. Durdurma şartı olarak en çok yineleme sayısı $maxiter = 500$ ve en çok üretim duraklama adedi (maximum stall generation) $maxStallGen = 50$ olarak seçilmiştir. Her algoritmanın temel arama sürecinde rastgelelik içeren işlemler kullanması nedeniyle, başlangıç nüfusu aynı olsa bile algoritmalar her yeni çalışmada farklı bir en iyi uygunluk değeri ($F(e)_{best}$) bulabilmektedir. Bu nedenle, çalışmanın bu aşamasında, durdurma şartlarından en az birine ulaşıncaya kadar her algoritma aynı ayarlarla $RunNo = 50$ kez çalıştırılmıştır. Ardından, bu süreç içinde elde edilen $F(e)_{best}$, bu uygunluk değerine ulaşıncaya kadar geçen sn olarak süre ($T(F(e)_{best})$) ve süreç içinde uygunluk değerinin hesaplanma adedini ifade eden (Cost Function Execution Count - $CFEC(F(e)_{best})$) değerleri kaydedilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur. Benzetim çalışmaları sonucunda en küçük uygunluk değeri 10^{-9} hassasiyetle, $F(e)_{best} = 2.726953388$ olarak bulunmuştur. Algoritmalar $RunNo = 50$ olacak şekilde durdurma şartları dahilinde çalıştırılırken $F(e)_{best}$ değerine GWO ve WO ulaşamamışken, AISA 15, PSO 35 ve ABC 43 kez ulaşabilmiştir. Buna rağmen $F(e)_{best}$ değerine ulaşırlarken geçen hesaplama sürelerine ait en iyi zaman değeri $T(F(e)_{best})$ AISA'ya aittir. Ayrıca $F(e)_{best}$ değerine ulaşırlarken uygunluk değeri işlevinin hesaplama adedini gösteren $CFEC(F(e)_{best})$ için de AISA, en iyi değere sahip olan PSO algoritmasına çok yakın bir değere sahiptir. Bu durum Tablo 1'de belirtilmiştir. Bu sonuçlar yakın zamanda önerilen AISA yönteminin, dinamikleri bilinmediği varsayılan ve ELM ile modellenen bir MJS'nin zamanla değişen bir referans işareti için çıkış denetimi yapacak bir PID denetleyicisinin parametrelerinin bulunmasında yeterli başarıma sahip olduğunu göstermektedir.

ELM modeli tasarlanırken, sistemin iç dinamiklerini harekete geçirmek için rastgele giriş sinyali uygulanmıştır. Bu nedenle, tasarlanan doğrusal olmayan ELM modeli, RLC dinamiğinin tüm olası Markov modlarını kapsamaktadır. Bu model, yığın optimizasyon içerisinde çıkış işaretini üreten sistem modeli olarak kullanılmış ve model çıkışının zamanla değişen bir referans işaretini izlemesini sağlayacak PID denetleyicisinin parametreleri de AISA

optimizasyonu ile $K_p = 0.45920349$, $K_i = 0.14835754$ ve $K_d = 0.07168092$ olarak bulunmuştur. Şekil 5(a) ve Şekil 5(b), sırasıyla yığın parametre optimizasyon durumu için en iyi izleme başarımını ve uygulanan denetim işaretini göstermektedir. Optimum PID denetleme cihazı, Markov geçişlerinin etkisi altında yeterli bir denetim başarımına sahiptir. Örnek olarak, kontrol edilen sistemin $t = 20$ sn anındaki izleme performansı, Şekil 5(a)'daki küçük bir pencere tarafından odaklanmıştır.

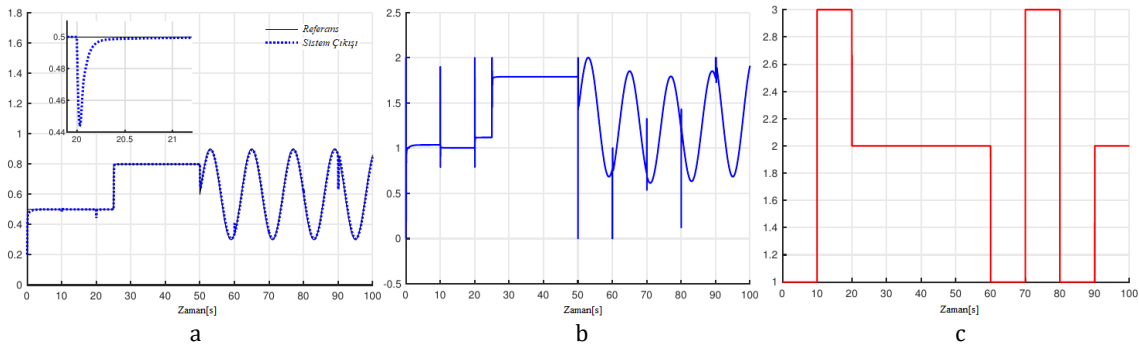
Benzetim çalışmalarından sonra, AISA tarafından elde edilen PID denetleme cihazının optimum tasarımı, üç modlu bir MJS gibi davranan gerçek zamanlı RLC devresinin denetiminde kullanılmıştır. Ek olarak, PID kontrol cihazının parametreleri, karşılaştırma için geleneksel Z-N ayarlama yöntemi kullanılarak sırasıyla $K_p = 0.5$, $K_i = 0.25$, $K_d = 0.074$ olarak elde edilir. Bu PID girdileri ile yapılan denetimde tatmin edici bir performans seviyesi sağlamadığından uygulama sonuçları verilmemiştir. Optimum PID denetleyicisi, gerçek-zamanlı deneyler için Şekil 6'da gösterilen yeterli izleme performansına sahiptir. Şekil 6(a), kapasitör voltajıyla ilgili referans izlemeyi göstermektedir. Şekil 6(b), Şekil 6(c)'de belirtilen olasılık geçişlerine göre uygulanan denetleme gerilimlerini göstermektedir. Markov geçişlerinin olumsuz etkilerine rağmen, gerçek zamanlı RLC sistemi, AISA tarafından elde edilen optimum PID denetleyicisi tarafından uygun şekilde manipüle edilmiştir, böylece sistem çıkışı hem merdiven hem de sinüzoidal parçalara sahip bir referans sinyali izleyebilmiştir. Bunu daha iyi gösterebilmek için, $t = 30$ sn ve $t = 90$ sn 'daki mod geçişleri, Şekil 6(a)'daki küçük pencereler tarafından odaklanmıştır. Geçiş gerçekleştiğinde, gerçek zamanlı sistem dinamiği ve matematiksel model tam olarak uyum sağlamadığından simülasyonlardakinden daha fazla salınımin var olduğu görülmektedir. Performans ölçümleri Tablo 2'de verilmiştir, burada bilinmeyen MJS'lerin denetimi için yığın optimizasyon tabanlı ayarlama yönteminin geçerli olduğu görülmektedir. Gerçek zamanlı deneylerin başarımleri, karesel hataların ortalamasının karekökü (Root Mean Square Error - RMSE) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Yığın optimizasyon sonuçları (Batch optimization results)

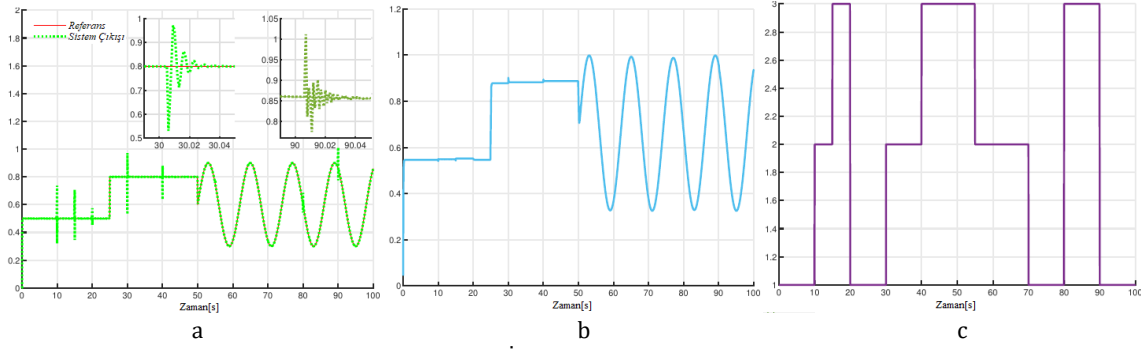
Başarım	AISA	PSO	ABC	GWO	WO
$F(e)_{best}$	2.726953388	2.726953388	2.726953388	2.726953480	2.726981494
$T(F(e)_{best})(sn)$	163,4195	180,1056	311,6661	124,8971	31,5652
$CFEC(F(e)_{best})$	50100	49600	100274	35900	9300

Tablo 2. PID denetleyicisinin gerçek zamanlı performansları (Real-time performances of the PID controller)

Metrikler	Performans
$RMSE(e) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e(t)^2 dt}$	0.0047
$P(u) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt$	0.2616



Şekil 5. Yığın girdi tasarımı benzetim sonuçları, a) İzleme başarımı, b) Uygulanan denetim işareti, c) Mod geçişleri (Batch parameter design simulation results, a) Control results, b) Applied control signal, c) Mode transitions)



Şekil 6. Yığın girdi tasarımı gerçek-zamanlı sonuçlar, a) İzleme başarımları b) Uygulanan denetim işareti c) Mod geçişleri (Batch parameter design real-time results, a) Control results, b) Applied control signal, c) Mode transitions)

6. Tartışma ve Sonuçlar (Discussion and Conclusion)

Her kontrol mühendisinin bildiği gibi, sürekli Markov geçişleri ve zamanla değişen referans sinyalleri ile karşılaşıldığında Z-N yöntemi ve parametrelerin manuel olarak ayarlanması maalesef yetersizdir. Markov davranışlı atlama sistemleri, rastgele geçişlerin ve çevresel gürültülerin neden olduğu belirsiz dinamikler nedeniyle kontrol edilmesi zor süreçlerdir. Bu çalışmada, dinamiği bilinmeyen bir RLC devresi üzerinden sunulan Markov Atlama Sisteminin çıkışını kontrol etmek için PID denetleyici parametrelerinin ayarlanması, yığın optimizasyon yöntemi ile çözülmüştür. Bu nedenle, birincil adım olarak, öngörülemez üç Markov sıçramasının gerçekleştiği RLC devresinden temel giriş-çıkış verileri elde edilir. Bu veriler, zaman ve genlik bakımından rastgele değişen giriş sinyallerine karşılık gelen çıkış değerleri ile MJS'nin tüm dinamiklerini kapsamlı bir şekilde temsil etmektedir. Daha sonra, gerçek zamanlı RLC devresi yerine yığın optimizasyon sürecindeki simülasyonlarda kullanılmak üzere bu verilere dayanarak daha az karmaşıklığa sahip bir ELM modeli oluşturulmuştur. Bu bağlamda, optimum PID parametreleri AISA optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve PSO, GWO, WO, ABC gibi literatürde sıklıkla tercih edilen veya nispeten yeni meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın birincil katkısı, gerçek zamanlı bir RLC devresinden toplanan gerçek zamanlı verileri kullanarak kara kutu tanımlaması yapılmış olmasıdır. İkinci katkı ise, bilinmeyen bir modele sahip bir MJS'yi denetlemek için AISA optimizasyon yöntemini kullanarak ilk kez optimal bir PID denetleme cihazı tasarlanmış olmasıdır. Simülasyon sonuçları, AISA optimizasyon yönteminin kabul edilebilir bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, Markov davranışı sergileyen bir gerçek zamanlı RLC devresini denetlemek için parametreleri AISA ile elde edilen PID denetim cihazı kullanılmıştır. Gerçek zamanlı denetleme sonuçları, tasarlanan yöntemlerin verimliliğini doğrulamış ve gelecekteki uygulamalarda bilinmeyen MJS'lerin denetimini sağlamak üzere modellemeye dayalı PID optimizasyonunun verimliliğini göstermiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu makale Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Konseyi tarafından 2021HZDP021 numaralı hibe kapsamında finanse edilmiştir.

Kaynaklar (References)

- Abd-Elazim S.M., Ali E. S., 2018. Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm. *Neural Computing and Applications*, 30, 607-616.
- Ang K.H., Chong G., Li Y., 2005. PID control system analysis, design, and technology, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576.
- Astrom K.J., Hagglund T., 1995. PID controllers: theory, design, and tuning, *ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society*.
- Beyhan S., Alci M., 2010. Stable modeling-based control methods using a new RBF network, *ISA Transactions*, 49(4), 510-518.
- Bogar E., Beyhan S., 2020. Adolescent identity search algorithm (AISA): A novel metaheuristic approach for solving optimization problems, *Applied Soft Computing*, 95, 106503.
- Cetin M., Bahtiyar B., Beyhan S., 2019. Adaptive uncertainty compensation-based nonlinear model predictive control with real-time applications. *Neural Computing and Applications*, 31, 1029-1043.
- Cetin M., Iplikci S., 2015. A novel auto-tuning PID control mechanism for nonlinear systems, *ISA Transactions*, 58, 292-308.
- Cetintas G., Hamamci S.E., 2022. Proportional-integral-derivative stabilization of complex conjugate-order systems, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 44(15), 2941-2952.

- Chang W.D., Yan J.J., 2005. Adaptive robust PID controller design based on a sliding mode for uncertain chaotic systems, *Chaos, Solitons and Fractals*, 26(1), 167-175.
- Chiou J.S., Tsai S.H., Liu M.T., 2012. A PSO-based adaptive fuzzy PID-controllers, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 26, 49-59.
- Deng L., Liu S., 2023. A novel hybrid grasshopper optimization algorithm for numerical and engineering optimization problems, *Neural Process Letters*, 1-55.
- Fang M., Shi P., Dong S., 2019. Sliding mode control for Markov jump systems with delays via asynchronous approach, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(5), 2916-2925.
- Hasan M.W., Abbas N.H., 2022. Disturbance rejection for underwater robotic vehicle based on adaptive fuzzy with nonlinear PID controller, *ISA Transactions*, 130, 360-376
- Hekimoğlu B., 2019. Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm. *IEEE Access*, 7, 38100-38114.
- Huang G.B., Zhu Q.Y., Siew C.K., 2004. Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks, *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 2, 985-990.
- Huang G.B., Zhu Q.Y., Siew C.K., 2006. Extreme learning machine: theory and applications, *Neurocomputing*, 70(1-3), 489-501.
- Izci D., Ekinci S., 2023. Optimizing Three-Tank Liquid Level Control: Insights from Prairie Dog Optimization. *International Journal of Robotics & Control Systems*, 3(3).
- Joseph S.B., Dada E.G., Abidemi A., 2022. Oyewola D.O., Khammas B.M. Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems. *Heliyon*, 8(5), e09399.
- Kang J., Meng W., Abraham A., Liu H., 2014. An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control, *Neurocomputing*, 135, 79-85.
- Kang Y., Zhao Y.B., Zhao P., 2018. *Stability analysis of Markovian jump systems*. Springer.
- Karaboga D., Basturk B., 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.
- Kennedy J., Eberhart R., 1995. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.
- Lennartson B., Kristiansson B., 2009. Evaluation and tuning of robust PID controllers, *IET Control Theory and Applications*, 3(3), 294-302.
- Mirjalili S., Lewis A., 2016. The whale optimization algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
- Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A., 2014. Grey wolf optimizer, *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- Özay C.A.N., Eroğlu H., Öztürk, A., 2022. FV-termal güç sistemlerinde balina optimizasyon algoritması tabanlı otomatik üretim kontrolörü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 915-926.
- Paul S., Yu W., Li X., 2018. Bidirectional active control of structures with type-2 fuzzy PD and PID, *International Journal of Systems Science*, 49(4), 766-782.
- Qi Z., Shi Q., Zhang H., 2019. Tuning of digital PID controllers using particle swarm optimization algorithm for a CAN-based DC motor subject to stochastic delays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5637-5646.
- Saravanakumar R., Ali M.S., 2022. Extended dissipative criteria for generalized Markovian jump neural networks including asynchronous mode-dependent delayed states, *Neural Process Letters*, 54, 1623-1645.
- Van M., 2018. An enhanced robust fault tolerant control based on an adaptive fuzzy PID-nonsingular fast terminal sliding mode control for uncertain nonlinear systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(3), 1362-1371.
- Vargas A.N., Pujol G., Acho L., 2017. Stability of Markov jump systems with quadratic terms and its application to RLC circuits, *Journal of the Franklin Institute*, 354(1), 332-344.
- Vincent A.K., Nersisson R., 2017. Particle swarm optimization based PID controller tuning for level control of two tank system. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, (5).
- Zhang X., Zhang G., Yin Y., He S., 2021. Asynchronous sliding mode dissipative control for discrete-time Markov jump systems with application to automotive electronic throttle body control system, *Computers and Electrical Engineering*, 96, 107496.
- Zhu M., Chen Y., Kong Y., Chen C., Bai J., 2020. Distributed filtering for Markov jump systems with randomly occurring one-sided Lipschitz nonlinearities under Round-Robin scheduling, *Neurocomputing*, 417, 396-405.
- Ziegler J.G., Nichols N.B., 1942. Optimum settings for automatic controllers, *Transaction ASME*, 64(11), 759-768.



KOMPOZİT MALZEME İLE KAPLANMIŞ KUMAŞLARIN KORUYUCU TEKSTİL OLARAK KULLANIMI ÜZERİNE TEKNİK BİR ANALİZ

Güler ÖNCÜ^{1*}, Nükhet ŞAPCI²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tekstil Bölümü, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Güç Tutuşurluk, Mikronize Pomza, Koruyucu Tekstil.	Günümüzde, düşük maliyetli, çevre dostu ve doğal kaynaklı malzemelerin kullanımı, tekstil sektörü de dahil olmak üzere birçok sektörde ön plana çıkmaktadır. Bu çalışma, %100 pamuklu ve polyester kumaşlar mikronize pomza ile kaplanarak güç tutuşurluk özelliklerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, kumaş yüzeylerine mikronize pomza uygulanarak yüzey morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Kumaşların güç tutuşurluk, hava geçirgenliği ve yırtılma mukavemeti özellikleri, standart test yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Kaplama uygulanmış kumaşların hava geçirgenliği değerlerinde azalma gözlenmiştir. Güç tutuşurluk analizlerinde, pamuklu kumaşların polyester kumaşlara kıyasla daha iyi özellik sergilediği belirlenmiştir. Pomza katkılı kumaşların, katkısız kumaşlara göre ateşleme ve numune yanma süresinde belirgin iyileşme gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca, kumaşların çözgü ve atkı yönlerinde yırtılma mukavemetinde artış kaydedilmiştir. Koruyucu tekstil uygulamaları için uygun olabilecek bir işlem aşaması, kompozit malzeme ile kaplanmış polyester ve pamuk kumaşlar üzerinde geliştirilmiştir.

A TECHNICAL ANALYSIS ON THE USE OF FABRICS COATED WITH COMPOSITE MATERIALS AS PROTECTIVE TEXTILES

Keywords	Abstract
Flame Retardant, Micronized Pumice, Protective Textile.	Nowadays, the use of low-cost, environmentally friendly and naturally sourced materials has come to the forefront in many sectors including the textile sector. This study aims to investigate the flame retardancy properties of 100% cotton and polyester fabrics by coating them with micronized pumice. For this purpose, micronized pumice was applied to the fabric surfaces and the surface morphology was examined with Scanning Electron Microscope (SEM). Flame retardancy, air permeability and tear resistance properties of the fabrics were evaluated with standard test methods. A decrease was observed in the air permeability values of the coated fabrics. In flame retardancy analyses, it was determined that cotton fabrics exhibited better properties compared to polyester fabrics. It was determined that pumice-added fabrics showed a significant improvement in ignition and sample burning time compared to fabrics without additives. In addition, an increase in tear resistance was recorded in the warp and weft directions of the fabrics. A process step that may be suitable for protective textile applications was developed on polyester and cotton fabrics coated with composite material.

Alıntı / Cite

Öncü, G., Şapcı, N., (2025). Kompozit Malzeme ile Kaplanmış Kumaşların Koruyucu Tekstil Olarak Kullanımı Üzerine Teknik Bir Analiz, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 13(1), 17-27.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
G.Öncü,0000-0002-3139-4554	Başvuru Tarihi / Submission Date 18.04.2024
N. Şapcı, 0000-0002-8390-9134	Revizyon Tarihi / Revision Date 03.11.2024
	Kabul Tarihi / Accepted Date 22.11.2024
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: guleroncu@isparta.edu.tr, +90-246-214-6930

A TECHNICAL ANALYSIS ON THE USE OF FABRICS COATED WITH COMPOSITE MATERIALS AS PROTECTIVE TEXTILES

Güler Öncü^{1†}, Nükhet Şapçı²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tekstil Bölümü, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Isparta, Türkiye

Highlights

- Investigation of flame retardant properties of different types of fabrics
 - Investigation of the flame retardant effect of micronized pumice material in the textile industry,
 - Evaluation of micronized pumice rock in protective textiles
-

Purpose and Scope

Conducting new research for the use of micronized pumice in the textile industry.

Design/methodology/approach

Coating with micronized pumice on woven fabrics,
Use and effects of micronized pumice in the textile industry,
Evaluation of applied fabrics with test results.

Findings

Flame retardancy, air permeability and tear strength of the fabrics were tested using standard methods. It has been decided that coating application with micronized pumice on woven fabrics is suitable for use in protective textiles in the textile industry.

Practical implications

There is room for more research on various rock and fabric varieties.

Social Implications

Increasing such studies and expanding their use will also be effective in meeting the demand for technical textile products.

Originality

There are a very limited number of studies on the use of micronized pumice in protective textiles. Therefore, our work is original and a source.

1. Giriş (Introduction)

Tehlikeli şartlarda çalışanlar için kullanılan elyaf hammaddeli malzemeler koruyucu tekstiller olarak tanımlanmaktadır. Koruyucu tekstiller kimyasal, biyolojik, mekanik etkilere, radyasyona, elektrik veya termal koruyucu gibi tehlikeli maddelere karşı güvenliği sağlayıcı özelliklere sahip olmalıdır. Koruyucu tekstillerde aranan performans özellikleri koruma, konfor ve dayanıklılık olarak gösterilebilir.

Güç tutuşur teknik tekstillerin amacı ise insan cildinin alev, ısı, kıvılcım ve damlalar, sıcak gazlar ve buharlara karşı korunmasını sağlamaktır (Horrocks ve Anand, 2000). Organik malzemelerde bulunan yüksek karbon ve hidrojen içeriği nedeniyle kolayca yanabilmektedir (Varghese ve Thilagavathi, 2015; Liu, vd., 2016). Pamuklu kumaşlarda termal bozunma karbonizasyona neden olmakta, polyester ise eriyerek damlamaktadır (Carosio vd., 2012). Tekstillerin yanıcılığını azaltmak için kullanılan dört yöntem vardır. Birincisi, yüksek performanslı elyaf, ikincisi liflerin kopolimerizasyon veya kimyasal modifikasyon ile yapılarının değiştirilmesidir. Sentetik elyaf için aleve karşı korumanın en yaygın ve etkili yöntemi, işleme sırasında aleve dayanıklı kimyasalların eklenmesidir. Genellikle tercih edilen diğer yöntemlerden biri de kumaşın kimyasallarla yüzey kaplama işlemine tabi tutulmasıdır. (Horrocks, 1996, 2011; Levchik ve Weil, 2004). Son yıllarda, daha düşük maliyetli ve çevre dostu güç tutuşur maddelerin üretimi ve kullanımına yönelik çalışmalar artış göstermiştir. Yeni yöntemler arasında plazma işlemi ile yüzey modifikasyonu, mikrokapsül uygulamaları ve nanoteknoloji uygulamaları dikkat çekmektedir (Covaci vd., 2011; Wang, vd., 2015; Horrocks 2011).

[†] Corresponding author: guleroncu@isparta.edu.tr, +90-246-214-6930

Bulut ve Akçalı, 2022'de yaptıkları bir çalışmada %100 polyester dokuma kumaş numunelerini amorf silika, pomza ve kolemanit gibi doğal esaslı malzemeler ile sol jel yöntemi kullanarak pigment baskı tekniği ile kaplayarak baskı fijsajını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada farklı katkı oranları kullanarak numune kumaşların yüzey analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Aşınma direnci, UV, mukavemet ve hava geçirgenliği özellikleri tespit edilerek sonuçları değerlendirmişlerdir. Böylece farklı alanlarda kullanım olanaklarına sahip, düşük sıcaklık ve düşük enerji maliyetli, az miktarlarda kimyasal kullanımına imkân sağlayan yeni bir endüstriyel işlem adımını gündeme getirmişlerdir.

Pomza tozu katkılı formülasyonlarla üretilen ahşap plastik kompozit panellerin mekanik ve yanıcılık özellikleri, laboratuvar koşullarında geleneksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kompozitlerin yanıcılık özelliklerinin pomza eklenmesiyle azaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, pomza tozunun epoksi ve ahşap karışımları üzerinde gerilim dayanımı, sertlik ve güç tutuşur özellikler açısından olumlu katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır (Koyuncu, 2018).

Kompozit malzeme üretimiyle ilgili bir diğer çalışmada, modifiye edilmiş pomza taşı bazlı aktif nano dolgu ve ticari aktif dolgu maddelerinin kombinasyonu kullanılarak üretilen cam elyaf takviyeli plastik (CETP) kompozitlerin yangına dayanıklılığı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, CETP kompozitlerin yangına dayanıklılığında, tutuşma süresindeki artış ve yanma hızındaki düşüş ile belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir (Rakhman vd., 2022).

Tekstil pomzası olarak adlandırılan iyi kalitedeki pomza türleri ülkemiz pomza ihracatının önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Pomza taşı ihracatının %40'ını tekstil sektörü için gerçekleştiren ülkemiz, iç pazarda önemli bir konuma sahiptir (Gündüz vd., 2005). Pomza taşının denim yıkamada, yabancı maddelerden arındırılmış olması, içerdiği sodyum oksit, demir oksit ve potasyum oksit miktarlarının kumaşı bozmayacak oranlarda olması, gözenekli ve yuvarlatılmış olması, açık renkli olması ve su emme özelliklerinin tekstil kalitesi açısından uygun olması önemli özellikleridir (Duran, 2005).

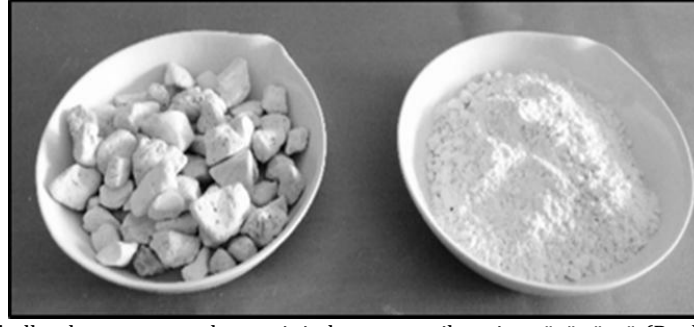
Pomza malzemesi, doğal ve hafif bir agrega olarak değerlendirilir ve pomza taşı olarak isimlendirilmektedir. Pomza; birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm^3 'ten düşük, sertliği mohs skalasına göre değeri 6 olan camsı özelliği ile volkanik bir madde olarak tanımlanır (Gündüz, 2008). Türkiye'de üretilen pomzanın tekstil ve diğer sektörlerde tercih edilmesinin üretim ve işlemede kolaylık, teminin kolay olması, yüksek su tutabilme, ortam nemini dengeleme, zararlı kimyevi maddeler içermemesi gibi önemli özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Gündüz vd., 2005).

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile farklı türde doğal veya suni malzemelerle üretilmiş kumaşlar, koruyucu tekstil kategorisinde değerlendirilip yeni bir endüstriyel açılımı gündeme getirmiştir. Pomza taşı içerisindeki Al_2O_3 oranı ile tekstil kumaşların da ateş ve ısıya dayanım özelliğini arttırabilir. Bu durum, yüksek sıcaklığa dayanıklı kumaş elde edilmesi için pomzanın değerlendirilebileceği fikrini ortaya koymuştur. Bu nedenle bu çalışmada doğal, üretimi kolay, maliyeti düşük, yüksek sıcaklığa dayanıklı olan pomza malzemesi mikronize hale getirildikten sonra polyester ve pamuklu olmak üzere iki farklı kumaş kaplaması için kullanılmıştır. Farklı pomza kullanım oranlarına göre kaplama patı reçetesi hazırlanmıştır. Mikronize pomza malzemesi kimyasallar yardımıyla yüzey kaplama çözeltisine eklenerek kumaşlar kaplama işlemine tabi tutulmuş ve kondisyonlama işlemleri tamamladıktan sonra teknik analizler uygulanmıştır. Böylece, yüksek sıcaklığa dayanıklı veya güç tutuşur özelliği yüksek koruyucu amaçlı kumaşların üretilmesi ile tekstil sektörüne yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bununla birlikte, çalışmamızda kullanılan pomza malzemesinin detaylı fiziksel ve kimyasal analiz yapılarak tercih edilme nedeni ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Mikronize Pomza Karakterizasyonu (Micronized Pumice Characterization)

DeneySEL çalışmada kullanılan mikronize kaplama malzemesi, pomza kayacından elde edilmiştir. Pomza kayacı birincil tip kırıcılardan geçirildikten sonra bilyalı değirmenlerde öğütülmüş ve elek analizleri yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kumaş kaplamada kullanılan pomza malzemesinin kayaç ve mikronize görünümü (Rock and micronized appearance of the pumice material used in fabric coating)

Bilimsel literatürde genellikle 100 mikron altı malzemeler mikronize malzeme olarak isimlendirilir. Bu çalışmada kullanılan pomza malzemesi de 50 mikron olarak boyutlandırıldığı için, mikronize pomza olarak isimlendirilmiştir. Pomza taşının endüstriyel alanlarda özellikle tekstil sektöründe kullanılabilirliğinin etüdü için, kayacın yapısal özelliklerinin yanı sıra, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Göлтаş Çimento analiz laboratuvarında yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo1’de verilmiştir.

Tablo 1. Pomzanın kimyasal bileşen analizi (Chemical component analysis of pumice)

Kimyasal bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
%	70.99	12.72	1.13	0.95	0.35	0.11	4.53	4.13	10.91

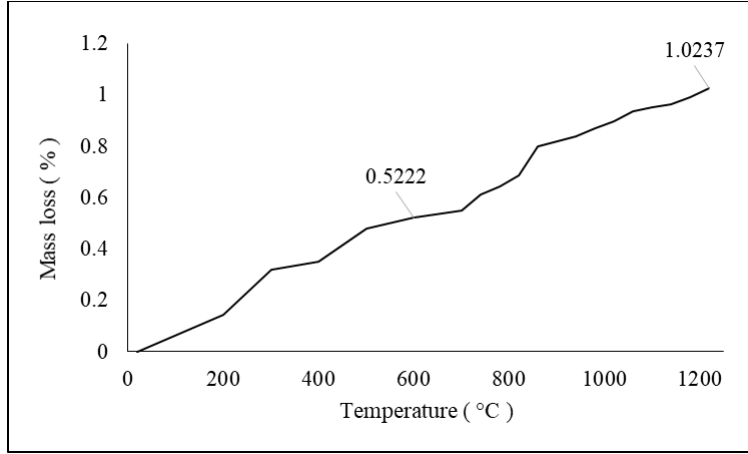
Kimyasal analiz sonuçlarından görüldüğü gibi, pomza malzemesinin %71’ e varan Si₂O içeriği kayaca asidik özellik kazandırmaktadır. Bu özellik kayacın beyaza yakın bir renk sergilemesine neden olur. Bu da tekstil sektöründe özellikle kalite açısından önemli bir özelliktir. %4.53 Na₂O ve %4.13 K₂O oranlarındaki bileşenler tekstil sektöründe reaksiyon veren bileşenler olarak bilinmektedir (Gündüz vd., 2005). Mikronize pomzanın endüstriyel olarak aranan fiziksel özelliklerinin başında; özgül ağırlık, etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu, su emme kapasitesi ve yüksek sıcaklığa dayanım özellikleri gelmektedir. Bu fiziksel özellikleri standarda uygun olarak belirlenerek Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Pomzanın bazı fiziksel özellikleri (Some physical properties of pumice)

Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Etüv Kuru Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	Ağırlıkça Su Emme Oranı (%)	Görünür Porozite (%)
2.302	0.982	18.75	20.88

Pomza, oluşum özellikleri nedeni ile farklı boyutlarda ve çok sayıda boşluk barındırır. Bu boşluklar genellikle kapalı gözenek yapısı şeklinde olup kayaca önemli avantajlar kazandırmaktadır. Özellikle kapalı gözenekleri sayesinde malzeme önemli bir ısı yalıtım malzemesi olarak birçok endüstriyel alanda tercih edilmektedir. Deneysel olarak tespit edilen ve sonuçları Tablo 2’de paylaşılan malzemenin ağırlıkça su emme oranları ve görünür porozite değerleri de bunu açıkça bize göstermiştir. Ayrıca malzemenin özgül ağırlık ve etüvde kurutulmuş tane yoğunluk değerleri, alternatif malzemelere göre hafif bir malzeme olduğunun kanıtıdır.

Kayaç oluşumlar yüksek sıcaklık ortamlarına maruz bırakıldıklarında, bünyesinde bulundurduğu uçucu gaz bileşenleri sebebiyle, farklı oranlarda kütle kaybına uğrarlar. Bu bakımdan, malzemelerin ortam sıcaklık değişimlerinden hangi oranlarda etkilendiğini tespit etmek için kütlelerinde herhangi bir kaybın olup olmadığını belirlemek gerekir. Bu analizler kızdırma kaybı analizleri olarak adlandırılır. Mevcut çalışmanın amacına uygun olarak, mikronize pomza malzemesinin kızdırma kaybı analizleri TS EN 13055:2016 standardına göre yapılarak, deney sonrası kütle kaybı değerleri ve oluşan kızdırma kaybının miktarı belirlenmiştir.



Şekil 2. Pomza malzemesinin kızdırma kaybı analizi (Loss on ignition analysis of pumice material)

Mikronize pomza malzemesi üzerinde 20 °C-1220 °C arasında yapılan ısıl işlemlere dayanım analizinde, malzemenin farklı sıcaklıklardaki davranış karakteristiği deneysel olarak incelenerek analiz bulguları Şekil 2’de verilmiştir. TS EN 13055:2016 standardına göre, yapılan kızdırma kaybı analizinde, kütle kaybı %5’den fazla olmamalıdır. Pomza malzemesi için yapılan kızdırma kaybı analizinde en fazla kütle kaybı 1220 °C’de %1.0237 olarak tespit edilmiştir. Bu durum pomzanın güç tutuşur kumaş kaplama malzemesi olarak seçilmesini önemli ölçüde desteklemiştir.

2.2. Kumaşlar (Fabrics)

Çalışmada, bezayağı (1/1) yapısı ile dokunmuş, %100 pamuk ve %100 polyester olmak üzere iki farklı kumaş kullanıldı. Pamuklu kumaş, yıkanmış ve ağartılmış (251 g/m²) olup, çözgü sıklığı 29 çözgü/cm, atkı sıklık değeri 23 atkı/cm dir. Polyester kumaş, (268 g/m²) olup, çözgü sıklığı 25 çözgü/cm ve atkı sıklığı 21 atkı/cm olarak belirlenmiştir. SEM ve EDS analizleri; işlem görmemiş kumaş, %4 (en düşük) ve %12 (en yüksek) pomza kaplamalı 3 tip numune üzerinde uygulanmıştır. Güç tutuşurluk ve yırtılma testleri tüm kaplama oranları için hazırlanan numuneler üzerinde uygulanmıştır.

2.3. Pomzanın Kumaşlara Aplikasyonu (Application of pumice to fabrics)

Kullanılan %100 pamuk ve %100 polyester kumaşların yüzeylerine pomza taşının kumaş yüzeyine bağlanmasını sağlamak için kaplama patı hazırlanmıştır. Kaplama patı, RUCO-COAT PU 1130, RUCO-COAT FX 8011 ve kıvam patı kimyasalları ile %0-4-8-12 oranlarında mikronize pomza ilavesiyle hazırlanmıştır. Kaplama patının viskozitesi 21000 rps ve patın pH’ı 8-8.5’tir. Kaplama yapılan kumaşlara uygulanan pomza oranları ve numune kodları Tablo 3’te verilmiştir. Kaplama yapılan kumaşlara ait görünüm ise Şekil 3’te verilmiştir.

Pomzanın kumaşa uygulanmasında, deney tasarımı belirli parametrelerin optimize edilmesini gerektirir. Bu parametreler, pomzanın parçacık boyutu, kaplama yoğunluğu, uygulama yöntemi ve kumaşın türü gibi etkenlere bağlı olarak değişir. Kaplama patı, RUCOCOAT PU 1130 ve RUCO-COAT FX 8011 kıvam macunu kimyasalları ve pomza taşının farklı konsantrasyonlarda eklenmesiyle elde edildi. Anyonik, su bazlı, alifatik polieter poliüretan dispersiyonu olan RUCO-COAT PU 1130, yüksek su sütun pasta kaplama uygulamaları için kullanılan kimyasal bazlı, yumuşak ve hidroliz dayanımı iyi bir malzemedir. RUCO-COAT FX 8011, poliüretan, poliakrilat veya polivinilasetat gibi su bazlı dispersiyonlar için formaldehit içermeyen bir çapraz bağlayıcıdır. N metil-2 prilidon (NMP) ve butanonoksim içermeyen bloke izosiyanat, anyonik ve sıvı formda bir kimyasal yapıya sahiptir. Kıvamlaştırıcı macun, su bazlı sentetik bir kalınlaştırıcıdır. Kimyasal yapısı akrilat bazlıdır ve sıvı formdadır. Kaplama patı, bağlanma sırasında mekanik kuvvetle pomza taşının yüzeyden ayrılmasını önlemek için kullanılmıştır (Öncü ve Şapçı 2023).

Test aşamasında pamuk ve polyester kumaş numunelerine %0-4-8-12 oranlarında, 50 µm mikronize pomza ile kaplama patları hazırlanarak kaplama yapılmıştır. 28x36 cm boyutundaki numuneler 60 gram pat kullanılarak kaplama makinası ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi 110 °C, 10 dakika süre ile kurutma işlemi yapılarak tamamlanmıştır. Numune kumaşlar standart atmosfer koşulları altında 48 saat %65±2 bağıl nem ve 20±2°C sıcaklıkta kondisyonlanmıştır.

Tablo 3. Kaplama yapılan kumaşlara uygulanan % pomza oranları ve kodları (% pumice rates and codes applied to coated fabrics)

Kod	Yüzey Özellikleri (Pamuk)	Kod	Yüzey Özellikleri (Polyester)
P0	%100 Pamuk	PLY0	%100 Polyester
P1	%100 Pamuk+ %0 Pomza	PLY1	%100 Polyester + %0 Pomza
P2	%100 Pamuk+ %4 Pomza	PLY2	%100 Polyester + %4 Pomza
P3	%100 Pamuk+ %8 Pomza	PLY3	%100 Polyester + %8 Pomza
P4	%100 Pamuk+ %12 Pomza	PLY4	%100 Polyester + %12 Pomza

**Şekil 3.** Kaplama yapılmış kumaş numuneleri (Coated fabric samples)

2.4. Kumaş Karakterizasyonu (Fabric Characterization)

Bellmore TC-45 model test düzeneği, kumaşlara uygulanan güç tutuşurluk testleri için kullanıldı. Atkı ve çözgü yönünde 3 adet test ortalama değerleri alınarak, test ASTM 1230 - 450 test standardına göre yapılmıştır.

Test edilen kumaş numuneleri FEI Quanta FEG 250 EDAX / EDS taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), numune kumaş yüzey görüntülerini elde etmek için kullanılmıştır.

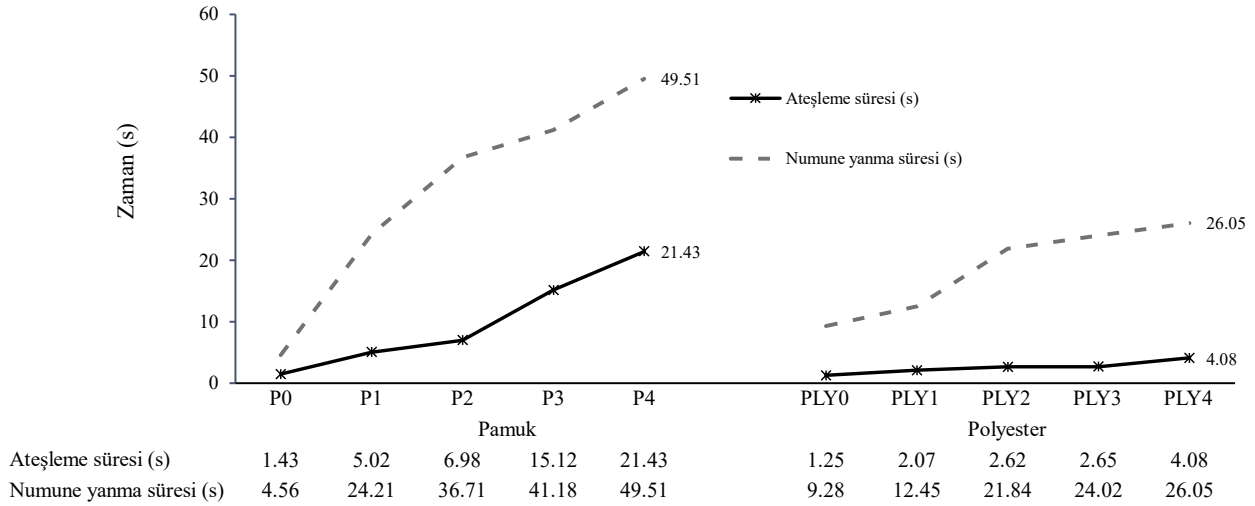
Pomza ile kaplanmış kumaşların hava geçirgenlik testleri Textest Instruments FX 3300 cihazı ile "TS 391 EN ISO 9237, Tekstil Kumaşlarda Hava Geçirgenliğinin Tayini" standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hava geçirgenliği ölçümü de standart klima koşullarında 24 saat bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Seçilmiş test basıncı 100 Pascal, test alanı 20 cm² dir. Ölçüm sonuçları beş adet numunenin aritmetik ortalaması olup l/m²/s cinsinden verilmiştir.

Numune kumaşların yırtılma mukavemeti testleri ise TS EN ISO 13937-1 standardına uygun olarak ElmaTear Dijital Yırtılma Mukavemet Test cihazında yapılmıştır.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Güç Tutuşurluk Analizi (Flammability Analysis)

Pamuklu ve polyester kumaş numunelerinin 45° derece güç tutuşurluk testinde, ateşleme süresi ve numune yanma süresi üç değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Test kumaşların güç tutuşurluk sonuçları (Flammability results of test fabrics)

Test sonuçları incelendiğinde, pamuklu kumaşların güç tutuşur özelliklere sahip olduğu, polyester kumaşın ise hızlı tutuşma nedeniyle güç tutuşur özelliğe sahip olmadığı görülmüştür. %12 oranında pomza katkılı pamuklu kumaşın (P4), pomza eklenmemiş pamuklu kumaş (P1) numunesine göre ateşleme süresinin 4.2 kat, iplik kopma süresinin 2.04 kat iyileştiği gözlenmiştir. Polyester kumaşta ise PLY1 ile PLY4 kıyaslandığında ateşleme süresinin 2 kat, iplik kopma süresinin 2.13 kat iyileştiği gözlenmiştir. Kullanılan pomza oranının güç tutuşurluğa olan etkisi Şekil 4'te görülmektedir. Bu doğrusal artışın pomza katkı oranıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak polyester kumaşın erime eğiliminin yüksek olması pomza ile kaplama şartlarında bile eriyerek yanmasına sebep olmuştur. Bu nedenle, pomza taşı ile kaplanmış polyester kumaşta güç tutuşurluk özellikleri pamuklu kumaşa göre daha düşük düzeydedir.

Pamuk, özellikle yanıcılık açısından risk grubunda yer alan bir elyaf olup düşük tutuşma direncine (LOI değeri 19) sahiptir. Buna karşılık, polyester elyaf, güç tutuşma özellikleri bakımından pamuğa göre daha avantajlıdır (LOI değeri 21). Deney sonuçlarına göre, işlem görmemiş pamuk ve polyester karşılaştırıldığında, polyesterin yanma süresinin daha uzun olduğu, ancak pamuklu kumaşa pomza taşı ilavesinin daha etkili sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

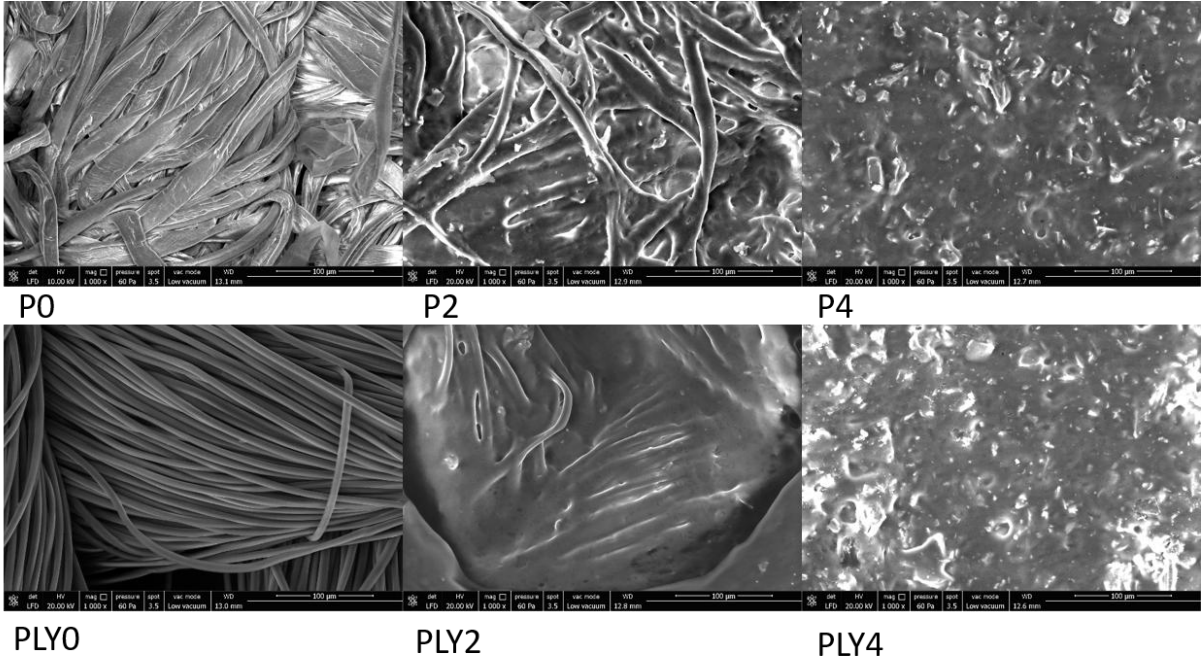
3.2. SEM ve EDS Analizi (SEM and EDS Analysis)

EDS spektrumunda kimyasal bileşenlerine bakıldığında, alüminyum, silisyum ve potasyum ve sodyum elementlerinin kumaş yüzeyinde düzgün bir şekilde dağıldığı ve her iki kumaş türünde de %4 ve %12 oranlarındaki pomza taşı kaplamasının EDS spektrumlarına yansıdığı gözlenmiştir (Tablo 4). Al elementinin pamuklu kumaşta (%0.28-0.54), polyester kumaşta (%0.14-0.56), Si elementinin pamuklu kumaşta (% 0.41-1.54) ve polyester kumaşta (%0.46-1.59) değerlerinde bulunması pomza taşı ile kaplanmış kumaş yüzeyinin kimyasal analiz ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

Tablo 4. Numune kumaşlara ait kimyasal bileşen analiz (EDS) sonuçları (Chemical component analysis (EDS) results of sample fabrics)

% Atomic	% C	% O	% Al	% Si	% K	% Na
P0	51.91	48.09				
P2	73.34	25.80	0.28	0.41	0.08	
P4	76.58	20.79	0.54	1.54	0.11	0.44
PLY0	72.34	27.66				
PLY2	73.82	25.58	0.14	0.46		
PLY4	73.42	24.11	0.56	1.59	0.17	0.15

Ayrıca numunelere ait SEM görüntüleri incelendiğinde, ham numuneler üzerinde gözlenen liflerin mikronize pomza katkılı malzeme ile kaplandığı görülmektedir (Şekil 5).



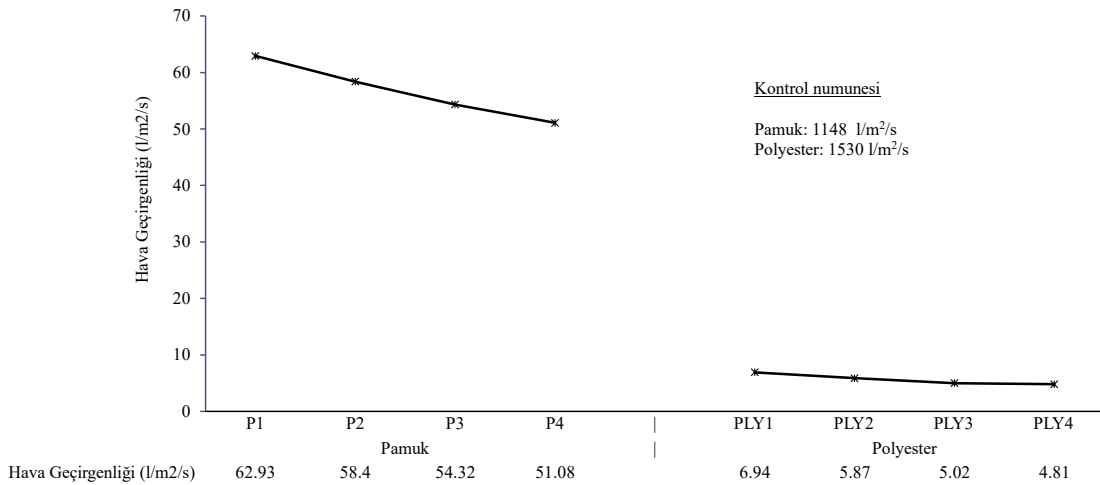
Şekil 5. Pamuk ve polyester kumaşların SEM görüntüsü (P0: Ham pamuk kumaş, P2: %4 pomza ile kaplanmış pamuk kumaş, P4: %12 pomza ile kaplanmış pamuk kumaş, PLY0: Ham polyester kumaş, PLY2: %4 pomza ile kaplanmış polyester kumaş, PLY4: %12 pomza ile kaplanmış polyester kumaş (SEM image of cotton and polyester fabrics (P0: Raw cotton fabric, P2: Cotton fabric coated with 4% pumice, P4: Cotton fabric coated with 12% pumice, PLY0: Raw polyester fabric, PLY2: Polyester fabric coated with 4% pumice, PLY4 : Polyester fabric coated with 12% pumice)

Pomza konsantrasyonunun kimyasal bileşen analizlerinde görülen element yüzdelerindeki artış, SEM görüntüleri ile de desteklenmektedir. Kumaş yüzeyi üzerinde mikronize pomza taşının katı partikül yapıdaki görünümü net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

Ayrıca pomza katkılı kaplama işlemi sonrası kumaş numunelerinde görüntüsel olarak yüzeyde yoğun bir katmanın varlığı söz konusudur. Bu katmanın reçetede mevcut olan mikronize pomza ilaveli kaplama patı kaynaklı olduğu ön görülmektedir.

3.3. Kaplanmış Dokuma Kumaşların Hava Geçirgenlik Analizi (Air Permeability Analysis of Coated Woven Fabrics)

Çalışma kapsamında kumaşlara güç tutuşurluk özelliği kazandırmanın kumaş özelliklerini etkileyip etkilemediğini tespit etmek için hava geçirgenliği ve yırtılma mukavemeti testleri yapılmıştır. Kaplanmış test numuneleri ve ham kumaş numunesine ait hava geçirgenliği test sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Hava geçirgenliği test sonuçları (Air permeability test results)

Şekil 6'daki değerler incelendiğinde mikronize pomza taşı ile kaplanmış kumaşların hava geçirgenlik değerlerinde (P0-1148 l/m²/s_P4-51.08 l/m²/s / PLY0-1530 l/m²/s_PLY4- 4.81 l/m²/s) azalma görülmüştür. Pamuk kumaşta hava geçirgenliği azalma yüzdesi P1-P2 arasında %7.2, P2-P3 arasında %7.5, P3-P4 arasında %6 oranında azalmıştır. Polyester kumaşta ise PLY1-PLY2 arasında %15.4, PLY2-PLY3 arasında %14.4, PLY3-PLY4 arasında ise %4.2 oranındadır. Pomza miktarı arttıkça hava geçirgenlik değeri düşmektedir. Kumaşta hava geçirgenlik özelliği; kumaşın yapısal özelliklerine bağlı olarak değişir. Ayrıca, elyafın hammaddesi ve iplik özellikleri, kumaşın yapısal özellikleri kumaşın kimyasal, fiziksel, mekanik, duyuşal özelliklerini de etkileyen parametrelerdir (Turan ve Okur, 2008).

Kumaşların hava geçirgenliği gözeneklilik özelliği ile ilişkilidir ve kumaşın toplam gözenekliliği; iplik lifleri arası, lif içi ve kumaş ipliklerinin kesişmeleri sonucu oluşan iplikler arası gözeneklilik olmak üzere üç bileşene ayrılmaktadır. Bilindiği üzere iplikler arasındaki boşluklar kumaşta hava akışını belirler ve gözeneklilik azaldığında hava geçirgenliğini de azalmaktadır (Havlová, 2014; Çeven vd., 2011). Kaplama işlemi sonucunda ise kumaş kalınlığı artmaktadır (Alay vd., 2012). Gözenekliliğin azaldığı SEM görüntüleri (Şekil 5) ile net bir şekilde görülmektedir. Bu durum bize pomza taşının kumaş yüzeyine bağlanarak gözenekliliği azalttığını göstermiştir.

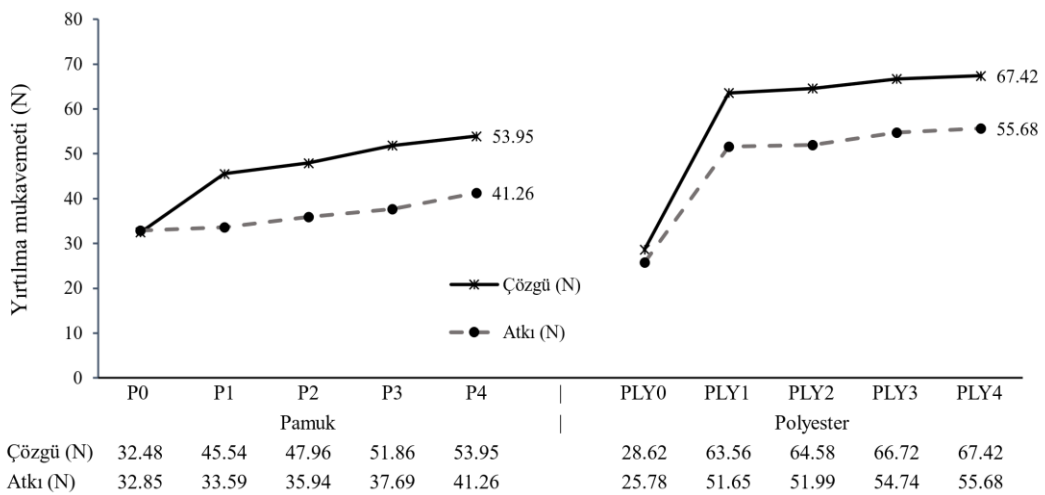
İplikler arasındaki boşluk, kumaşın hava akışını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır (Backer, 1951). Bilindiği gibi kumaşların hava geçirgenliği, gözeneklilik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Kaplama işlemi, kumaş yüzeyindeki iplikler arasındaki gözenekliliği azaltarak, diğer bir deyişle iplikler arasındaki boşlukları daraltarak, bu kumaşların hava geçirgenliği değerlerinde düşüşe neden olmuştur.

Hava geçirgenliği testleri, yüzeyi %4, %8 ve %12 oranında pomza ile kaplanan kumaşlarda, pomza oranı arttıkça hava geçirgenliği değerlerinin belirgin şekilde azaldığını göstermektedir. Test sonuçları, kaplama işlemiyle lif yüzeyinin kaplandığını ve geçirgenliğin azalmasıyla lif yüzeyinde film tabakalarının oluştuğunu kanıtlamaktadır (Uğur 2023).

3.4. Kaplanmış Dokuma Kumaşların Yırtılma Mukavemeti Analizi (Tear Strength Analysis of Coated Woven Fabrics)

Yırtılmaya karşı dayanma tüm kumaşlarda istenen bir özellik olup, yırtığa uygulanmış yanal çekme kuvvetine karşı, kumaşın gösterdiği dirençtir. Yırtılma mukavemet sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Yırtılma mukavemetine etki eden faktörler doku türü, sıklık ve gramaj ve kumaş yapısal özellikleri ile ilgili faktörlerdir (Scelzo vd., 1994).

Kumaşın yırtılması atkı ve çözgü ipliklerin bir çizgi boyunca kopmasıyla gerçekleşmektedir. Yırtılma mukavemetinin test sonuçlarına göre, kullanılan pomza oranı arttıkça kumaş yırtılma mukavemetinin de arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7). Yırtılma mukavemeti test sonuçlarına göre, kaplama uygulanmış kumaşlar, yırtılma mukavemeti açısından herhangi bir performans kaybı göstermemiştir.



Şekil 7. Yırtılma mukavemeti değerleri (Tear strength values)

Aksine polyester kumaşta pomza oranındaki artış çözgü yırtılma mukavemet değerinde önemli bir artışa neden olmuştur. Her iki kumaş türünde de pomza oranındaki artış yırtılma mukavemet değerini de doğrudan yükseltmiştir. Pamuklu kumaşlarda, P1-P2 numuneleri arasında çözgü yönünde %5,3, atkı yönünde %7 oranında; P2-P3 numuneleri arasında çözgü yönünde %8,1, atkı yönünde %4,9 oranında; P3-P4 numuneleri arasında ise

çözgü yönünde %4, atkı yönünde %9,4 oranında artış kaydedilmiştir. Bu artış, pomza oranının etkisini açıkça göstermektedir. Polyester kumaşlarda ise, PLY1-PLY2 numuneleri arasında çözgü yönünde %1,6, atkı yönünde %0,6; PLY2-PLY3 numuneleri arasında çözgü yönünde %3,3, atkı yönünde %5,3; PLY3-PLY4 numuneleri arasında ise çözgü yönünde %1, atkı yönünde %1,7 oranında artış saptanmıştır. Elde edilen veriler, pomza katkısının hem atkı hem de çözgü yönlerinde yırtılma mukavemeti değerlerini artırdığını göstermektedir. Kumaşlarda pomza oranı ile mukavemet değeri ilişkisinin belirlenmesi kumaş tasarımlarında da önemli rol oynayacaktır. Genel olarak, kaplama işlemi sonrasında numunelerde hava geçirgenliğinde azalma, yırtılma mukavemetinde ise artış gözlemlenmiştir (Akçalı ve Bulut, 2022; Baykal ve Karataş 2021).

İşlem görmemiş bir kumaşa, elyaf eksenine paralel bir kuvvet uygulandığında, elyaf yapısındaki makromolekülleri birbirine bağlayan bağlar, bu kuvvete karşı bir direnç göstermektedir. Uygulanan kuvvet, bu direnç seviyesini aştığında ise elyaf kırılma eğilimi göstererek yırtılma gerçekleşmektedir. Geliştirilen işlem basamağı ile kumaş yüzeyine bir tabaka uygulanması sonucunda, mikronize pomza ile işlem gören kumaşların yırtılma mukavemeti değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir [Akçalı ve Bulut, 2019].

Güç tutuşur kumaşlar genelde uzay, uçak, petro-kimya, çelik endüstrisi gibi yüksek koruyuculuk gerektiren sanayi dallarında kullanılmaktadır (Gemci ve Gülşen 2010). Bu tür kumaşlarda, güç tutuşur özelliklere ek olarak, yırtılma mukavemeti ve hava geçirgenliği gibi fiziksel özellikler de kritik rol oynar. Kaplama işlemi sonrasında yırtılma mukavemetindeki artış, kumaşın dayanıklılığını yükseltirken uzun süreli kullanımda yıpranma direncini artırabilir. Bu, özellikle ağır yükler ve yüksek mekanik stres altında olan iş kıyafetleri ve koruyucu ekipmanlar için avantaj sağlar. Öte yandan, kaplama işleminin hava geçirgenliğinde önemli bir azalmaya yol açması, kullanıcı konforunu olumsuz etkileyebilir. Bu tür kumaşların kullanım alanları göz önünde bulundurularak, kullanıcı konforunu artırmaya yönelik ek stratejilerin geliştirilmesi yararlı olabilir. Örneğin, bütül akrilat türevleri, kumaşın kırılma, uzama ve yırtılma darbe dayanımını artırmak için kullanılabilir (Brandrup vd., 1999). Ayrıca, polimer katkı maddelerinin yırtılma mukavemetini iyileştirici etkisi bilinmektedir (Abo-Shosha ve Ibrahim, 1992). Şekil 7 de görüldüğü gibi sadece baskı patının kullanımı pamuk kumaşta çözgü yırtılma mukavemeti değerinde % 40, atkı yırtılma mukavemeti değerinde %2.3, polyester kumaşta ise çözgü yırtılma mukavemeti değerinde % 120, atkı yırtılma mukavemeti değerinde yaklaşık %100 artış göstermiştir. Kaplama malzemesinde kullanılan patın da bu iyileşmeye katkı sağladığı muhtemeldir.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada pomza hammaddesi ile pamuk ve polyester özellikli olan pamuk ve polyester kumaşlar kumaş yüzeyine %0, %4, %8, %12 katkı oranlarıyla kaplanarak deney sonuçları incelenmiştir. Kaplama malzemesi olarak kullanılan pomza taşında bulunan Al_2O_3 bileşimi ise ısıya ve ateşe karşı yüksek dayanım özelliği sağladığından, kaplanmış kumaşların güç tutuşurluk analizinde olumlu etki yaratmıştır. Pomza ile kaplanmış her iki kumaş türünde numune yanma süresinde, ham kumaşlara göre, önemli düzeyde gecikme gözlenmiştir. Özellikle %12 oranında en fazla pomzanın kullanıldığı pamuklu kumaşın güç tutuşurluk özelliğinde önemli bir artış tespit edilmiştir. Hava geçirgenlik testlerinin sonucunda ise; kaplama işlemine alınan tüm kumaş türlerinin hava geçirgenlik oranlarının önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir. Yırtılma mukavemet analiz sonuçlarına göre ise, pomza kullanım oranı arttıkça yırtılma mukavemet değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek pomza kullanım oranı (%12) ile kontrol numunesi pamuklu kumaşta (P0-P4) çözgü yönünde yaklaşık olarak %66.1, atkı yönünde ise %25.6 civarında mukavemet artışı belirlenmiştir. Polyester kumaşta ise en yüksek pomza kullanımında (%12) ile kontrol numunesi pamuklu kumaşta (PLY0-PLY4) çözgü yönünde yaklaşık olarak %135 atkı yönünde ise %115 civarında yırtılma mukavemetinde artış olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada sunulan bütün bulgular ışığında, yanma geciktirici kumaşların yapımında doğal bir hammadde olan pomza taşının kullanılmasının verimli olacağı görülmüştür. Bu veriler, teknik ve koruyucu tekstiller ile ilgili çalışmalara da zemin olacaktır. Ayrıca giyilebilir kumaş tasarımında da gerekli testlerin yapılarak değerlendirilmesi yeni çalışmaların kazanılmasını sağlayacaktır. Diğer taraftan farklı doğal kayaç bileşen malzemeler ile bu tarzda çalışmaların yapılması tekstil endüstrisine yeni kazanımların sağlanması ve bilimsel çalışmalara katkı sağlaması açısından önemli olacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma çalışması, aşağıda listelenen kişi ve kurumların sağladığı laboratuvar ve malzeme desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Bey-Han Tekstil Konfeksiyon San. ve Tic. Ltd. Şti Gürsu/Bursa/Türkiye
Rudolf Duraner Kimyevi Maddeler Tic. ve San. A.Ş Nilüfer/Bursa/ Türkiye
Göлтаş Göller Bölgesi Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş., Isparta/ Türkiye

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abo-Shosha, M. H., & Ibrahim, M. A. 1992. Water Soluble Polyether Polyurethanes as Finishing Additives in Easy Care Finishing of Cotton Fabrics. *SCIENCE INTERNATIONAL-LAHORE-*, 4, 163-163.
- Akçalı, K., Bulut, M. O., 2022. Pomza, Amorf Silika ve Kolemanit Katkılı Baskı ve Sol Jel Yöntemi Kullanılarak Polyester Kumaşların Fiziksel Özelliklerinin Geliştirilmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 17 (2022) 384-403.
- Akçalı, K., & Bulut, M. O. 2019. A new finishing process of cotton fabric. *Industria Textila*, 70(2), 101-110.
- Alay, S., Alkan, C., Göde, F., 2012. Steady-State Thermal Comfort Properties of Fabrics Incorporated with Microencapsulated Phase Change Materials. *The Journal of The Textile Institute*, 103:7, 757-765.
- Backer, S. 1951. The relationship between the structural geometry of a textile fabric and its physical properties, part IV: Interstice geometry and air permeability, *Textile Research Journal*, 21, 703-714.
- Baykal, P. D., & Karataş, E. 2021. Güç Tutuşurluk Apresinin Denim Kumaş Performans Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(1), 43-54.
- Brandrup, J., Immergut, E. H., Grulke, E. A., Abe, A., & Bloch, D. R. (Eds.). 1999. *Polymer handbook* (Vol. 89, pp. V87-V90). New York: Wiley.
- Carosio, F., Alongi, J., Malucelli, G., 2012. Layer by Layer Ammonium Polyphosphate-based Coatings for Flame Retardancy of Polyester-Cotton Blends. *Carbohydrate Polymers*. 88 (2012) 1460– 1469.
- Çeven, E.K., Süle, G., Gürarda, A., Ersöz, A., 2011. Metal İplikli Dokuma Kumaşların Hava Geçirgenliğinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 16, Sayı 2.
- Covaci, A., Harrad, S., Abdallah, M. A. E., Ali, N., Law, R. J., Herzke, D., & de Wit, C. A. 2011. Novel brominated flame retardants: a review of their analysis, environmental fate and behaviour. *Environment international*, 37(2), 532-556.
- Duran, K., Bahtiyari, M.İ., Özdemir, D. 2005. Pomza Taşı ile Denim Yıkama, *Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*, s313-320, Isparta, Türkiye.
- Gemci, R., Gülşen, G., 2010. Güç Tutuşur Kumaş Üretiminde Bor Bileşiklerinin Kullanılması. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(1), 1-10.
- Gündüz, L. 2008. The Effects of Pumice Aggregate/Cement Ratios on the Low-strength Concrete Properties. *Construction Building Materials*. 22(5),721.
- Gündüz, L., Şapcı, N., Davraz, M. 2005. Pomza Madenciliği Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör), *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET 2005*, İzmir, 9-12 Haziran.
- Havlová, M. 2014. Model of Vertical Porosity Occurring in Woven Fabrics and its Effect on Air Permeability. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*.
- Horrocks, A. R & Anand, S. C. 2000. *Teknik Tekstiller El Kitabı*. Türk Tekstil Vakfı. İstanbul.
- Horrocks, A. R. 1996. Developments in Flame Retardants for Heat and Fire Resistant Textiles-the Role of Char Formation and Intumescence. *Polymer Degradation and Stability*. 54(2-3), 143–154. doi:10.1016/S0141-3910(96)00038-9.
- Horrocks, A. R. 2011. Flame Retardant Challenges for Textiles and Fibres: New chemistry Versus Innovative Solutions. *Polymer Degradation and Stability*, 96(3), 377–392. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.036.
- Koyuncu, M. 2018. The influence of pumice dust on tensile, stiffness properties and flame retardant of epoxy/wood flour composites. *Journal of Tropical Forest Science*, 89-94.
- Levchik, S. V., & Weil, E. D. 2004. A Review on Thermal Decomposition and Combustion of Thermoplastic Polyesters. *Polymers for Advanced Technologies*. 15(12), 691–700.
- Liu, Y., Pan, Y. T., Wang, X., Acuña, P., Zhu, P., Wagenknecht, U., ... ve Wang, D. Y. 2016. Effect of Phosphorus-Containing Inorganic-Organic Hybrid Coating on the Flammability of Cotton Fabrics: Synthesis, characterization and flammability. *Chemical Engineering Journal*, 294, 167-175.
- Öncü, G., & Şapcı, N. 2023. Protective properties of different fabrics using micronized pumice. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 48(3), 320-325.
- Rakhman, A., Diharjo, K., Raharjo, W. W., Suryanti, V., & Kaleg, S. 2022. Improvement of fire resistance and mechanical properties of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) composite prepared from combination of active nano filler of modified pumice and commercial active fillers. *Polymers*, 15(1), 51.
- Scelzo, W.A. and Backer, S. and Boyce, M.C. 1994. Mechanistic Role of Yarn and Fabric Structure in Determining Tear Resistance of Woven Cloth - Part I: Understanding Tongue Tear, *Textile Research Journal*. 64, 291- 303.
- Turan, R.B., Okur, A., 2008. Kumaşlarda Hava Geçirgenliği, *Tekstil ve Mühendis*, Yıl 15, Sayı 72, 16-25.
- Uğur, Ş. S. 2023. Polyester Kumaşların Polianilin Esaslı Çok Tabakalı Kaplama İşlemi İle İletkenlik Ve Uv-Koruma Özelliklerinin Geliştirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(2), 837-843.
- Varghese, N., Thilagavathi, G. 2015. Development of woven stretch fabrics and analysis on handle, stretch, and pressure comfort. *The Journal of the Textile Institute*, 106(3), 242–252. doi.org/10.1080/00405000.2014.914652.
- Wang, B., Sheng, H., Shi, Y., Hu, W., Hong, N., Zeng, W., ... & Hu, Y. 2015. Recent advances for microencapsulation of flame retardant. *Polymer degradation and stability*, 113, 96-109.



AGREGA DARBE DAYANIM İNDEKSİ İLE KAYA VE BETONUN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ KORELASYON İLİŞKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kadir KARAMAN^{1*}

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Agrega Darbe Dayanımı,
Kaya ve Beton,
Jeomekanik Özellikler.*

Öz

Dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olan betonun jeomekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı, UCS-C, nokta yükü dayanım indeksi, PLI-C ve ultrasonik P dalga hızı, UPV-C) mühendislik uygulamalarında ve tasarım aşamasında sıklıkla kullanılmaktadır. Betonun ana bileşeni agregalar (% 70-80) olduğundan beton özellikleri büyük ölçüde agregalar tarafından kontrol edilmektedir. Agregaların önemli mekanik bozulma testlerinden biri olan Agregal Darbe Dayanım İndeksi (ADDI) parametresinin belirlenebilmesi için de agregalar kullanılmaktadır. Dolayısıyla ADDI parametresi ile betonun jeomekanik özellikleri (UCS-C, UPV-C, PLI-C) arasında bir ilişki olması muhtemeldir. Bu nedenle bu çalışmada ADDI ve betonun jeomekanik özellikleri arasında ilişki olup olmadığı korelasyon analizleri yapılarak araştırılmıştır. Ayrıca, karşılaştırma yapmak amacıyla agregaların elde edildiği kayaların jeomekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı (UCS-R), P dalga hızı (UPV-R), nokta yükü dayanım indeksi (PLI-R), görünür gözeneklilik (%n) ve birim hacim ağırlık) ve ADDI arasında korelasyon analizleri yapılmıştır. Sekiz farklı sağlam kayadan üretilen agregalar ADDI deneylerinde ve beton üretiminde kullanılmıştır. Betonun ortalama dayanım değerleri 4.5-26.4 MPa arasında ve kayaların dayanımı 12-183 MPa arasında değişmiştir. ADDI değerleri ise % 5.1'den %24.6'ya değişmiştir. Bu çalışmada ADDI ve kaya parametreleri arasında yüksek-çok yüksek, ADDI ve beton parametreleri arasında ise yüksek derecede istatistiksel açıdan anlamlı korelasyon ilişkileri bulunmuştur. Zayıf kaya (< 25 MPa) agregalarına ait beton örneklerinin çimento yerine agregaların kırılmasıyla yenilmeye uğraması ve betonun sadece agregalardan değil karışım parametrelerinden de etkilenmesi gibi nedenler korelasyon ilişkilerini kaya parametrelerine kıyasla nispeten düşürmüştür.

INVESTIGATION OF THE CORRELATION RELATIONSHIPS BETWEEN AGGREGATE IMPACT STRENGTH INDEX AND GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCK AND CONCRETE

Keywords

*Aggregate Impact Strength,
Rock and Concrete,
Geomechanical Properties.*

Abstract

The geomechanical properties (uniaxial compressive strength, UCS-C, point load strength index, PLI-C, and ultrasonic P-wave velocity, UPV-C) of concrete, one of the most widely used building materials in the world, are frequently used in engineering applications and design stages. Since the main concrete's constituent is aggregates (70-80%), properties of concrete are principally controlled by aggregates. The aggregate impact strength index (ADDI) is also attained from the test implemented using aggregates. Thus, there may be relations between the ADDI parameter and the concrete strength. Therefore, in the current study, whether there was a relationship between UCS-C and ADDI was researched by executing correlation analyses. Additionally, correlation analyses were performed between the uniaxial compressive strength (UCS-R) and ADDI of the rocks from which the aggregates were obtained. Aggregates produced from eight different intact rocks were utilized in concrete production. The mean concrete strength values changed between 4.5-26.4 MPa, and the rocks' strength varies between 12-183 MPa. ADDI values vary from 5.1% to 24.6%. In this study, high to very high correlations were found between ADDI and rock parameters and high statistically significant correlations were found between ADDI and concrete parameters. The concrete samples of weak rock (< 25 MPa) aggregates were subjected to failure by aggregate fracture instead of cement and the concrete was affected not only by aggregates but also by mix parameters, which relatively reduced the correlation relations compared to rock parameters.

Alıntı / Cite

Karaman, K., (2025). Agregal Darbe Dayanım İndeksi ile Kaya ve Betonun Jeomekanik Özellikleri Arasındaki Korelasyon İlişkilerinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 28-36.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K. Karaman, 0000-0002-3831-4465

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	22.05.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	23.09.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.11.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: kadir.karaman@ktu.edu.tr, +90-377-42-64

INVESTIGATION OF THE CORRELATION RELATIONSHIPS BETWEEN AGGREGATE IMPACT STRENGTH INDEX AND GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCK AND CONCRETE

Kadir Karaman^{1†},

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Highlights

- This study focused on the relationships between the ADDI and the geomechanical properties of rock and concrete.
 - Higher coefficients were obtained between ADDI and rock parameters compared to concrete parameters.
 - Weak rock aggregates and mixing parameters of concrete affected the correlation relations of concrete samples.
-

Purpose and Scope

In this study, the correlation relationships between the representative ADDI parameter and the geomechanical properties of rocks (UCS-R, PLI-R, UPV-R, n-R and BHA-R) and concrete (UCS-C, PLI-C, UPV-C) were investigated.

Design/methodology/approach

ADDI tests were carried out on aggregates prepared in certain sizes. Geomechanical properties of the rocks were determined in the laboratory. Aggregates were prepared from the same rock samples and then concrete samples were prepared. The relationship between ADDI and rock and concrete parameters was investigated.

Findings

A high-very high correlation was found between ADDI and rock parameters, and a high degree of correlation was found between ADDI and concrete parameters, and the all correlations were statistically significant. Since concrete properties can be affected not only by aggregates but also by mixing parameters, although concrete samples were more homogeneous than rock samples, they did not enhance the correlation relationships. Additionally, in very weak rocks, the results may be affected as the failure of the concrete sample occur by breaking the weak aggregates instead of the cement.

Originality

It is known that concrete samples are more homogeneous compared to those of rocks. Therefore, a higher correlation relationship was expected between ADDI and concrete parameters. However, higher correlation relationships between ADDI and rock parameters were found. Since the correlation relationships between ADDI and both rock and concrete parameters were investigated in this study, it was determined that the properties of both materials are better correlated with ADDI. The factors affecting the correlation in concrete samples are also discussed.

1. Giriş (Introduction)

Beton, günümüzde yaygın olarak kullanılan en önemli yapı malzemelerinden biridir (Karaman ve Bakhytzhan, 2020). Beton yapıların çeşitli çevresel etkilere karşı dayanıklı olmasının yanı sıra dayanımının (UCS-C) da yüksek olması istenmektedir. Betonda UCS-C anahtar parametrelerden biri olup her türlü mühendislik uygulaması için önem arz etmektedir. Test için standart numuneler gerektiğinden pratik uygulamalar ve ön değerlendirmelerde dolaylı testler son zamanlarda tercih edilmeye başlamıştır (Zacoeb ve Ishibashi, 2009; Selçuk ve Gökçe, 2015; Kılıç vd., 2019). Zacoeb ve Ishibashi (2009) UCS-C ve betonun nokta yükü dayanım indeksi (PLI-C) arasında güçlü ilişkiler bulmuşlardır. Selçuk ve Gökçe (2015) PLI-C/UCS-C ve UCS-C parametreleri arasında regresyon analizleri yapmışlardır. Kılıç vd. (2019) kayaçların fiziko-mekanik özelliklerini kullanarak betonun UCS-C parametresini tahmin etmişlerdir. Karaman ve Bakhytzhan (2020) agrega seçiminin ön tasarım aşamasında beton dayanımının (UCS-C) hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için pratik eşitlikler önermişlerdir. Teymen (2023) özellikle ön tasarım aşamasında betonun temel özelliklerinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için pratik ve kullanışlı denklemler önermiştir.

Bazı durumda UCS ve PLI gibi dayanım testlerinin sonuçları mevcut olsa bile ADDI gibi bazı mekanik bozulma

[†] Corresponding author: kadirkaraman@ktu.edu.tr, +90-377-42-64

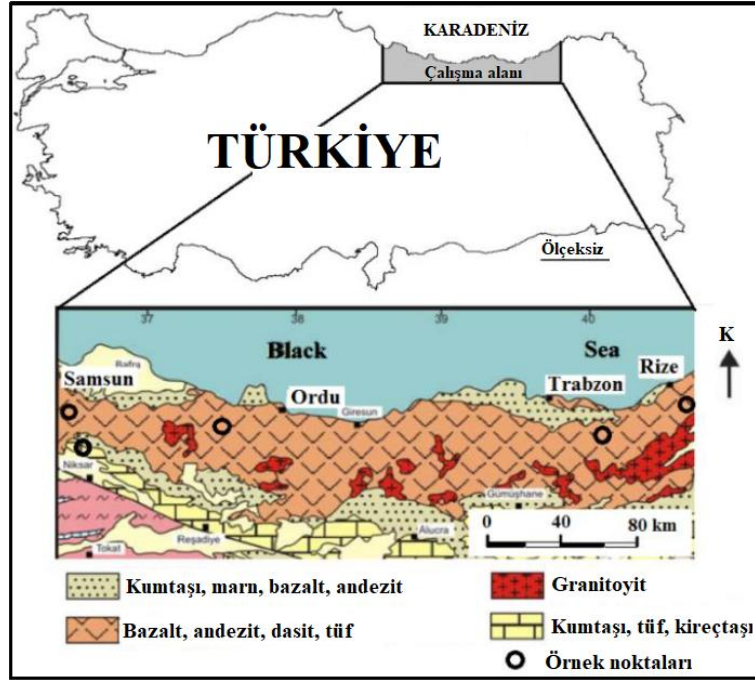
testlerine ihtiyaç vardır (Kamani ve Ajalloeian, 2019). ADDI, agregaların tekrarlanan darbe yükü ile ezilme etkisini çok iyi yansıtmaktadır. Literatürde ADDI ve UCS-C arasında ilişkiye yönelik az sayıda araştırma yapılmıştır. Sharifi ve Nikudel (2011) agreganın fiziko-mekanik özellikleri ile betonun UCS-C parametresi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Yazarlar, ADDI ve UCS-C arasında negatif korelasyon elde etmiş olup ADDI değerleri arttıkça UCS-C değerleri düşmüştür. Collery vd. (2014) betonda geri dönüştürülmüş agregalar üzerinde yaptıkları çalışmada ADDI ve UCS-C arasında iyi derecede ($R^2 = 0.76-0.79$) ilişki elde etmişlerdir. Selçuk ve Gökçe (2015) literatürde UCS-C ve diğer parametreler arasında güçlü ilişkiler elde edilmesine rağmen, agrega türü ve beton karışım özelliklerindeki bilinmeyenleri açığa çıkarmak için, daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır. Literatürde ADDI ve kaya dayanımı (UCS-R) arasındaki ilişkiye yönelik çalışma az sayıda mevcuttur. Kamani ve Ajalloeian (2019) ADDI değerleri % 14.6 ve % 42.6 arasında değişen karbonat kayaçalarda, UCS-R ve ADDI arasında orta derecede ilişki bulmuşlardır. Literatürde ayrıca pomza gibi hafif beton üretiminde kullanılan agregaların ADDI parametreleri belirlenmiştir. İdi vd. (2020) iri agreganın kısmi ikamesi olarak pomza agregası kullanılan betonun dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar ADDI değerlerini iri agrega için %16.11 ve pomza için %28.63 olarak bulmuşlardır. Özgüler vd. (2023) kaplanmış pomza agregalarının, kaplanmamış pomza agregalarına göre agrega darbe dayanımlarının arttığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, ayrıca kaplanmış pomza agregalarının su emme oranlarında azalmaların meydana geldiğini ve mekanik özelliklerinde ise kaplanmamış pomzalara göre iyileşmelerin olduğunu ifade etmişlerdir.

Betonun ana bileşeni (%70-80) agregalar olduğu için beton özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır (Kılıç vd., 2019). Neville (2011) tüm agrega parçacıklarının başlangıçta daha büyük bir kütle bir parçasını oluşturduğunu ve bu nedenle agreganın kimyasal ve mineral bileşimi, petrolojik özellikleri, sertliği, dayanımı, özgül ağırlığı, gözenek yapısı ve rengi gibi birçok özelliğinin tamamen ana kayanın özelliklerine bağlı olduğunu ifade etmiştir. Parçacık şekli ve boyutu, yüzey dokusu ve emilim gibi agreganın sahip olduğu ancak ana kayada bulunmayan diğer özellikler de beton ürününün kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. ADDI deneylerinde agregalar kullanılması söz konusu özellikleri temsil etme açısından önemlidir. Bu çalışmada geniş temsil özelliğine sahip ADDI parametresi ve kayaçların jeomekanik özellikleri (UCS-R, PLI-R, UPV-R, görünür gözeneklilik (n-R) ve birim hacim ağırlık (BHA)) arasında korelasyon ilişkisi araştırılmıştır. Ayrıca, aynı kayaçalardan elde edilen agregalar kullanılarak beton örnekleri oluşturulmuş ve ADDI ve beton parametreleri (UCS-C, PLI-C, UPV-C) arasında korelasyon analizleri yapılmış ve istatistiksel olarak veri çiftleri arasındaki ilişkinin anlamlılığı test edilmiştir. Bu çalışmada, hem kaya özelliklerini doğrudan yansıtan hem de büyük oranda betonun özelliklerini etkileyen agrega örneklerinin kullanıldığı ADDI deneyinin seçilmesi önem taşımaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Kayaçların Örneklenmesi ve Deneysel Çalışmalar (Rock Sampling and Experimental Studies)

Bu çalışmada kullanılan kayaçlar Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nden temin edilmiştir (Şekil 1). Bazalt, diyabaz-1, diyabaz-2, granodiyorit, andezit, kireçtaşı, lapilli tuf ve kil taşından oluşan toplam sekiz farklı kaya bloğu laboratuvara getirilerek deneyler yapılmıştır. UCS-R, PLI-R, UPV-R, BHA-R ve n-R testleri ISRM tarafından önerilen yöntem (ISRM 2007) kapsamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahasının temel jeolojik özellikleri (Okay ve Şahintürk (1997)'den değiştirilmiştir) (Basic geological features of the study area (modified from Okay and Şahintürk (1997))

Birim hacim ağırlık ve görünür gözeneklilik testleri silindirik örneklerden gerçekleştirilmiştir. Test için dijital PLI test cihazı kullanılmıştır. Eksenel nokta yükü test yöntemi NX boyutlu karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karot numunelerini hazırlamak için laboratuvar karot delme ve kesme makineleri kullanılmıştır. Her kaya örneğinden 54.7 mm çapında en az 10 karot (UCS-R/UPV-R için beş ve BHA için beş) elde edilmiştir. UPV-R ve UCS-R testleri için uzunluk/çap oranı 2.5 olan karot örnekleri kullanılmıştır. UCS-R testleri için 200 ton kapasiteli servo-kontrol sistemine sahip pres makinesi kullanılmıştır. Gerilme hızı 0.5-1.0 MPa/s sınırları içinde seçilmiştir. Her bir karot numunesinin UCS-R testini yapmadan önce, bu numuneler için Taşınabilir Ultrasonik Tahribatsız Dijital Gösterge Test Cihazı (PUNDIT) kullanılarak doğrudan iletim ile UPV-R testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerden önce numunelerin uç yüzeyleri, iyi bir bağlantı için yeterince pürüzsüz ve düz bir düzlem oluşturacak şekilde parlatılmıştır. Verici ve alıcının yüzeyine ince bir vazelin tabakası uygulanmıştır.

2.2. Agrega darbe dayanım deneyi (Aggregate Impact Strength Test)

Agrega darbe dayanımı için blok örneklerden çeneli kırıcı yardımıyla örnekler hazırlanmıştır. Deneyler için, 12.5 mm elekten geçen ve 10 mm elek üzerinde kalan agregalar kullanılmıştır. Her kaya türü için 500 gram hazırlanan agrega örnekleri BSI (1990) standardında önerildiği gibi öncelikle etüvde 105 °C'de 4 saat bekletilmiş ve desikatörde soğutulduktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Örnekler deney cihazı haznesine yerleştirildikten sonra cihazın 14 kg ağırlığındaki çelik gövdeli çekiç kısmı 15 kez hazne üzerine 15 inçlik (38.1 cm) bir mesafeden bırakılmıştır (Şekil 2a). 15 vuruştan sonra hazne içindeki numune alınarak 2.36 mm'lik elekten geçirilmiştir. ADDI (%) değerleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (BSI, 1990).

$$ADDI = \frac{B}{A} \times 100 \quad (1)$$

A: Başlangıçta tartılan malzeme miktarı (gr) (-12.5 +10 mm)

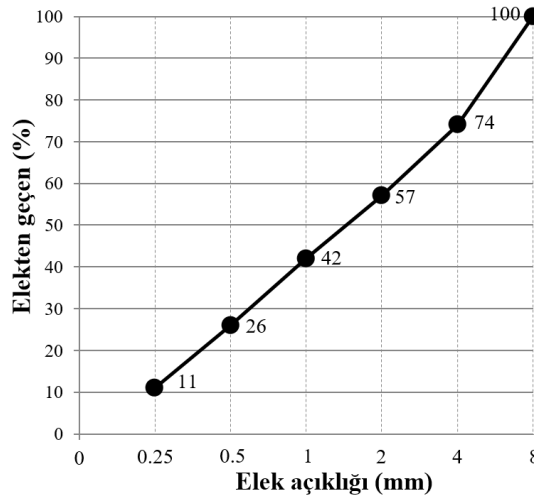
B: 2.36 mm elekten geçen malzeme miktarı (gr) (-2.36 mm)



Şekil 2. Deneysel çalışmalar, ADDI deneyi (a), UCS örnekleri ve deneyi (b), PLI deneyleri (c) (Experimental studies, ADDI experiment (a), UCS samples and experiment (b), PLI experiments (c))

2.3. Beton Karışım Tasarımı (Concrete Mixture Design)

Farklı beton dayanımlarını göstermek için çok düşükten çok yükseğe kadar farklı dayanımlara sahip kayalar seçilmiştir. Sonuçların karşılaştırılabilmesi için kaya karot numuneleri ile aynı boyutta çimentolu beton üretilmiştir. Bu çalışmada Portland çimento (OPC, CEM-I 42.5-R) kullanılmıştır. Agregası türü olarak kırma taş agregası kullanılmıştır. İstenilen boyutta agregası elde etmek için laboratuvar kırıcıları (çeneli kırıcı vb.) kullanıldığından, kusurlu tanelerin oldukça az olduğu agregası parçacıkları çoğunlukla kübik ve köşeli şekillerde değerlendirilmiştir. Her elek boyutu (0.25, 0.50, 1, 2, 4 ve 8 mm) için agregası miktarları aynı tutulmuş ve tüm beton karışımlarında çimento miktarları sabit tutulmuştur. TS-706 (2003), agregaların özel kullanımı için tanımlanan uygun eleklerin kullanılabileceğini önermektedir. Numune hazırlama için TS-706 (2003)'e göre maksimum 8 mm boyutunda iyi derecelenmiş agregalar elde edilmiştir. Agregası-çimento hamuru ara yüzeyi maksimum tane boyutunun artmasıyla genişler ve mikro çatlaklara neden olur (TS-3530 2007). Petrografik incelemelere göre, farklı şekil ve boyutta kaya parçalarına sahip lapilli tüf hariç, incelenen kayalardaki ortalama mineral tanelerinin tümü de 8 mm'den küçüktür. Bu nedenle, homojen çimentolu malzeme sağlamak için nispeten küçük tane boyutları kullanılmıştır (Şekil 3). Agregasının hacimce %74'ü ince agregası, %26'sı iri agregası olarak belirlenmiştir. Çalışmada hassas bir şekilde elek açıklıklarına karşılık gelen oranlara dikkat edilmiştir. Agregası türünün dayanım üzerindeki etkisini görmek için beton dayanımını etkileyen diğer faktörler tüm beton karışımları için aynı tutulmuştur (çimento, su/çimento oranı, iri/ince agregası oranı, vb.). Tüm numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve test tarihine kadar yaklaşık 20°C sıcaklıktaki bir su havuzunda sürekli olarak kürlenmiştir.



Şekil 3. Beton karışımlarında kullanılan agregasının granülometri eğrisi (Granulometry curve of aggregate used in concrete mixtures)

Bu çalışmada, UPV-C ve UCS-C testleri için her bir beton karışımı için temsili numuneler (UCS-C için üç ve PLI-C için sekiz (50 x 30 mm)), 50 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda delikli bir tabana sahip plastik silindirik döküm içine dökülmüştür. Betonun karıştırılması, gözenekliliği yüksek olanlar hariç her bir numune için 0.55 su çimento oranında olacak şekilde yapılmıştır. Karışımların hazırlanmasında içme suyu kullanılmıştır. Taze betonun çökme değerleri (slump) agregası özelliklerine bağlı olarak tüm karışımlar için 16 ila 20 cm arasında değişmiştir. Beton numunelerinin UPV-C testleri kaya numuneleri ile aynı deneysel koşullarda gerçekleştirilmiştir. UPV-C testlerinden sonra, UCS-C testleri aynı numuneler üzerinde ASTM (2002)' ye göre 30 ton kapasiteli bilgisayar

kontrollü mekanik bir pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Silindirik numuneler 7 günlük kür sürelerinde UPV-C ve UCS-C testlerine tabi tutulmuştur. Silindirik kalıplar kullanılarak PLI-C testi için özel döküm numune hazırlanmıştır. Kaya numunelerinde olduğu gibi eksenel test yöntemi tercih edilmiştir.

2.4. İstatistiksel Değerlendirmeler (Statistical Assessments)

Korelasyon analizi, bir değişken ile iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi görmek ve söz konusu ilişkinin derecesini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir (Alemdağ ve Gürocak, 2011; Dağ, 2018). Bu çalışmada, ADDI ile UCS-R ve UCS-C parametreleri arasında korelasyon analizleri IBM SPSS statistics 23 paket programı ile yapılarak ilişkilerin % 95 güven aralığında anlamlılıkları araştırılmıştır. Ayrıca verilere hem t-testi uygulanmış hem de belirlenen korelasyon katsayıları Pearson'un kritik r değerleri ile karşılaştırılmıştır. t testi ile korelasyon katsayısının anlamlılığı 0.95 anlamlılık düzeyinde ve n-2 serbestlik derecesinde (2) nolu eşitlik kullanılarak test edilmiştir.

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

Burada; r = korelasyon katsayısı ve n = örnek sayısıdır.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Verilerin Değerlendirilmesi (Evaluation of the Data)

Neville (2011) çimento kalitesi aynı olduğunda farklı agrega türleri kullanılarak betonun çeşitli dayanım özelliklerinin elde edilebildiğini ifade etmiştir. Bu çalışmada farklı kökenden kayalara ait agregalar kullanıldığından hem kayaç hem de beton örneklerinin jeomekanik özelliklerinde oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 1). AIV değerleri % 5.1-24.6 arasında, UCS-R değerleri 12-183 MPa arasında, PLI-R değerleri 1.3-13.7 MPa arasında, UPV-R değerleri 2810-6226 m/s arasında, BHA-R değerleri 17.0-27.8 kN/m³ arasında, n-R değerleri % 0.74-27.2 arasında, UCS-C değerleri 4.5-26.5 MPa arasında, PLI-C değerleri 0.58-1.77 MPa arasında ve UPV-C değerleri 2572-4135 m/s arasında değişmiştir.

Tablo 1. Kaya ve betona ait deney sonuçları (Experimental results of rock and concrete)

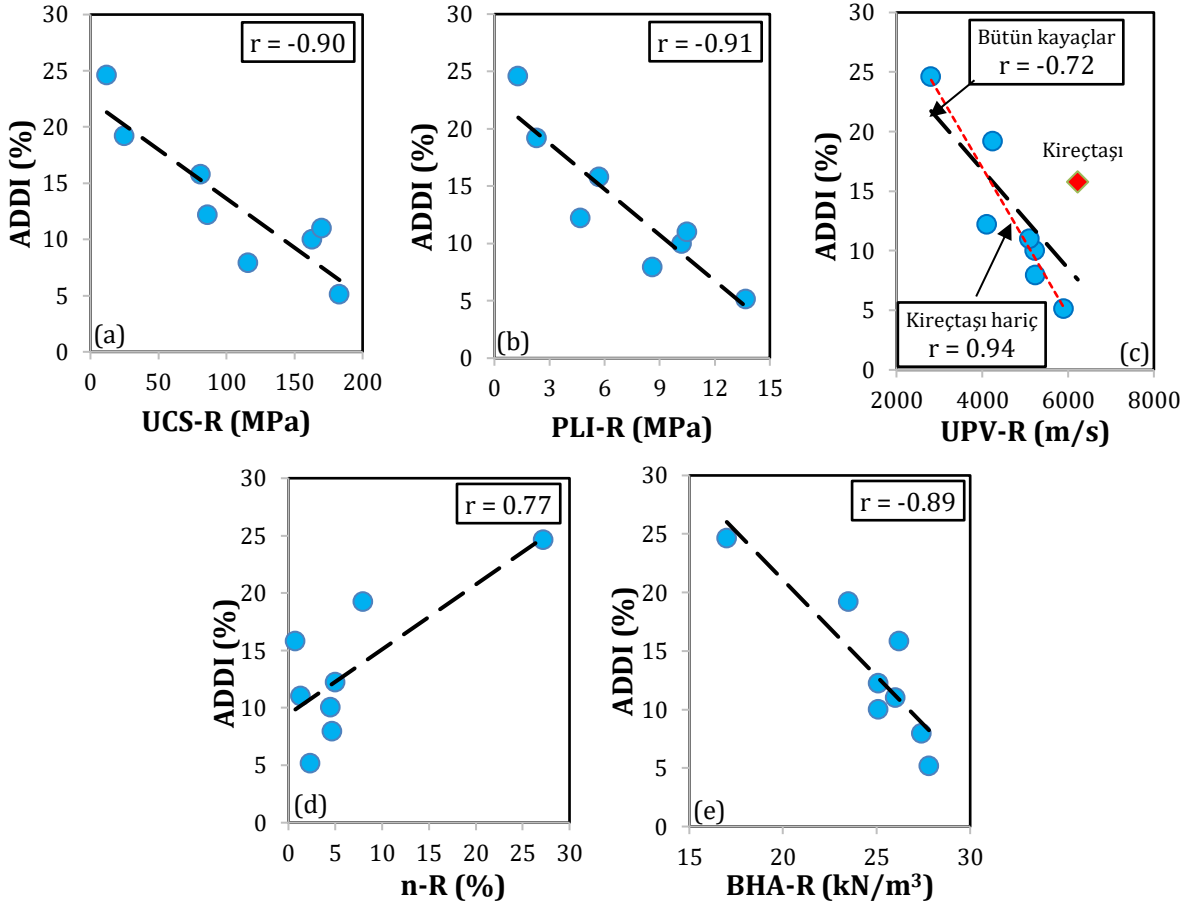
Kaya türü	AIV (%)	UCS-R (MPa)	PLI-R (MPa)	UPV-R (m/s)	BHA-R (kN/m ³)	n-R (%)	UCS-C (MPa)	PLI-C (MPa)	UPV-C (m/s)
Bazalt	10.0	163	10.2	5231	25.1	4.48	26.4	1.77	3818
Andezit	12.2	86	4.7	4115	25.1	5.01	18.7	1.56	3722
Diyabaz-1	7.9	116	8.6	5247	27.4	4.64	22.3	1.60	3743
Diyabaz-2	5.1	183	13.7	5899	27.8	2.33	26.5	1.68	4015
Granodiyorit	11.0	170	10.5	5104	26	1.29	24.2	1.74	3988
Kireçtaşı	15.8	81	5.7	6226	26.2	0.74	25.6	1.63	4135
Kil taşı	19.2	25	2.3	4253	23.5	7.96	17.8	1.39	3435
Lapilli tüf	24.6	12	1.3	2810	17.0	27.2	4.5	0.58	2572

AIV: Kayaların agrega darbe dayanım indeksi, UCS-R: Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, PLI-R: Kayaçların nokta yükü dayanım indeksi, UPV-R: Kayaçların ultrasonik P dalga hızı, BHA-R: Kayaçların birim hacim ağırlığı, n-R: Kayaçların görünür gözenekliliği, UCS-C: Betonun tek eksenli basınç dayanımı, PLI-C: Betonun nokta yükü dayanım indeksi, UPV-C: Betonun ultrasonik P dalga hızı

3.2. ADDI ve kayaçların jeomekanik özellikleri arasındaki korelasyon analizleri (Correlation analyses between ADDI and geomechanical properties of rocks)

ADDI parametresi ile kayaçların bazı önemli jeomekanik özellikleri (UCS-R, PLI-R, UPV-R, n-R, BHA-R) arasında ilişki grafikleri çizilmiştir (Şekil 4a-e). ADDI ile kayaç parametreleri arasında genellikle yüksek-çok yüksek derecede ilişki ($r = 0.72-0.91$) gözlenmiştir. Kayaçların dayanım özellikleri (UCS-R, PLI-R) ile ADDI arasında daha güçlü ilişki elde edilmiştir. Bunun nedeni, her ne kadar agrega üzerinde uygulanmasına karşın ADDI deneyinde de bir anlamda kayaçların direnci test edilmektedir. ADDI ve UPV-R arasındaki korelasyon analizi tüm kayaçlar için ve aykırı değer veren kireçtaşı örneğinin hariç tutularak iki şekilde gerçekleştirilmiştir. UPV değerleri kayaç örneğinin gözenekliliği gibi içsel özelliklerinden doğrudan etkilenebilmektedir (Karaman ve Kesimal, 2015). Kireçtaşı çok düşük görünür gözenekliliğe (% 0.74) sahip olduğundan yüksek UPV-R değerlerinin elde edildiği düşünülmüştür. Bu nedenle, korelasyon katsayısı bütün kayaçlar dikkate alındığında $r = 0.72$ iken, kireçtaşına ait

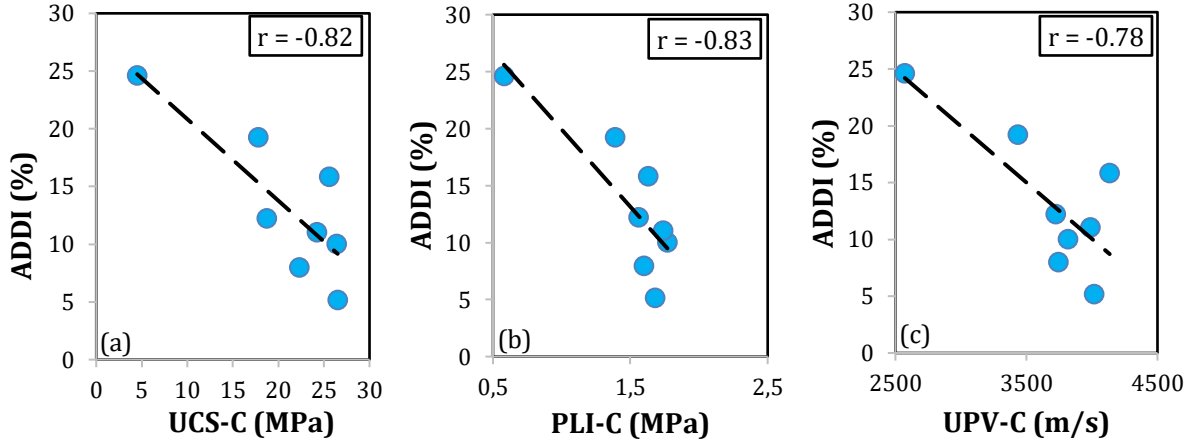
UPV-R değeri çıkartıldığında ise çok daha yüksek ($r=0.94$) olarak bulunmuştur. ADDI ve n-R arasında diğer korelasyon ilişkilerine kıyasla daha düşük korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Kılıç ve Teymen (2008) kayalardaki düşük görünür gözenekliliğin (<%2) parametreler arasındaki ilişkileri etkileyebileceğine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada $n<%2$ olan iki veri çıkartıldığında diğer veriler arasındaki korelasyon ilişkilerinin çok yüksek olabileceği grafikten anlaşılmaktadır (Şekil 4d).



Şekil 4. ADDI ile UCS-R (a), PLI-R (b), UPV-R (c), n-R (d) ve BHA-R (e) arasındaki ilişki grafikleri (Relationship graphs between ADDI and UCS-R (a), PLI-R (b), UPV-R (c), n-R (d) and BHA-R (e))

3.3. ADDI ve beton örneklerinin jeomekanik özellikleri arasındaki korelasyon analizleri (Correlation analysis between ADDI and geomechanical properties of concrete samples)

Beton numunelerinin testi kaya numunelerinin testine çok benzemektedir. Beton numuneler, tek eksenli ve üç eksenli sıkıştırma testleri yapıldığında kömür ve kaya ile aynı yenilme modlarını sergilemektedir (Wang vd., 2019). Beton numune homojenliği çoğunlukla kaya numunelerinden daha iyidir. Ölçümün tekrarlanabilirliğini etkilediği için deneysel çalışmalarda homojenlik önemlidir (Kuhinek vd., 2011). Kaya örneklerine benzer ilişki grafikleri ADDI ve beton parametreleri (UCS-C, PLI-C ve UPV-C) arasında oluşturulmuştur (Şekil 5a-c). ADDI ve betona ait parametreler arasında yüksek derecede ($r= 0.78-0.83$) ilişki gözlenmiştir. Korelasyon analizlerine göre; beton parametrelerine kıyasla ADDI ile kaya parametreleri arasında genel olarak daha yüksek katsayılar elde edilmiştir. Kaya örneklerinde yenilme, kayayı oluşturan mineral tanelerinin kırılması ve mikro çatlakların artarak zayıflık zonunu oluşturmasıyla söz konusu olabilmektedir. Öte yandan betondaki yenilme mekanizması daha farklıdır. Zayıf kayaların agregaları ile oluşturulan betonda yenilme agreganın kırılması sonucu olabilirken dayanımı yüksek kayaların agregalarından oluşturulan betondaki yenilme çimento içinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, beton dayanımı ile ADDI arasında kayaya göre nispeten daha düşük korelasyon katsayısının elde edilmesi muhtemeldir. Ayrıca, agregalar ana kayaların özelliklerini doğrudan yansıtırken, beton içinde büyük oranda yer almalarına karşın karışım özelliklerinin de beton parametreleri üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir.



Şekil 5. ADDI ile UCS-C (a), PLI-C (b) ve UPV-C arasındaki ilişki grafikleri (Relationship graphs between ADDI and UCS-C (a), PLI-C (b) and UPV-C)

3.4. ADDI ile kaya ve beton parametreleri arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi (Evaluation of the relationships between ADDI and rock and concrete parameters)

Şekil 4a-e ve Şekil 5a-c'deki grafiklerden elde edilen korelasyon katsayıları Pearson'ın kritik r değerlerinden yüksek çıktığı için ilişkiler anlamlı bulunmuştur. SPSS korelasyon analizine göre de bütün analizlerin anlamlılık seviyesi değerleri % 95 güven aralığında 0.05 değerinden daha düşük (0.002-0.046) olduğu için anlamlı çıkmıştır. Ayrıca t testine göre t_{hesap} değerleri t_{tablo} değerlerinden büyük olduğu için ilişkiler anlamlıdır (Tablo 2). UPV değerleri gözeneklilik gibi malzemenin içsel özelliklerinin küçük değişimlerinden doğrudan etkilenmektedir. Ayrıca, kaya mekaniği parametrelerinin korelasyonlarında olduğu gibi beton parametreleri ile ADDI parametresi arasındaki ilişki analizlerinde de sınırlamalar mevcuttur. Agregalar betonun büyük çoğunluğunu oluşturmasına karşın betonun jeomekanik özelliklerini etkileyen çimento türü, kür süresi, katkı maddesi, agrega boyutları gibi çok sayıda etmen bulunmaktadır. Bu nedenle bütün kayalar için ADDI ve kaya ve beton örneklerinin UPV değerleri arasındaki analizler üç yöntemle göre de (Pearson'ın kritik r değeri, anlamlılık seviyesi ve t testi) % 95 güven aralığı sınırına yakın değerler sunmuştur. En iyi sonuçlar ise ADDI ile kaya ve betonun dayanım özellikleri (UCS, PLI) arasında elde edilmiştir.

Tablo 2. Korelasyon analiz sonuçları (Results of correlation analysis)

Korelasyon ilişkisi	Örnek sayısı	Anlamlılık seviyesi	Korelasyon katsayısı, r	Pearson kritik r	t_{hesap}	t_{tablo}
ADDI ve UCS-R	8	0.002	-0.90	0.707	5.06	2.36
ADDI ve PLI-R	8	0.002	-0.91	0.707	5.37	2.36
ADDI ve UPV-R	8	0.046	-0.72	0.707	2.54	2.36
ADDI ve UPV-R	7	0.002	-0.94	0.754	6.16	2.45
ADDI ve n-R	8	0.027	0.77	0.707	2.96	2.36
ADDI ve BHA-R	8	0.003	-0.89	0.707	4.78	2.36
ADDI ve UCS-C	8	0.012	-0.82	0.707	3.52	2.36
ADDI ve PLI-C	8	0.011	-0.83	0.707	3.62	2.36
ADDI ve UPV-C	8	0.024	-0.78	0.707	3.03	2.36

Literatür tarandığında ADDI ile jeomekanik parametreler arasındaki ilişkiyi araştıran az sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir (Sharifi ve Nikudel, 2011; Afolagboye vd., 2017; Kamani ve Ajalloeian, 2019; Kuna ve Böğöly, 2024). Söz konusu çalışmalarda genellikle ADDI ve kaya parametreleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu çalışmada ise ADDI ile önce kayaların jeomekanik özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Daha sonra ise aynı kayaların agregalarından oluşturulan beton örneklerinin önemli parametreleri ile ADDI arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Sonuç olarak ADDI parametresi hem kaya hem de beton parametreleri ile istatistiksel açıdan anlamlı bir korelasyon sunmaktadır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada ADDI ile beton ve kaya parametreleri arasındaki ilişkileri daha iyi görebilmek adına dayanım özellikleri 12–183 MPa arasında değişen kayaç örnekleri kullanılmıştır. ADDI ve kaya parametreleri arasında yüksek-çok yüksek, ADDI ve beton parametreleri arasında ise yüksek derecede korelasyon ilişkisi bulunmuş olup, korelasyonlar istatistiksel açıdan anlamlı çıkmıştır. Beton özellikleri sadece agregalardan değil karışım parametrelerinden de etkilenebildiği için beton örnekleri kaya örneklerinden daha homojen olsa da korelasyon ilişkilerini artırmamıştır. Ayrıca, çok zayıf kayaçalarda (< 25 MPa gibi) beton örneğinin yenilmesi çimento yerine zayıf agregaların kırılmasıyla oluşacağından sonuçlar etkilenebilmektedir. ADDI parametresinin beton parametreleri ile korelasyonu, farklı kür süresine (14, 28 ve 90 gün), su çimento oranına (0.45, 0.50 gibi) ve farklı agrega türlerine ait örneklerin kullanılarak araştırılması önerilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Afolagboye, L.O., Talabi, A.O., Oyelami CA., 2017. The use of index tests to determine the mechanical properties of crushed aggregates from Precambrian basement complex rocks, Ado-Ekiti, SW Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 129,659-67.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z., 2011. Üst Kretase yaşlı bazaltlarda (Trabzon/Türkiye) birleşik ayrışma indeksi (UAI) ile fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler arasındaki ilişkiler. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (1), 1-10.
- ASTM., 2002. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.A.
- BSI., 1990. Testing aggregates: methods for determination of aggregate impact value. Part 112, Code no. BS812, British Standards Institution, London, U.K.
- Collery, D., Paine, K., Dhir, R., 2015. Establishing rational use of recycled aggregates in concrete: A performance-related approach. *Magazine of Concrete Research*, 67, 559-574.
- Dağ, S., 2018. Determining the degree of saturation of rocks as a function of time a case study from mountainous area of turkey. *Journal of Mountain Science*, 15(10), 2307-2319.
- Idi, M.A., Abdulzееz, A.S., Usman, S.A., Justin, T., 2020. Strength properties of concrete using pumice aggregate as partial replacement of coarse aggregate. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 04(11), 519-525.
- ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, in *Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods*, International Society for Rock Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628.
- Kamani, M., Ajalloeian, R., 2019. Evaluation of the mechanical degradation of carbonate aggregate by rock strength tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11 (1), 121-134.
- Karaman, K., Kesimal, A., 2015. Evaluation of the influence of porosity on the engineering properties of volcanic rocks from the Eastern Black Sea Region: NE Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(1), 557-564.
- Karaman, K., Bakhytzhаn, A., 2020. Prediction of concrete strength from rock properties at the preliminary design stage. *Geomechanics and Engineering*, 23, 115-125.
- Kılıç, A., Teymen, A., 2008. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 237-244.
- Kılıç, A., Teymen, A., Özdemir, O., Atış, C.D., 2019. Estimation of compressive strength of concrete using physicomaterial properties of aggregate rock. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(1), 171-178.
- Kuhinek, D., Zorić, I., Hrženjak, P., 2011. Measurement uncertainty in testing of uniaxial compressive strength and deformability of rock samples. *Measurement Science Review*, 11(4), 112-117.
- Kuna, E., Böğöly, G., 2024. Overview of the empirical relations between different aggregate degradation values and rock strength parameters. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(2), 375-391, 2024.
- Neville, A.M., 2011. *Properties of aggregate, prop concrete*. 5th Edition, Pearson Education, New York, 108-182.
- Okay, A.I., Şahintürk, O., 1997. *Geology of the Eastern Pontides*. AAPG memoirs 68: regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region. American Association of Petroleum Geologists, pp. 291-311, Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
- Özgüler, A.T., Göncüoğlu, T., Emiroğlu, M., 2023. Çimento hamuruyla kaplanmış pomza agregalarının su emme ve darbe dayanımı performanslarının incelenmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 9(1), 157-164.
- Selçuk, L., Gökçe, H.S., 2015. Estimation of the compressive strength of concrete under point load and its approach to strength criterions. *The KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(6), 1767-1774.
- Sharifi, J., Nikudel, M.R., 2011. *The Study of Relationships between Aggregates Properties and Concrete Strength*. First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment of Rehabilitation of Civil Structures 8 – 10 February, Dubai, UAE.
- Teymen, A., 2023. Statistical investigation of the effects of different origin aggregate properties on the mechanical properties of concrete. *Revista de la construcción*, 22 (2), 482-508.
- TS 706., 2003. *Beton Agregaları*, TSE, Ankara.
- TS 3530., 2007. *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-eleme metodu*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Turkey.
- Wang, C., Yang, S., Li, X., Jiang, C., Li, M., 2019. Study on the failure characteristics of concrete specimen under confining pressure. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 4119-4129.
- Zacoeb, A., Ishibashi, K., 2009. Point load test application for estimating compressive strength of concrete structures from small core. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(7), 46-57.



ARSUZ OVASI TOPRAKLARININ BESİN ELEMENT İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE BUNLARIN MEKÂNSAL DAĞILIMLARININ COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

Necat AĞCA^{1*}, Seyfullah ERTUĞRAL²

¹Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Hatay, Türkiye
²Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Hatay, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Arsuz Ovası, Toprak, Makro Ve Mikroelementler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Yersel Dağılım Haritaları.</i>	Bu çalışmada, Arsuz ovası topraklarının besin element içerikleri belirlenmiş ve bu elementlerin çalışma alanındaki mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur. Çalışma alanından, alanı temsil edecek şekilde ve rastgele örnekleme yöntemine göre 0-30 cm derinlikten 46 adet bozulmuş toprak örneği alınmıştır. Toprak örneklerinde; alınabilir sodyum (Na), potasyum (K), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), fosfor (P), demir (Fe), bakır (Cu), mangan (Mn) ve çinko (Zn) analizleri yapılmıştır. Besin element içeriklerinin haritalanmasında ve yersel değişiminin belirlenmesinde coğrafi bilgi sistemlerinden yararlanılmıştır. Topraklardaki Na, K, Ca, Mg, P, Fe, Cu, Mn ve Zn'nun ortalama içerikleri sırasıyla; 156.4, 20.18, 7031.1, 589.7, 4.19, 7.13, 3.71, 6.72, 1.77 olarak belirlenmiştir. En uygun yarivariyogram modeli K, Ca, Cu ve Fe için Guassian; Na, P ve Zn için Üssel (Exponential); Mg için ise Küresel (Spherical) olarak saptanmıştır. Örnekleme noktaları arasında yersel bağımlılığın olduğu maksimum uzaklık (A ₀) değerleri ise 510 m (Ca) ve 21100 m (P) arasında değişmiştir.

DETERMINATION OF NUTRIENT CONTENTS OF ARSUZ PLAIN SOILS AND EXAMINING THEIR SPATIAL DISTRIBUTION USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

Keywords	Abstract
<i>Arsuz Plain, Soil, Macro And Micronutrients, Geographic Information Systems (GIS), Spatial Distribution Maps.</i>	In this study, the nutrient contents of the Arsuz plain soils were determined and distribution maps of these elements in the study area were created. A total of 46 degraded soil samples were taken from the study area from a depth of 0-30 cm to represent the area and according to the random sampling method. Soil samples were analyzed for sodium (Na), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), phosphorus (P), iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn) and zinc (Zn). It has been used in geographical information systems for mapping the nutrients contents and determining the spatial change. The mean content of Na, K, Ca, Mg, P, Fe, Cu, Mn and Zn of soils are determined as 156.4, 20.18, 7031.1, 589.7, 4.19, 7.13, 3.71, 6.72, 1.77, respectively. The most suitable semivariogram model was determined as Guassian for K, Ca, Cu and Fe; Exponential for Na, P and Zn; Spherical for Mg. The maximum distance (A ₀) values where there is a ground dependence between sampling points varied between 510 m (Ca) and 21100 m (P).

Alıntı / Cite

Ağca, Necat, Ertuğral, Seyfullah (2025). Arsuz Ovası Topraklarının Besin Element İçeriklerinin Belirlenmesi ve Bunların Mekânsal Dağılımlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri ile İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 37-48.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
Necat Ağca, 0000-0003-4864-844X	Başvuru Tarihi / Submission Date 31.08.2024
Seyfullah Ertuğral, 0000-0003-2351-6942	Revizyon Tarihi / Revision Date 24.11.2024
	Kabul Tarihi / Accepted Date 26.11.2024
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar/Corresponding author: necagca@gmail.com, +90-5336514672

DETERMINATION OF NUTRIENT CONTENTS OF ARSUZ PLAIN SOILS AND EXAMINING THEIR SPATIAL DISTRIBUTION USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

Necat AĞCA^{1†}, Seyfullah ERTUĞRAL²

¹ Mustafa Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Plant Nutrition, Hatay, Türkiye

² Mustafa Kemal University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Soil Science and Plant Nutrition, Hatay, Türkiye

Highlights

- P contents of soils are insufficient in 80% of the area.
- Potassium and phosphorus fertilizer should be applied to almost the entire working area.
- Entire A_0 values, which indicate the maximum distance that sampling points can be related to each other, vary within wide limits such as 510-21100 m.
- The most suitable semivariogram model was determined as Gaussian for K, Ca, Cu and Fe; Exponential for Na, P and Zn; Spherical for Mg.

Purpose and Scope

In this study, the sufficiency status of macro and micronutrient elements of Arsuz plain soils was determined and distribution maps of these element contents in the study area were created.

Design/methodology/approach

In this study, the nutrient contents of the Arsuz plain soils were determined and distribution maps of these elements in the study area were created. A total of 46 degraded soil samples were taken from the study area from a depth of 0-30 cm to represent the area and according to the random sampling method. In soil samples, sodium (Na), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), phosphorus (P), iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn) and zinc (Zn) analyses were made. Descriptive statistical analyzes such as average, lowest and highest values of all parameters of the soil were calculated. Additionally, a normality test was performed to determine whether nutrient element contents were normally distributed in the study area. Geographic information systems (GIS) were used to determine and map the spatial distribution of nutrient contents. Spatial distribution maps were created by applying the block kriging interpolation method to all nutrient contents of the soils in the research area.

Findings

The mean content of Na, K, Ca, Mg, P, Fe, Cu, Mn and Zn of soils are determined as 156.4, 20.18, 7031.1, 589.7, 4.19, 7.13, 3.71, 6.72, 1.77 mg kg⁻¹, respectively. According to spatial distribution maps; the most common Na, K, Ca, Mg and P contents in the study area was determined to be between 100-250, 10-20, 3500-7000, 480-1500 and 2.5-8.0 mg kg⁻¹, respectively. The most suitable semivariogram model was determined as Gaussian for K, Ca, Cu and Fe; Exponential for Na, P and Zn; Spherical for Mg. The maximum distance (A_0) values where there is a ground dependence between sampling points varied between 510 m (Ca) and 21100 m (P). The most suitable semivariogram model was determined as Gaussian for K, Ca, Cu and Fe; Exponential for Na, P and Zn; Spherical for Mg. The maximum distance (A_0) values where there is a ground dependence between sampling points varied between 510 m (Ca) and 21100 m (P). Potassium and phosphorus fertilizer should be applied to almost the entire working area. However, the doses to be applied should be determined by more detailed studies. Liquid fertilizers containing microelements Fe and Mn should be applied.

Originality

Small-scale studies have previously been carried out on the soils in the study area. However, determining the nutrients throughout the plain and creating their distribution maps is being done for the first time. More detailed fertilization research can be done using the maps created in the study. Additionally, the data obtained from this study will contribute greatly to the national soil database.

[†] Corresponding author: necagca@gmail.com, +90-5336514672

1.Giriş (Introduction)

Toprak; iklim ve canlıların belirli bir ana materyal üzerine belirli topografik koşullar altında etkileri sonucu oluşmuş ve oluştuğu ana materyale benzemeyen, ancak onlardan belirli özellikler taşıyan, kendi kendini yenileyemeyen, üç boyutlu, doğal ve canlı bir doğal kaynaktır.

Topraklar tüm canlılar için yaşam kaynağıdır. Bitkiler için tek beslenme kaynağı olan topraklar, insanlar tarafından sürekli hor kullanılmış ve onların bozulmalarına ve verim güçlerinin azalmasına neden olmuştur. İnsanlar diğer yandan toprakları sürekli amaç dışı kullanarak miktarlarının azalmasına neden olmuştur. Bugün Türkiye’de son 20 yıl içerisinde yaklaşık 2.5 milyon hektar tarım alanı, tarım dışı amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır (TÜİK, 2023). Bir yandan topraklar miktar olarak azalırken, diğer yandan toprakların aşırı sömürülmesi sonucunda verim gücü azalmıştır. Oysa nüfus her geçen gün artmaktadır. Artan nüfus beraberinde daha fazla gıda üretmeyi zorunlu kılmaktadır. Artan nüfusu besleyebilenin tek yolu ise toprakların verimlilik düzeyini artırarak birim alandan yüksek verim artışları sağlamaktır.

Toprakların besin element içerikleri toprak verimliliğini ve dolaylı olarak bitkisel üretimi önemli ölçüde etkilemektedir. Topraklardan yüksek düzeyde verim alınabilmesi için, her besin elementinin yeterli miktarda bulunması gerekir. Bunun için de toprakların besin element miktarının bilinmesi ve yersel dağılımlarının belirlenmesi, üretim planlaması açısından son derece önemlidir. Besin element içeriklerinin yersel dağılımının belirlenmesi ise Jeostatistik ile yapılmaktadır.

Jeostatistik, az sayıda örnekleme yapılan çalışmalarda, örnekleme yapılamamış olan alanlardaki toprakların özelliklerini tahmin eden ve toprak özelliklerinin yersel değişimini inceleyebilmek için en fazla kullanılan araçlardan biridir (Webster ve Oliver, 2007).

Jeostatistiksel analizler iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, örnekleme noktaları arasındaki Konumsal ilişkiyi en iyi tanımlayan yarıvaryogram modelleri belirlenmektedir. İkinci aşamada ise belirlenmiş olan yarıvaryogram modelleri ve iyi bir enterpolasyon yöntemi kullanılarak, herhangi bir özelliğin örneklenmemiş noktadaki değerleri tahmin edilerek, o özelliğin çalışma alanındaki dağılım desenleri belirlenmekte ve dağılım haritaları oluşturulmaktadır (Isaaks ve Srivastava, 1989).

Jeostatistikte kullanılan Kriging enterpolasyon yöntemini diğer enterpolasyon yöntemlerinden ayıran en önemli özellik; tahmin edilen her bir nokta veya alan için bir varyans değerinin hesaplanabilmesidir. Yöntemin diğer bir üstünlüğü, kriging varyansı aracılığı ile tahmin hatasının büyüklüğünü değerlendirecek bir olanak sunmasıdır (Terçan ve Saraç, 1998).

Uygun ve Çetin (2012)’nin belirttiğine göre Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)’nin kullanımı, toprak kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilirliği konusunda önemli avantajlar sağlamaktadır. Dent ve Young (1981)’e göre CBS toprak yönetimi uygulamalarında; zaman ve işgücü açısından, çok önemli üstünlükleri bulunmaktadır (Budak ve Günel, 2015).

Bu çalışmada Arsuz ovasında yer alan toprakların bazı makro ve mikro besin element konsantrasyonları ile bunların çalışma alanındaki yersel dağılım haritalarının oluşturulması amaçlanmıştır.

2.Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Jeostatistiksel bir model kullanarak toprak özelliklerinin mekânsal değişkenliğini anlamak için Hindistan’ın Batı Bengal bölgesindeki lateritik topraklarda bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada Kriging teknikleri kullanılarak yarıvaryogram modeli oluşturup toprak özelliklerinin yüzey haritaları hazırlanmıştır. Çalışma sonucunu yorumlayan araştırmacılar, kullandıkları yöntemin ve oluşturdukları haritaların toprak-su yönetimini iyileştirmede yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir (Bhunja vd. 2018).

Akselendi Ovası’nda Yapılan bir çalışmada; alanın yarıdan fazlasında, fosfor, yaklaşık üçte ikisinde ise azot eksikliği olduğu belirlenmiştir. Yine toprakların mikro element içerikleri incelendiğinde sadece bakır içeriklerinin yeterli; demir, mangan ve çinko içeriklerinin ise yetersiz olduğu belirlenmiştir (Çelik ve Dengiz, 2018).

Hindistan’ın Madhya Pradesh eyaletinde jeostatistiksel yöntemler kullanılarak toprakların bazı besin element içeriklerinin dağılımı belirlenmiştir. Araştırma bulgularına göre; toprak örneklerinin sırasıyla %79,54 ve %7,92’sinde erişilebilir çinko ve demir eksikliği olduğu ancak hiçbir toprak örneğinde bakır veya magnezyum eksikliği olmadığı görülmüştür (Sikarwar vd. 2023).

Ağca ve Aşkiner (2024) tarafından Dörtüol ovasında yer alan toprakların bazı besin element içerikleri belirlenerek mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur. Araştırma sonucunda; topraklarda alınabilir K, P, Ca, Na ve K

içerikleri (mg kg^{-1}) sırasıyla; 12.18 ile 1563.1, 2.4 ile 133.6, 522.5 ile 4363.3, 3.07 ile 56.78 ve 473.7 ile 3278.8 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yine, toprakların alınabilir Fe, Cu, Mn ve Zn içerikleri (mg kg^{-1}) ise sırasıyla, 8.8 ile 43.5, 0.8 ile 9.4, 9.4 ile 332.2 ve 2.3 ile 22.7 arasında değişiklik göstermiştir. Besin elementlerine ait verilerin varyasyon katsayıları (VK) % 37.80 (Ca) ile % 120.85 (K) arasında değişmiştir. Çalışma alanındaki toprakların A_0 değerleri 710 m (Fe için) ile 18600 m (P için) gibi çok geniş sınırlar arasında değişmiştir. Besin elementlerinin çoğunluğu için en uygun yarivariyogram modellerinin Üssel ve küresel olduğu görülmüştür.

Nijerya'da Benin şehri yakınlarındaki bir alanda toprakların kimyasal özelliklerinin yersel dağılımı incelenmiştir. Sonuçlar, varyasyon katsayısının (CV) organik C, N ve K için orta (%15 - 50), P için ise yüksek (>%50) olduğunu ortaya koymuştur (Ajayi ve Okonkhu, 2024).

Kulaç (2024) tarafından yapılan bir çalışmada; fındık yetiştiriciliği yapılan su altında kalmış bir alanda, toprak verimliliği parametrelerinin yersel dağılımı değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda toprak özelliklerine ait etki aralığı değerlerinin 19.8-742.7 m gibi geniş sınırlar içinde değiştiği belirlenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

3.1.1. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu ve Özellikleri (Geographical Location and Features of The Study Area)

Arsuz ovası, Hatay'ın Arsuz ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır ($36^{\circ}29'42.22''$ K- $36^{\circ}1'8.71''$ D ve $36^{\circ}23'37.67''$ K- $35^{\circ}52'10.57''$ D). Çalışma alanının batısında Akdeniz, doğusunda Amanos Dağları, kuzeyinde İskenderun ilçesi, güneyinde ise Samandağ ilçesi ile sınırlandırılmıştır (Anonim, 2016). Çalışma alanı Akdeniz ikliminin etkisi altındadır (Anonim, 2019). Arsuz ovasında en çok yetiştirilen bitki maydanoz olup, bunu buğday, zeytin, limon, kayısı, narenciye, nar, çilek, şeftali izlemektedir (Anonim, 2017).

Çalışma alanının hemen hemen tamamını kuaterner yaşlı alüvyonlar oluşturmaktadır. Ancak alanın batısında pliyosen yaşlı kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşından oluşan çökel kayalar güneyinde kireçtaşı ve şelflerden oluşan çökel kayalar; doğusunda ise kumtaşı, çamur taşı ve kireçtaşlarından oluşan çökel kayalar bulunmaktadır (Anonim, 1982).

3.1.2. Toprak Örneklerinin Alınması (Soil sampling)

Çalışma alanından bölgeyi temsil edecek şekilde 0-30 cm derinlikten tesadüfi örnekleme yöntemine göre toplam 46 adet toprak örneği alınmıştır (Şekil 1). Ayrıca her bir örnekleme noktasının coğrafi koordinatları konum belirleme cihazı (GPS) ile belirlenmiştir.

3.2. Yöntem (Method)

3.2.1. Toprak Analizleri (Soil analyses)

Alınan örneklerde; alınabilir sodyum (Na), potasyum (K), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), demir (Fe), bakır (Cu), manganez (Mn), çinko (Zn), fosfor (P) analizleri yapılmıştır. Alınabilir sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum içerikleri amonyum asetat ekstraksiyon yöntemiyle belirlenmiştir (Richards, 1954). Alınabilir demir, bakır, mangan ve çinko DTPA ekstraksiyon yöntemiyle (Lindsay ve Norwell, 1978), bitkilerce alınabilir P içerikleri ise Olsen vd. (1954)'e göre tayin edilmiştir.

3.2.2. İstatistiksel ve Jeostatistiksel Analizler (Statistical and geostatistical analyses)

Çalışmada, toprakların tüm parametrelerin ortalama, en düşük ve en yüksek değerler, gibi tanımlayıcı istatistiksel analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra besin element içeriklerinin çalışma alanında normal dağılım gösterip göstermediğinin belirlenmesi için normalite testi yapılmıştır (Tablo 1) (Liu vd. 2006).



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu ve toprak örneklerinin alındığı noktalar (The geographical location of the study area and the places where soil samples were taken)

Kul (2014)'e göre veri sayısı 30'dan az ise kolmogorov-Smirnov tavsiye edilmemektedir (Anonim, 2024). Bu çalışmada veri sayısı 46 olduğu için Kolmogorov-Smirnov sonuçları değerlendirilmiştir. Tüm istatistiksel analizlerde SPSS (sürüm: 26) istatistik programı kullanılmıştır.

Toprakların element içeriklerinin yersel dağılım modellemesi GS⁺ (sürüm 10.0) paket programı kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla yarivariyogramlar oluşturularak bunların arasından en uygun olanları seçilmiştir. En uygun yarivariyogram modelinin seçiminde; r^2 ve RSS (artık kareler toplamı) değerleri kıstas olarak alınmıştır. Yang vd. (2011)'e göre en uygun modelin r^2 değerinin 1'e ve RSS değerinin 0'a yakın olması gerektiğini belirtmiştir (Budak ve Günel, 2015). Bu çalışmada da bu kural uygulanmıştır.

Besin elementlerinin yersel dağılımlarının belirlenmesi ve haritalanmasında ise coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılmıştır. Bu kapsamda, GS⁺ (sürüm 10) ile belirlenen yarivariyogramların verileri kullanılarak her bir elementin dağılım haritalarının oluşturulmasında ArcGis (sürüm:10.6.1.) programından yararlanılmıştır (Töreay vd. 2010). Bu programda ordinary kriging enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır.

Parametrelerin varyasyon katsayıları Zhou vd. (2010) tarafından, onların değişkenlik düzeylerinin değerlendirmesinde kıstas olarak kullanılmıştır. Zhou vd. (2010)'a göre %10'dan düşük varyasyon katsayısı değişkenlik düzeyinin düşük; %10-100 arasındaki değişkenlik katsayısı orta ve % 100'den büyük değişkenlik düzeyi ise yüksek değişkenlik düzeyini belirtmektedir.

Tablo 1. Besin elementi içeriklerinin normalite test sonuçlarının Kolmogorov-Smirnov'a göre değerlendirilmesi (Evaluation of normality test results of nutrient contents according to Kolmogorov-Smirnov)

Parametre	Kolmogorov-Smirnov	
	İstatistik	P
K	0.164	0.003
Ca	0.121	0.092*
Mg	0.107	0.200*
P	0.194	0.000
Cu	0.433	0.000
Fe	0.164	0.003
Mn	0.083	0.200*
Zn	0.296	0.000
Na	0.217	0.000

* P> 0.05 normal dağılım gösteren veriler, p < 0.05 normal dağılım göstermeyen veriler

Ayrıca besin elementi içeriklerinin mekânsal bağımlılıklarının değerlendirilmesinde nugget varyansın (Co) toplam varyansa (Co+C) olan yüzde oranı kullanılmıştır. Bu değerlendirme Cambardella vd. (1994)'e göre yapılmıştır. Bu oran % 25 veya daha düşük ise özelliklerdeki yersel bağımlılık kuvvetli, % 25-75 arasında ise orta ve % 75'den büyük ise zayıf olarak değerlendirilmektedir.

4. Deneysel Sonuçlar(Experimental Results)

4.1. Element İçerikleri (Nutrient contents)

Toprakların besin elementi içeriklerinin istatistiksel analiz sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur. Toprakların alınabilir K içerikleri 4.2 ile 63.5 mgkg⁻¹ arasında değişiklik göstermiştir (Tablo 2). Alınabilir K içerikleri, FAO (1990)'ün mg kg⁻¹ olarak belirtilen sınır değerleri ile karşılaştırıldığında; K değerlerinin toprakların % 97.8'inde çok az (<50), % 2.2'sinde ise az (50-140) olduğu belirlenmiştir. Taş ve Demir (2022)'in Bingöl ovasında yaptıkları çalışmada toprakların potasyum konsantrasyonlarının 67.0 - 410.05 mg kg⁻¹ arasında değiştiği ve toprakların % 20.6'sının K içeriğinin az, % 76.5'inin yeterli ve % 2.9'unun ise fazla olduğu belirlenmiştir. Yine, Ordu ve Aşık (2021) tarafından Bursa'nın Karacabey ilçesinde mısır tarımı yapılan alanlardaki topraklarda yapılan bir çalışmada; K içeriklerinin 66-616 mg kg⁻¹ arasında ve K içeriğinin toprakların %7.5'inde az, % 92.5'inde yeterli ve fazla düzeyde olduğu saptanmıştır.

Toprakların Ca içeriklerinin 2763.6 ile 11981.3 mg kg⁻¹ arasında olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Everest vd. (2018)'nin yaptıkları çalışmada ise toprakların kalsiyum miktarları çok daha yüksek bulunmuştur. Bu durum büyük olasılıkla toprakların kireç içeriklerinin farklılığından kaynaklanmıştır. Bu çalışmada elde edilen Ca içerikleri, FAO (1990)'ün mg kg⁻¹ olarak ifade edilen sınır değerleri ile karşılaştırıldığında; toprakların % 4.3'ünde Ca içeriğinin yeterli (1150 - 3500) ve % 91.3'ünde fazla (3500 - 10000), % 4.4'ünde ise çok yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Toprakların Mg içeriklerinin 221.6 ile 1215.4 mg kg⁻¹ arasında olduğu görülmüştür (Tablo 2).Topraklarda bitkiye yararlı Mg içerikleri, FAO (1990)'ün mg kg⁻¹ olarak belirtilen sınır değerleri ile kıyaslandığında; toprakların % 34.8'inde yeterli (160-480), % 65.2'inde ise fazla (480-1500) görülmüştür. Kalkancı vd. (2021) tarafından Osmaniye'de yapılan bir çalışmada; Mg içeriklerinin toprakların % 7.8'inde yetersiz; % 26.1'inde orta; % 30.9'unda yüksek ve % 35.1'inde ise çok yüksek düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Araştırma konusu toprakların bazı besin elementi içeriklerinin istatistiksel analiz sonuçları (Statistical analysis results of some nutrient contents)

Parametre	En az	En fazla	Ortalama	SS	VK	Çarpıklık	Yatıklık
	mg kg ⁻¹						
K	4.21	63.52	20.18	9.70	48.07	2.24	8.01
Ca	2763.6	11981.3	7031.1	1588.2	22.59	0.49	3.31
Mg	221.6	1215.4	589.7	223.8	37.95	0.53	-0.07
P	0.09	13.90	4.19	3.91	93.03	0.89	-0.44
Fe	0.86	38.13	7.13	5.85	82.05	3.35	17.12
Cu	0.62	67.56	3.71	9.72	262.00	6.57	44.00
Mn	0.82	15.16	6.72	4.00	59.52	0.43	-0.35
Zn	0.14	18.16	1.77	3.05	172.32	4.03	19.16
Na	30.11	675.36	156.41	143.52	91.76	2.17	4.92

SS: standart sapma, VK: varyasyon katsayısı

Toprakların P içeriklerinin 0.09 ile 13.90 mg kg⁻¹ arasında olduğu saptanmıştır (Tablo 2). Tüm sonuçlar Olsen vd. (1954) tarafından mg kg⁻¹ olarak önerilen sınır değerleri ile kıyaslandığında; P içeriklerinin toprakların % 50.0'inde çok az (<2.5), % 30.4'ünde az (2.5 – 8.0), % 19.6'sında ise yeterli (8.0–25.0) düzeyde olduğu görülmüştür. Özenç ve Yazıcı (2022)'nin Trabzon ili Beşikdüzü ilçesinde yaptıkları çalışmada; toprakların yararlı P içeriklerinin 0.96 – 138.7 mg kg⁻¹ arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca Çalışma alanında P'un toprakların % 11'inde çok az; % 38'inde az; % 32'sinde yeterli; % 14'ünde fazla; % 5'inde ise çok fazla düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Toprakların Fe içeriklerinin 0.86 ile 38.13 mg kg⁻¹ arasında olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Toprakların Fe içerikleri, Lindsay ve Norwell (1978)'in mg kg⁻¹ olarak belirtilen standart değerlerle karşılaştırıldığında; Fe'in toprakların % 28.3'ünde az (<4.5), % 34.5'inde orta (4.5–9.0), % 26.00'ünde yeterli (9.0-18.0), ve % 2.2'sinde çok yüksek (>27.0) düzeyde olduğu saptanmıştır. Peker vd. (2024) tarafından Bafra ovasında yapılan bir çalışmada, toprakların Fe içeriklerinin 10.23-194.69 mg kg⁻¹ arasında değiştiği görülmüştür. Şimşek vd. (2023)'ün yaptıkları bir çalışmada, Kilis'teki zeytin bahçe topraklarının alınabilir Fe içeriklerinin 0.3-1.63 mg kg⁻¹ arasında değiştiğini ve tamamında alınabilir Fe içeriklerinin yeterli düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Çalışma alanı topraklarının alınabilir Cu içeriklerinin 0.62 ile 67.56 mg kg⁻¹ arasında (Tablo 2) olduğu belirlenmiştir. Lindsay ve Norwell (1978)'in mg kg⁻¹ olarak belirlediği sınır değerlere göre, toprakların % 2.2'sinde Cu'nun yeterli (0.4 – 0.8), % 30.4'ünde yüksek (0.8–1.6) ve % 67.4'ünde çok yüksek (>1.6) olduğu saptanmıştır. Karadeniz ve Özkutlu (2023) tarafından Ordu-Kumru yöresinde yapılan bir çalışmada; topraklardaki yayışlı Cu içeriklerinin 0.0 - 4.45 mg kg⁻¹ arasında değiştiği ve Cu'nun toprakların % 38'inde yeterli; % 62'sinde ise fazla miktarda olduğu tespit edilmiştir.

Toprakların Mn içeriklerinin 0.82 ile 15.16 mg kg⁻¹ arasında, tüm alanın ortalama Mn içeriğinin ise 6.72 mg kg⁻¹ olduğu görülmüştür (Tablo 2). Lindsay ve Norwell (1978)'in mg kg⁻¹ olarak önerdiği sınır değerlere göre; Mn içeriğinin toprakların % 17.4'ünde az (<2.5), % 10.8'inde orta (2.5-3.5), % 28.3'ünde yeterli (3.5-7.0), % 43.4'ünde ise yüksek düzeyde (>7.0) olduğu belirlenmiştir. Özden vd. (2020)'nin yaptığı bir çalışmada, alınabilir Mn içeriğinin 2.20-299.60 mg kg⁻¹ arasında değiştiği ve toprakların % 96.61'inde Mn'in yüksek olduğu saptanmıştır. Ağca ve Coşar (2023) tarafından Erzincan ovası (Hatay) topraklarında alınabilir Mn içerikleri 0.34 - 5.67 mg kg⁻¹ arasında bulunmuş ve Mn miktarının toprakların % 65.96'sında az; % 23.40'ında orta; % 10.64'ünde ise yeterli düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Toprakların alınabilir Zn içeriklerinin 2.3 ile 22.7 mg kg⁻¹ olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Toprakların Zn içerikleri, Lindsay ve Norwell (1978)'in mg kg⁻¹ olarak belirlediği sınır değerlerle kıyaslandığında; toprakların % 36.9'unda Zn'nun az (>0.6), % 28.4'ünde orta (0.6-1.2), % 19.5'inde yeterli (1.2–2.4), % 15.2'inde ise yüksek (>2.4) düzeyde olduğu görülmüştür. Ordu ve Aşık (2021) tarafından Bursa Karacabey'deki topraklarda alınabilir Zn içeriklerinin 0.40 mg kg⁻¹ ile 3.05 mg kg⁻¹ arasında değiştiği ve toprakların %2.5'nin çok az, %10'nun az, %82.5 'nin orta ve %2.5 'nin fazla ve % 2.5 'nin ise çok fazla düzeyde alınabilir çinko içerdikleri belirlenmiştir.

Toprakların Na içeriklerinin 30.1 ile 675.4 mg kg⁻¹ arasında değiştiği görülmektedir (Tablo 2). Peker vd. (2024) tarafından Bafra ovasındaki örnek mera alanlarında yapılan bir çalışmada topraklardaki Na içerikleri 78.2-4080.2 mg kg⁻¹ arasında değişmiştir. Yine Ağca ve Coşar (2023) tarafından Erzincan ovası topraklarında yapılan bir çalışmada, toprakların Na içeriklerinin 28.64–31.77 mg kg⁻¹ arasında değiştiği bulunmuştur. Günel vd. (2020) tarafından Orta Karadeniz Bölgesi tütün ekim alanlarında yapılan çalışmada ise topraklardaki Na içerikleri 8.80–4145.58 mg kg⁻¹ arasında değişmiştir.

Besin element içeriklerinin varyasyon katsayıları % 22.59 (P) ile %262 (Cu) arasında değişmiştir. Varyasyon katsayılarına göre; Cu ve Zn yüksek düzeyde, diğer elementler ise orta düzeyde yersel bağımlılık göstermiştir. Bu durum; çalışma alanında P'un en homojen, Cu'nun ise en heterojen dağılım gösterdiğini belirtmektedir.

4.2. Besin Elementlerinin Mekânsal Dağılımları (Spatial Distribution of Nutrient Contents)

Çalışma alanındaki toprakların Ca, Mg ve Mn içeriklerinin yatıklık değerlerinin düşük (0.43-0.53 arası) olması nedeniyle, bu veri setlerine jeostatistiksel modellemelerden önce herhangi bir dönüşüm uygulanmamıştır. Buna karşın yatıklık değerlerinin yüksek (0.89-4.03 arası) olmaları nedeniyle Na, K, Cu, Fe ve Zn değerlerine logaritmik, P içeriklerine ise karekök dönüşüm uygulandıktan sonra jeostatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır.

Tüm besin elementleri için uygun yarıvaryogram modelini belirlemek amacıyla, aktif ayırma mesafesi 6715 m olarak alınmıştır. Yine en uygun yarıvaryogram modelini oluşturmak için ayırma mesafeleri ise en yüksek r² değerlerini verecek şekilde, 444 m ile 463 m arasında alınmıştır. Toprakların besin element içeriklerine ait yarıvaryogram parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Besin elementlerinin yarivariyogram parametreleri (Semivariogram parameters of nutrient contents)

Parametre	Model	A ₀ (m)	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Nugget/Sill *100	r ²
K	Guassian	17820	0.120	1.217	9.86	0.474
Ca	Guassian	510	1000	191500	0.50	0.520
Mg	Küresel	4910	24500	60780	40.30	0.648
P	Üssel	21100	0.524	2.367	22.14	0.506
Cu	Guassian	680	0.0001	0.232	0.04	0.620
Fe	Guassian	3590	0.466	0.933	49.94	0.591
Mn	Pure nugget					
Zn	Üssel	21100	0.634	2.036	31.14	0.406
Na	Üssel	3430	0.028	0.850	3.29	0.884

En uygun yarivariyogram modeli K, Ca, Cu ve Fe için Guassian; Na, P ve Zn için Exponential (üssel); Mg için ise Spherical (küresel) olarak saptanmıştır (Tablo 3). Çalışma alanındaki toprakların Mn içerikleri arasında ise yapısal bir varyans tanımlanamamış ve örneklerin ölçüm değerlerinin aralarındaki mesafeden bağımsız olduğu ve varyansın tesadüfi değerler ürettiği (Purenugget) tespit edilmiştir. Sarı vd. (2019) İğdir Üniversitesi topraklarında yaptıkları çalışmada, en uygun yarivariyogram modeli Na, K ve Mg için Spherical, Ca için ise Gaussian olarak belirlemişlerdir. Ağca ve Coşar (2023) tarafından Erzincan (Hatay) ovası topraklarında en uygun yarivariyogram modeli Na, P, Fe, Cu ve Mn için Üssel (Exponential); K için Küresel; Ca, Mg ve Zn için ise Gaussian olarak belirlenmiştir.

Örnekleme noktaları arasında yersel bağımlılığın olduğu maksimum uzaklık (A₀) değerleri ise 510 m (Ca) ve 21100 m (P) arasında değişmiştir. Besin elementlerinin yersel bağımlılık düzeyleri Na, K, Ca, P ve Cu için kuvvetli, Mg, Fe ve Zn için ise orta olarak belirlenmiştir. Ağca ve Coşar (2023) tarafından Erzincan (Hatay) ovası topraklarında yersel bağımlılık düzeyi Na, K, Ca, P ve Mn için kuvvetli; Mg, Fe, Cu ve Zn için ise orta düzeyde bulunmuştur. Sarı vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, dört besin elementi için (Na, K, Ca ve Mg) de yersel bağımlılığın yüksek düzeyde olduğu saptanmıştır.

4.3. Besin Element İçeriklerinin Mekânsal Dağılımlarının Haritalanması (Mapping of Spatial Distributions of Nutrient Contents)

Araştırma alanındaki toprakların tüm besin element içeriklerine blok kriging interpolasyon yöntemi uygulanarak yersel değişim haritaları oluşturulmuştur (Şekil 2). Topraklardaki K içeriği alanın güneybatı kesiminde düşük düzeyde olup, orta ve kuzey kesimlere doğru artmaktadır. En fazla karşılaşılan K değerleri 10-20 mg kg⁻¹ arasındadır (Şekil 2a). Ca içerikleri alanın güney ve orta kesimlerinde yeterli, kuzey ve kuzeydoğu kesimlerinde ise fazla düzeydedir. En fazla rastlanan Ca konsantrasyonları 3500-7000 mg kg⁻¹ arasındadır (Şekil 2b). Toprakların Mg içerikleri alanın orta kesimlerinde yeterli; güney, güneybatı ve kuzeydoğu kesimlerinde ise fazla düzeydedir. En fazla yaygın olan Mg içerikleri 480-1500 mg kg⁻¹ arasında bulunmaktadır (Şekil 2c).

Çalışma alanının kuzey ve kuzeydoğu kesimlerindeki toprakların P içeriği çok az; güney, güneybatı ve orta kesimlerinde az; güneybatı kesimindeki küçük bir bölümde ise yeterli düzeydedir. En yaygın olarak karşılaşılan P içerikleri 2.5-8.0 mg kg⁻¹ arasındadır (Şekil 2d).

Toprakların Fe içerikleri alanın orta kesimlerinde yetersiz; güney bölümü ve orta kesimin bir bölümünde yeterli; güneybatı ile kuzeydoğu kesimleri ile orta kısmın bir bölümünde orta düzeydedir (Şekil 2e).

Topraklardaki Cu konsantrasyonu çalışma alanının kuzeydoğusundaki çok küçük bir alanda orta; kuzey kesimindeki çok küçük bir alanda yeterli ve fazla düzeyde; alanın geri kalan büyük bir bölümünde ise çok fazla düzeydedir. En fazla karşılaşılan Cu içerikleri 1.6 mg kg⁻¹'den büyüktür (Şekil 2f).

Toprakların Mn içeriği çalışma alanının orta ve kuzeydoğu kesimlerinde çok küçük birkaç alanda yetersiz; orta ve kuzeydoğu kesimlerinin büyük bir bölümünde yeterli; güneybatı ve kuzey kesimleri ile kuzeydoğu kesiminin bir bölümünde ise fazla düzeydedir. En fazla karşılaşılan Mn içerikleri ise 3.5-7.0 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır (Şekil 2g). Çalışma alanının kuzeydoğu kesimlerindeki toprakların Zn içeriği yetersiz (az); orta ve kuzey kesimler ile güneybatının küçük bir bölümünde orta, güney ve orta kesimlerde yeterli; güneydoğu kısmının bir bölümünde ise yüksek düzeydedir. En yaygın olan Zn konsantrasyonları 0.6-1.2 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Şekil 2h). Toprakların Na içerikleri alanın güneybatı kesimlerinde düşük olup, kuzeydoğu kesimlerine doğru artmaktadır. Alanda en fazla karşılaşılan Na içerikleri 100-250 mg kg⁻¹'dir (Şekil 2i).

5. Sonuçlar (Results)

Arsuz ovası, 21. 01. 2017 tarihli resmi gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren 2016/9620 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile büyük ova koruma alanı olarak ilan edilmiştir. Bu çalışmada, Arsuz ovası topraklarının makro ve mikro besin elementlerinin yeterlilik durumları belirlenmiş ve bu element içeriklerinin çalışma alanındaki dağılım haritaları oluşturulmuştur.

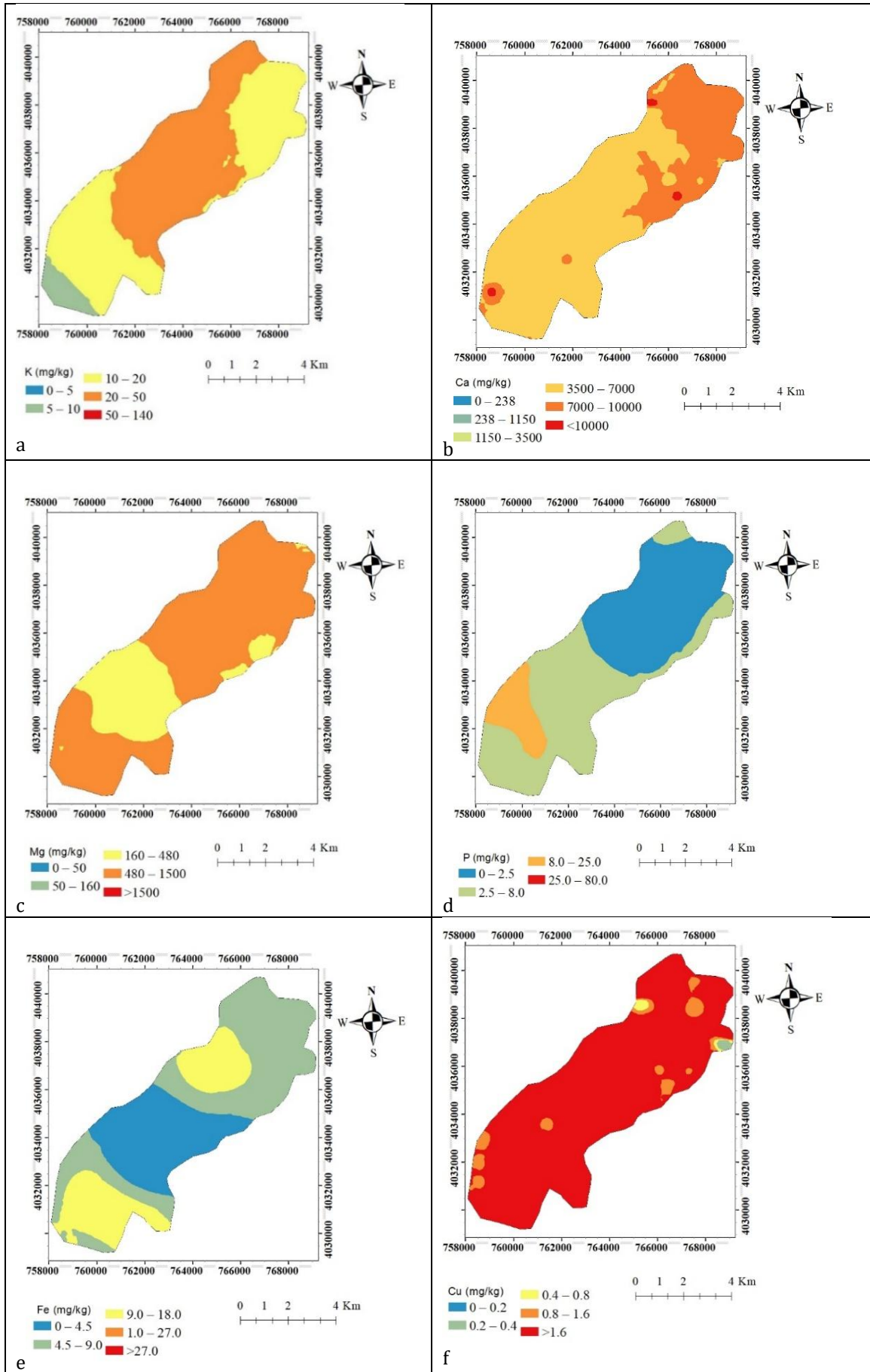
Toprakların tamamına yakın kısmında K içerikleri yetersiz, Ca ve Mg içerikleri ise yeterli ve fazla düzeydedir. Toprakların P içerikleri ise alanın % 80'inde yetersiz düzeydedir. Mikro elementlerden Cu içeriği tüm alanda yeterli, Fe ve Mn içerikleri alanın 2/3'ünde yetersiz, Zn içerikleri işe alanın % 72'lik bir kısmında yeterli düzeydedir.

Topraklarda Ca ve Mg içeriğinin yüksek olması büyük olasılıkla kireç içeriklerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi Ca ve Mg kirecin ana yapı taşlarındandır. Kirecin kaynağı ise yine büyük olasılıkla ovanın çevresinde bulunan ve kireçtaşı içeren tortul kayalardan kaynaklanmıştır. Çalışma alanında herhangi bir Ca ve Mg'lu gübre uygulamaya gerek bulunmamaktadır.

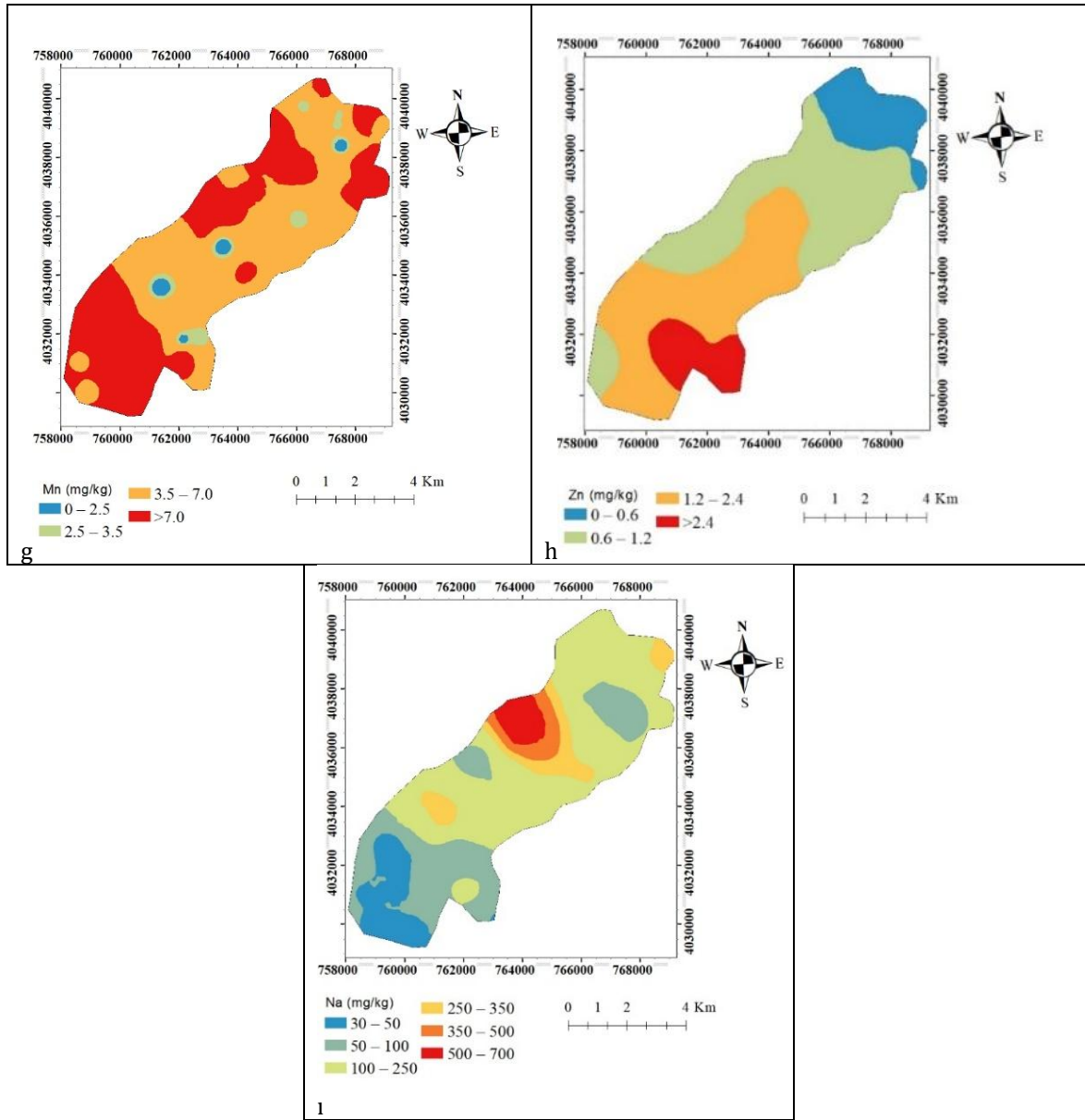
Çalışma alanının hemen hemen tamamına potasyumlu ve fosforlu gübre uygulanması gerekir. Ancak uygulanacak dozlar daha detaylı çalışmalar ile belirlenmelidir. Mikro elementlerden ise Fe ve Mn içeren sıvı gübreler uygulanmalıdır.

Örnekleme noktalarının birbirleri ile ilişkili olabileceği maksimum uzaklığı gösteren A_0 değerleri 510-21100 m gibi geniş sınırlar içinde değişmektedir. Bu değer Ca ve Cu için oldukça düşük iken (510 ve 680 m), P ve Zn için oldukça yüksektir (21100 m). Bundan sonra bölgede yapılacak bu tür çalışmalarda örnekleme aralıkları belirlenirken A_0 değerleri de dikkate alınmalıdır. Örnekleme aralıkları ya en küçük değerlere göre belirlenmeli ya da A_0 değerlerine göre iki veya üç farklı örnekleme aralıkları kullanılmalıdır.

Bu çalışma sonuçları, alanda daha sonra yapılacak olan gübreleme ile ilgili çalışmalar için önemli veriler sunmaktadır. Ayrıca, bu sonuçlar ulusal toprak veri tabanına önemli katkılar sağlayacaktır.



Şekil 2. Besin element içeriklerinin mekânsal dağılım haritaları (Spatial distribution maps of nutrient contents)



Şekil 2. (devamı) Besin element içeriklerinin yersel dağılım haritaları (Spatial distribution maps of nutrient contents)

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından maddi olarak desteklenmiştir (Proje No: 19. YL. 04). Yazarlar destekleri nedeniyle BAP koordinatörlüğüne teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar(References)

- Ağca, N., Coşar, M.S., 2023. Jeostatistik ve Coğrafi Bilgi Sistem (CBS) Teknikleri Kullanılarak Erzin Ovası (Hatay) Topraklarının Bazı Besin Element İçeriklerinin Yersel Değişimlerinin Haritalanması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(4), 1439-1451.
- Ağca, N., Aşkıner, E. D., 2024. Dörtüyl Ovası Topraklarında Bazı Besin Element İçeriklerinin Yersel Dağılımının Belirlenmesi. MAS Mesleki Bilimler Dergisi. 9 (2), 331-346.
- Ajayı, A.A., Okonokhu, B.O., 2024. Spatial Variability of Soil Chemical Properties of an Undulating Site within a University Farm at Okha, near Benin City in Nigeria. J. Appl. Sci. Environ. Manage, 28 (7), 2241-2248.

- Anonim, 1982. M. Erendil (1980), M. Erendil (1981), H. Selçuk (1978). O. Tekeli (1981), M. Erendil (1982), 1/100.000 Ölçekli Sayısal Jeoloji Haritası Adana P35 Paftası. Türkiye Jeoloji Veri Tabanı, Jeoloji Etüdüleri Dairesi Başkanlığı, Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anonim, 2016. Rakamlarla Hatay Tarım Kimliği. Hatay Valiliği İl Gıda Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü.
- Anonim, 2017. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Arsuz İlçe Müdürlüğü verileri.
- Anonim, 2019. Hatay ili iklim verileri. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=> (Erişim tarihi: 29.01.2019).
- Anonim, 2024. Normallik testleri-Spss-Cengiz Ölmez. <https://cengizolmez.com/normallik-testleri-spss/> (Erişim tarihi: 8 Haziran 2024).
- Bhunia, G.S., Shit, P.K., Rabindranath Chattopadhyay R., 2018. Assessment of Spatial Variability Of Soil Properties Using Geostatistical Approach of Lateritic Soil (West Bengal, India). *Annals of Agrarian Science*, 16, 436–443.
- Budak, M., Günel, H., 2015. Tuzlu-Alkali Topraklarda Bor Konsantrasyonunun Uzaysal Değişkenliğinin Jeostatistiksel Analizi ve Haritalanması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 52 (2), 191-200.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Novak, J. M., Turco, R. F., 1994. Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1501– 1511.
- Çelik, P., Dengiz, O., 2018. Akselendi Ovası Tarım Topraklarının Temel Özellikleri ve Bitki Besin Elementi Durumlarının Belirlenmesi ve Dağılım Haritalarının Oluşturulması. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 5 (1), 9-18.
- Everest, T., Özcan, H., 2018. Toprak verimliliğinin değerlendirilmesinde pedo-jeolojik yaklaşım. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 5(4), 589-603.
- FAO, 1990. Micronutrient Assessment at the Country Level. An international Study (M. Sillanpää, Editör). FAO Soils Bulletin 63. Published by FAO. 128 p. Roma, Italy.
- Günel, E., Acir, N., Günel, H., 2020. Orta Karadeniz Bölgesinde Tütün Ekim alanlarının Karbon Depolama Potansiyeli ve Bitki Beslenme Durumlarının Mesafeye Bağlı Değişkenliği. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 6 (2), 68-81.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, NY.
- Kalkancı, N., Şimşek, T., Aslan, N., Büyük, G., 2021. Tarım Topraklarının Verimlilik Durumlarının Tematik Düzeyde Haritalanarak Sürdürülebilir Yönetiminin Sağlanması: Osmaniye Örneği. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 24 (4), 859-870.
- Karadeniz, U., Özkutlu, F., 2023. Ordu-Kumru Yöresi Fındık Bahçelerinin Toprak Verimlilik Durumlarının Belirlenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 12 (Özel Sayı), 185-192.
- Kulaç, S., 2024. Fındık yetiştiriciliği yapılan su altında kalmış bir alanda toprak verimliliğinin jeostatistiksel tekniklerle değerlendirilmesi. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Bilimi Ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Doktora Tezi. Ordu.
- Liu, D., Wang, Z., Zhang, B., Song, K., Li, X., Li, J., Li, F., Duan, H., 2006. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, northeast China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, 73-81.
- Ordu, D., Aşık, B.B., 2021. Mısır Tarımı Yapılan Toprakların Verimlilik Durumu (Yolağzı Bölgesi-Karacabey/ Bursa Örneği). *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 35(1), 145 - 161.
- Özenç, D.B., Yazıcı, Ş., 2022. Trabzon İli Beşikdüzü İlçesinde Farklı Arazi Kullanımı Altındaki Toprakların Özellikleri ve Verimlilik Durumunun Belirlenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 11(2), 341-352.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Sci Soc Am J.*, 42, 421–428.
- Olsen, S.R., Cole, V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soil by Extraction Sodium Bicarbonate. Washington, USDA.
- Özden, N., Uslu, İ., Sökmen, Ö., Metinoğlu, F., 2020. İzmir İli Tarım Topraklarının Verimlilik Durumları ile Mikroelement Kapsamlarının Belirlenerek Haritalanması, *Toprak Su Dergisi*, Özel Sayı, 31- 40.
- Peker, A.E., Dengiz, O., Birol, M., 2024. Bafra Ovası Örnek Mera Alanlarının Bazı Fiziksel Kalite İndeksleri ve Konumsal Dağılımları. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 11 (1), 58-70.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agriculture Handbook. No: 60.
- Sarı, S., Aksakal, E.L., Öztaş, T., 2019. Iğdır Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi Deneme Alanı Toprak Özelliklerinin Yersel Değişim Paternlerinin Jeostatistiksel Yöntemlerle Belirlenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4), 2346-2363.
- Sikarwar, A., Shukla, V., Bhardwaj, S., Prajapati, R., Mishra, R., Sikaniya, Y., Nagwanshi, A., 2023. Spatial Variability of Soil Micronutrient Properties Using Geostatistical Approach and Geographic Information System Technique. *International Journal of Plant & Soil Science*, 5 (22), 908-922.
- Şimşek, T., Kalkancı, N., Kösetürkmen, S., Büyük, G., Aslan, N., 2023. Kilis İlindeki Zeytinlik Alanları İçin Toprak Kalitesinin Değerlendirilmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 28 (1), 211-221.
- Taş, R., Demir, Y., 2022. Bingöl Ovası Tarım Topraklarının Verimlilik Düzeyi ile Bazı Ağır Metal İçeriklerinin Belirlenmesi ve Haritalanması. *D.Ü Ormanlık Dergisi*, 18 (2), 296-315.
- Tercan, A.E. ve Saraç, C. 1998. Maden yataklarının değerlendirilmesinde Jeostatistiksel Yöntemler. *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları no:48. s: 137. Ankara.*
- Töreay, G., Özdemir, İ., Kurt, T., 2010. ArcGIS 10 Desktop Uygulama Dokümanı. İşlem Coğrafi Bilgi Sistemleri Mühendislik ve Eğitim Ltd. Şti. 208 S. Ankara.
- TÜİK, 2023. Türkiye Tarım İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1> (Erişim tarihi: 21.06.2023)
- Webster, R., Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Zhou, H.H., Chen, Y.N., Li, W.H., 2010. Soil properties and their spatial pattern in an oasis on the lower reaches of the Tarim River, northwest China. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1915-1922.



RESNET-34 DERİN ÖĞRENME ALGORİTMASI İLE DEPREM SONRASI YIKILAN YAPILARIN TESPİTİ: 6 ŞUBAT 2023 DEPREMİ, ANTAKYA ÖRNEĞİ

Firdevs GÜZEL^{1*}, Gülcan SARP¹, Kadir TEMURÇİN¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Isparta, Türkiye.

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Derin Öğrenme, Hasar Tespiti, Deprem, Pleiades-1B, Antakya.</i>	Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminin etkilediği Hatay ilinin Antakya ve Defne ilçelerinde ResNET-34 derin öğrenme algoritmasını kullanarak deprem sırasında yıkılan ve yıkılmayan yapıların tespit edilmesini incelemiştir. Çalışmada, Pleiades-1B uydu görüntüleri ve OpenStreetMap verileri kullanılarak yapıların hasar durumları analiz edilmiştir. Derin öğrenme algoritması olarak ResNET-34 mimarisi, bu verilerle eğitilmiş ve %85 doğruluk ve %91 F1 skoru elde edilmiştir. Bu yüksek doğruluk oranı, derin öğrenme yöntemlerinin afet sonrası yapı hasar tespitinde ne denli etkili bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmanın bulguları, derin öğrenme tekniklerinin afet sonrası hasar analizi ve yapı güvenliği değerlendirmelerinde etkin bir araç olarak kullanılabilmesini göstermiştir. Ayrıca çalışma, derin öğrenme tekniklerinin afet yönetimi ve şehir planlaması süreçlerinde etkili bir rol oynayabileceğine dair değerli bilgiler sunmuştur.

DETECTION OF COLLAPSED STRUCTURES AFTER EARTHQUAKE WITH RESNET-34 DEEP LEARNING ALGORITHM: 6 FEBRUARY 2023 EARTHQUAKE, ANTAKYA CASE

Keywords	Abstract
<i>Deep Learning, Damage Assessment, Earthquake, Pleiades-1B, Antakya.</i>	This study examined the detection of collapsed and non-collapsed structures during the earthquake in the Antakya and Defne districts of Hatay province, affected by the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquake, using the ResNET-34 deep learning algorithm. The damage status of the buildings was analyzed using Pleiades-1B satellite images and OpenStreetMap data. The ResNET-34 architecture was trained with these data as a deep learning algorithm and achieved an accuracy of 85% and an F1 score of 91%. This high accuracy rate demonstrated how effective deep learning methods can be as a tool for post-disaster building damage assessment. The findings of the study showed that deep learning techniques can be used as an effective tool in post-disaster damage analysis and building safety assessments. Furthermore, the study provided valuable insights into how deep learning techniques can play an effective role in disaster management and urban planning processes.

Alıntı / Cite

Güzel, F., Sarp, G., Temurçin, K., (2025). ResNET-34 Derin Öğrenme Algoritması ile Deprem Sonrası Yıkılan Yapıların Tespiti: 6 Şubat 2023 Depremi, Antakya Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 49-63.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
F. Güzel / 0000-0002-3502-4745	Başvuru Tarihi / Submission Date 19.08.2024
G. Sarp / 0000-0002-5021-4918	Revizyon Tarihi / Revision Date 19.11.2024
K. Temurçin / 0000-0002-8726-3756	Kabul Tarihi / Accepted Date 27.11.2024
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: firdevsguzel3@gmail.com, +90-246-211-4332

DETECTION OF COLLAPSED STRUCTURES AFTER EARTHQUAKE WITH RESNET-34 DEEP LEARNING ALGORITHM: 6 FEBRUARY 2023 EARTHQUAKE, ANTAKYA CASE

Firdevs GÜZEL^{1†}, Gülcan SARP¹, Kadir TEMURÇİN¹

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Humanities and Social Sciences, Department of Geography, Isparta, Türkiye.

Highlights

- Deep learning algorithms have been used in different areas of the scientific world with increasing momentum since the 2010s.
- Detection of earthquake damage in remotely sensed images with deep learning algorithms.
- The 2023 earthquakes that occurred in Turkey and affected 11 provinces caused many losses of life and property in Antakya.
- In the study, collapsed buildings in the Hatay-Antakya region, one of the regions most affected by the earthquake, were detected with high accuracy using deep learning algorithms.

Purpose and Scope

Türkiye is home to a geography that experiences constant earthquakes due to its active tectonics. The Kahramanmaraş earthquake, which occurred on February 6, 2023 and affected a wide area, caused many casualties and property losses. This article aims to classify collapsed and non-collapsed buildings on remote sensing images with high accuracy using the ResNET-34 deep learning architecture.

Design/methodology/approach

The method applied in the study consists of three stages. The first stage involves the acquisition and pre-processing of data required for the application of the method. For this purpose, the Pleiades-1B satellite image to be used in the study was obtained from Istanbul Technical University Satellite Communications and Remote Sensing Application and Research Center (ITU-CSCRS), and geometric and radiometric corrections were made to the satellite image. Building footprints were obtained from the OpenStreetMap website. Building databases were updated by comparing satellite imagery with OpenStreetMap. Finally, lithology data were digitised from the 1:100,000 scale DAF Atlas (Herece, 2008). In the second phase of the study, the collapsed and undestroyed buildings in the study area were classified using the ResNET-34 deep learning architecture on the basis of the preprocessed satellite images and the building footprints. In the third stage, the accuracy of the findings obtained with the ResNET-34 deep learning architecture was investigated and the results were evaluated in relation to lithological units.

Findings

In this study, in a selected sample area in Antakya and Defne districts of Hatay province affected by the Kahramanmaraş earthquake on 6 February 2023, building damage detection from PLAIDES satellite images was determined with 85% accuracy and 91% F1 score rate using ResNET-34 deep learning algorithm. The analysis results showed that ResNET-34 deep learning algorithm effectively determined damage detection from high-resolution satellite images in post-disaster damage detection. The high accuracy rate of the model supports that deep learning techniques can be used as an effective tool in post-disaster damage detection and building safety assessment. The study results showed that soil properties and construction should be considered in an integrated manner to increase the resilience of structures to earthquake risk. The analysis results showed that the collapsed buildings were largely concentrated in alluvial formations, and there was significant damage especially in the alluvial fan (Qha) and Asi River alluvium. These findings clearly demonstrated the negative impact of loose soils on the resilience of buildings.

Originality

The proposed novelty of the study is that it can detect collapsed buildings with high accuracy using deep learning techniques. This high accuracy of deep learning algorithms can be achieved by performing relevant analyses in a relatively short time. This high accuracy and speed eliminates post-disaster confusion about the priority and areas of aid to earthquake victims and provides great convenience to the authorities.

[†] Corresponding author: firdevsguzel3@gmail.com, +90-246-211-4332

1. Giriş (Introduction)

Türkiye, tektonik olarak aktif bir bölgede konumlanmakta olup, Arap Levhası ile Anadolu Levhası arasındaki etkileşim sonucu özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde sık sık büyük ölçekli depremler meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra, Batı Anadolu'da Ege Denizi'ne doğru uzanan faylar nedeniyle de bu bölgede önemli depremler yaşanmaktadır. Tüm bu faktörler, Türkiye'nin depremsellik açısından dikkatle incelenmesi gereken bir ülke olmasına neden olmaktadır. Ülkemizde yaşanan son büyük depremlere örnek olarak, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (KRDAE) verilerine göre, 6 Şubat 2023 tarihinde yaklaşık 9 saat arayla gerçekleşen iki büyük deprem gösterilebilir. Bu depremlerin ilki, saat 01:17:32'de meydana gelen ve merkez üssü Yamacoba-Şehitkamil (Gaziantep) olan Mw 7.7 büyüklüğündeki depremdir. İkinci büyük deprem ise saat 10:24:47'de Mw 7.6 büyüklüğünde gerçekleşmiş olup, merkez üssü Ekinözü (Kahramanmaraş)'dür. (KRDAE: <http://www.koeri.boun.edu.tr/scripts/lst4.asp>). Yaşanan depremler, merkez üssü ve çevresindeki 11 ilde (Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elâzığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa) hissedilmiş, bu depremlerde 50 binden fazla insan hayatını kaybetmiş, binlerce yapı deprem anında yıkılmış, hasar görmüş ya da kullanılamaz hale gelmiştir.

Sismik aktivitelerin öngörülemezliği ve yıkıcı etkileri nedeniyle insan yaşamı üzerinde ciddi bir tehdit oluşturan depremler, sonrasında meydana gelen hasarın boyutu genellikle saha çalışmalarıyla değerlendirilmektedir (Ge vd., 2023; Jia ve Ye, 2023). Bu durum, büyük miktarda kaynak ve zaman gerektirdiğinden, doğal afetin etkilediği bölgelerde istenilen miktar ve hızda yardım ulaştırılmasını engelleyebilmektedir (Li ve Tang, 2020; Ma vd. 2020). Ancak, günümüzde Uzaktan Algılama (UA) görüntülerinin erişilebilirliği ve sayısal görüntü işleme teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde, uydu görüntülerinden elde edilen yüksek mekânsal çözünürlüklü bilgiler aracılığıyla saha çalışmaları önemli ölçüde kolaylaştırılmıştır. Özellikle deprem sonrasında ve erişilmesi zor alanlarda UA teknolojilerinin kullanımı, önemli hale gelmiş ve uzaktan algılama verilerinin analizi ile bina hasarı hakkında doğru bilgiler elde edebileceğini kanıtlamıştır (Sarp vd., 2014; Menderes vd., 2015 He vd., 2016). Son yıllarda yapılan çalışmalar, UA'nın makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi hızlı ve etkili tekniklerle desteklendiğinde, doğal afete ilişkin hasar ve etki boyutunun araştırılmasında saha çalışmalarından daha verimli sonuçlar verdiğini göstermiştir (Irwansyah vd., 2023). Özellikle, derin öğrenme tekniklerinin gelişimi ve bu teknolojinin yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleriyle entegre bir şekilde kullanılması, doğal afetlerin etkilerini değerlendirmede ve hasar tespitinde önemli yenilikler sunmakta, büyük veri setlerinden karmaşık ilişkileri öğrenip hızlı ve doğru sınıflandırma yeteneği sayesinde afet sonrası yapı hasarlarını ve yıkım düzeylerini değerlendirme potansiyelini artırmaktadır.

Derin öğrenme, geleneksel görüntü işleme yöntemlerine kıyasla üstün performans sergileyebilen, hızla gelişen bir teknolojidir (Krizhevsky vd., 2012). Bu alandaki literatür, derin öğrenme algoritmalarının doğal afetler sonrası yıkılan binaların tespiti, sınıflandırılması ve segmentasyonu konularında etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Örneğin, Moya vd. (2018), 2011 yılında gerçekleşen Doğu Japonya depreminde yıkılan binaları tespit etmek amacıyla bir denetimsiz lojistik regresyon yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem, çöken binaların sayısını ve konumlarını %80'in üzerinde bir genel doğrulukla hızlı bir şekilde tahmin etmiştir. Benzer şekilde, Ci vd. (2019), 2014 Ludian depreminden elde edilen hava görüntülerini kullanarak Object Recognition (OR) ile birlikte Convolutional Neural Network (Evrişimli Sinir Ağı (CNN)) uygulamış ve %77,39 genel doğruluk elde etmişlerdir. Ma vd. (2019), daha etkili algılama sonuçları elde etmek için YOLOv3 algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmalarında Qinghai Eyaleti Yushu Tibet Özerk İl'inde 7.1 büyüklüğündeki deprem sonrası ve 2008 Wenchuan depreminden sonra Beichuan İlçesi'nden elde edilen UA görüntülerini analiz etmiş ve çöken binaların yüksek doğrulukla tespitini başarmışlardır. Moradi vd. (2020), Haiti'nin Very High Resolution (VHR) uydu görüntülerini ve U-Net konvolüsyon ağını kullanarak bina hasarını %68,71 genel doğrulukla belirlemiştir. Ji vd. (2020), 2010 Haiti depreminin öncesi ve sonrasına ait görüntülerle eğitilmiş bir Visual Geometry Group Network (VGGNet) modeli kullanarak %85,19 genel doğruluk ve %67,14 Kappa değeri elde etmişlerdir. Rashidian vd. (2021), xView veri seti ve değiştirilmiş bir U-Net kullanarak yıkılan binaları %76 ve sağlam binaları %95 doğrulukla tespit etmiş, ayrıca Google Earth görüntüleriyle Pueblo depremine dair bağımsız veri seti üzerindeki ağın performansını test etmişlerdir. Ge vd. (2023), 2010 Yushu ve 2023 Türkiye depremlerinde kendi kendini 6 saat içinde eğitebilen ve Kappa katsayısını %6,4 artıran bir model önermişlerdir. Hacıfendioğlu vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, Türkiye'nin güney ve güneydoğusunda kullanılan uydu görüntüleri üzerinde U-Net, LinkNet, Feature Pyramid Network (FPN) ve Pyramid Scene Parsing Network (PSPNet) mimarileri kullanılarak yıkılmış binalar üzerinde derin öğrenme algoritmaları ile görüntü segmentasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tüm mimarilerin %96 oranında doğruluğa ulaştığını göstermiştir. Bu bulgular, derin öğrenmenin deprem kaynaklı bina hasarının değerlendirilmesinde önemli bir araç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremden en çok etkilenen iller arasında yer alan Hatay'ın, Antakya ve Defne ilçelerinde yıkımın yoğun olarak yaşandığı bir alanda derin öğrenme algoritmasını test etmek üzere çalışma alanı olarak seçilmiştir. Seçilen alanda yıkılan ve yıkılmayan binaların sınıflandırılması için derin öğrenme mimarisi ResNET-34 kullanılarak bu mimarinin etkinliği araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan bina ayak izleri OpenSteeMap'den elde edilmiş ve sınıflandırma için 0,5 metre çözünürlüklü Pleiades 1B uydu görüntüleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yıkılan ve yıkılmayan yapıların tespitinde uygulanan yöntemin genel doğruluğu % 85 ve F1 Skor değeri %91 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bu doğruluk değerleri, uygulanan yöntemin büyük ölçekli afetler sonrası hasar tespitindeki önemini göstermiştir.

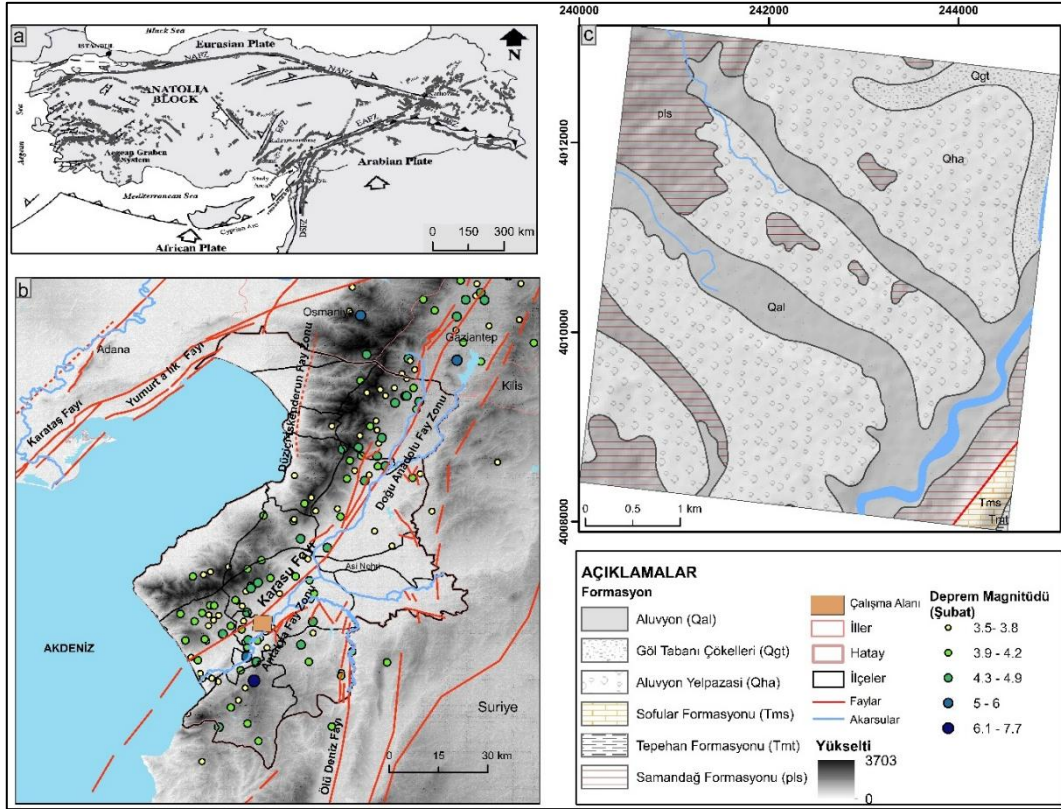
2. Çalışma Alanı (Study Area)

Hatay ili, Akdeniz Bölgesi'nin Adana Bölümü'nün doğusunda konumlanmıştır. Hatay'ın merkez ilçesi ve il nüfusunun yoğun olduğu önemli bir şehir olan Antakya, ülkemizin önemli ovalarından biri olan Amik Ovası üzerinde, Asi Nehri'nin kenarında yer almaktadır. Şehir, jeomorfolojik olarak Asi Nehri'nin doğusunda, Habibi-Neccar Dağı'nın yamacında kurulmuş, daha sonra ise düz alanlara doğru genişlemiştir. Defne ilçesi ise fiziki yapısı itibarıyla Amanos Dağları ve Kuseyr Platosu ile çevrili çöküntü ovasının güneybatısında yer almaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, Defne; Antakya ve İskenderun'dan sonra, il nüfusunun toplandığı üçüncü büyük yerleşim merkezidir (TÜİK: <https://data.tuik.gov.tr/>).

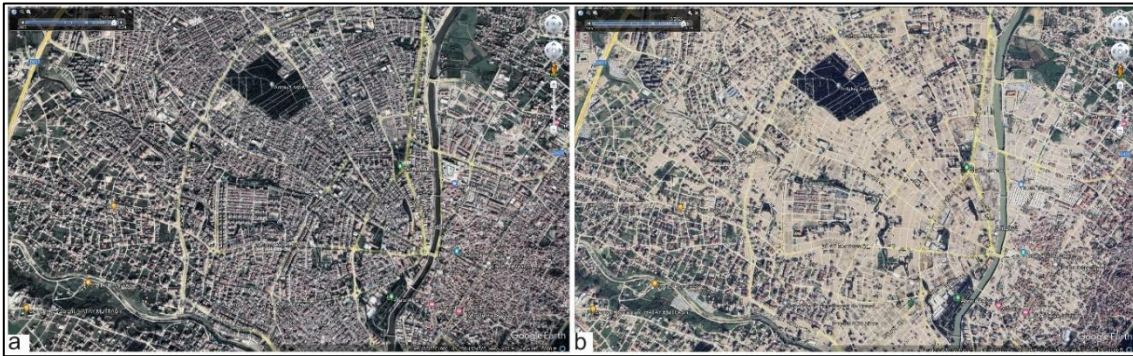
Çalışma alanı, coğrafi konumu itibarıyla çok büyük ve farklı tektonik yapıların bir arada bulunduğu ve bu yüzden de sismik aktivitenin yoğun olarak hissedildiği, Ölü Deniz Fayı, Doğu Anadolu Fayı ve Kıbrıs Yayı'nın etkisi altında gelişen Antakya-Maraş Grabeninin güneyinde yer almaktadır (Şekil 1-a). Bu bölge genel itibarıyla Avrasya, Arabistan ve Afrika levhalarının göreceli hareketlerinin etkilerini yansıtan bir konumda bulunur (Korkmaz, 2006). Bu levhalardan Afrika ve Arabistan levhalarının Anadolu levhasını sıkıştırması sonucunda bölgede birçok fay hattı gelişim göstermiştir (Şekil 1-a). Alanı etkileyen temel fayın üzerinde farklı görüşler bulunmaktadır. Örneğin, Gülen vd. (1987) ile Korkmaz, (2006) yaptıkları çalışmada alanı asıl etkileyen fayın Karasu Fayı olduğunu ifade etmişlerdir. Över vd. (2001, 2004b) ise Helen-Kıbrıs yayının bu alana kadar uzantısı olan Kıbrıs-Antakya Transform (KAT) Fayı'nın alanı etkilediğini belirtmişlerdir. Bu fayların yanı sıra şehir ve yakın çevresinde birçok irili ufaklı fayın da bulunması, Antakya şehrinin tektonik aktivitelerden önemli ölçüde etkilenmesine neden olmaktadır (Şekil 1-b).

Antakya'nın fay hatları üzerinde bulunması, bölgenin deprem riskinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Tarih boyunca Antakya'da birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Tarihsel kayıtlara bakıldığında MÖ 65, MS 47, 115, 148, 341-42, 458, 526, 528, 551, 557, 588, 712, 848, 860, 956, 1054, 1074, 1091-92 yıllarında birçok deprem şehri etkilemiştir (Ekin, 2007; Uslu Azarak, 2023; Yüksel, 2023). Şehir, meydana gelen depremler nedeniyle birçok kez yeniden inşa edilmek zorunda kalmıştır. Bölgeyi etkileyen son büyük deprem, ülkemizde 'yüzyılın felaketi' olarak adlandırılan 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen iki büyük depremdir. Kandilli Rasathanesi verilerine göre, ilk deprem Mw 7.7 büyüklüğünde olup merkez üssü Yamacoba-Şehitkamil (Gaziantep) olarak belirlenmiştir. İkinci büyük deprem ise Mw 7.6 büyüklüğünde olup merkez üssü Ekinözü (Kahramanmaraş) olarak kaydedilmiştir. Yaşanan depremler, merkez üssü ile birlikte 11 çevre ilde (Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elâzığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa) hissedilmiş, bu olay sonucunda birçok bina yıkılmış ve 50 binden fazla insan hayatını kaybetmiştir (TMMOB, 2023). Ayrıca, Kandilli Rasathanesi verilerine göre, şubat ayı boyunca Hatay ilinde büyüklükleri 3.5 ile 6.4 arasında değişen toplam 117 deprem meydana gelmiştir (Şekil 1-b).

Türk Tabipler Birliği (TTB)'nin 6. Ay Deprem Raporu'na göre, 2023 Kahramanmaraş depreminde Antakya'da toplam 6.369 yapının yıkıldığı, acil yıkılması gereken 3.734 yapı ve ağır hasar gören 21.830 yapı tespit edilmiştir (TTB, 2023). Şekil 2'de, çalışmada seçilen yöntemin uygulandığı örneklem alanına ait deprem öncesi (Şekil 2-a 2022 yılı aralık ayı) ve deprem sonrası (Şekil 2-b 2024 yılı mart ayı) mekânsal değişimler Google Earth'den alınan fotoğraflarla gösterilmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanına ait deprem öncesi ve sonrası görüntü örnekleri, Google Earth'den alınmıştır (kaynak: Google Earth). (Pre-earthquake and post-earthquake image samples of the study area were taken from Google Earth (source: Google Earth))



Şekil 2. Çalışma alanına ait deprem öncesi ve sonrası görüntü örnekleri, Google Earth'den alınmıştır (kaynak: Google Earth). (Pre-earthquake and post-earthquake image samples of the study area were taken from Google Earth (source: Google Earth))

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

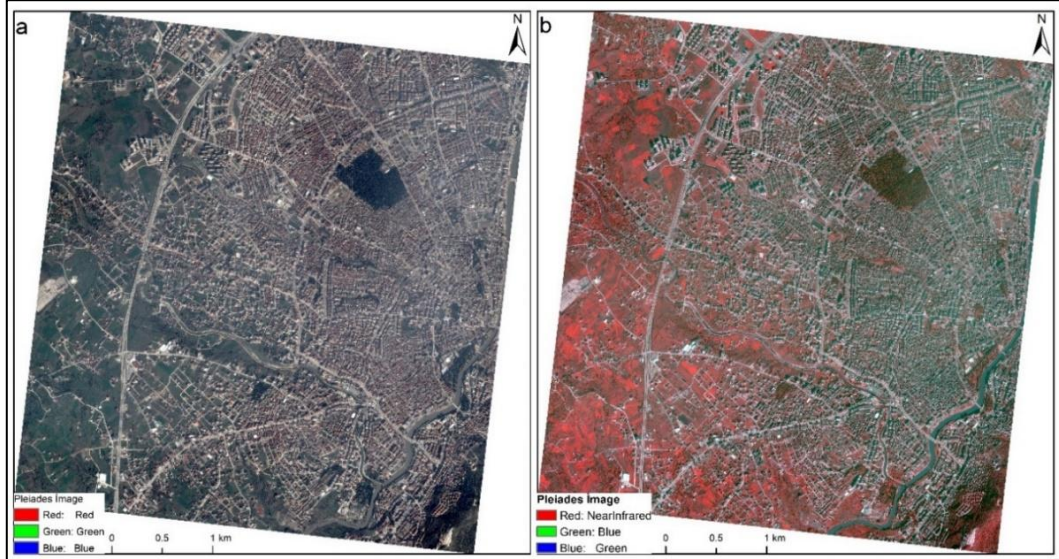
3.1 Çalışmada Kullanılan Veri Setleri ve Veri Ön düzeltmeleri (Datasets Used in The Study)

3.1.1. Pleiades-1B Uydu Görüntüsü (Pleiades-1B Satellite Image)

Çalışmada kullanılan Pleiades-1B uydusu AIRBUS Defence & Space tarafından inşa edilmiş ve 2 Aralık 2012'de başarıyla fırlatılmıştır. Uydunun bilimsel hedefleri; mühendislik ve inşaat projeleri, madencilik, endüstriyel ve askeri komplekslerin izlenmesi, çatışma bölgeleri ve kriz/felaket alanları, doğal tehlikeler, tahliye ve kurtarma operasyonları dahil olmak üzere büyük ölçekli alanların haritalanmasıdır. Yersel çözünürlüğü 0.5 metre olan

görüntülerin spektral çözünürlüğü ise 430 nm ile 950 nm arasında değişmektedir. Bu görüntüler, mavi, yeşil, kırmızı ve yakın kızılötesi bölgelerde olmak üzere toplam dört spektral bant içermektedir (Lebègue vd., 2013; Pleiades Imagery User Guide, Tablo 1).

Çalışmada kullanılan uydu görüntüsü, 8 Şubat 2023 tarihli olup, yaşanan büyük depremlerin sonrasına aittir. Uydu görüntüsünün koordinat düzlemi WGS 1984 UTM Zon 37N olup veri formatı .xml'dir. Görüntü, çalışma alanına uygun olarak kesilmiş ve veri formatı .tiff olarak dönüştürülerek analiz için hazırlanmıştır. Uydu görüntüsüne ait gerçek ve yalancı renk kombinasyonları Şekil 3 a ve b' de verilmiştir.



Şekil 3. a) Çalışma alanına ait Pleiades-1B uydu görüntüsünün gerçek renk kombinasyonu; RGB:321. b) çalışma alanına ait Pleiades-1B uydu görüntüsünün yalancı renk kombinasyonu RGB:432. (a) True colour combination of Pleiades-1B satellite image of the study area; RGB:321. b) false colour combination of Pleiades-1B satellite image of the study area; RGB:432).

Tablo 1. Pleiades-1B uydusuna ait teknik özellikler (Technical specifications of Pleiades-1B satellite)

Spektral Bantlar	Dalga Boyu Aralığı (µm)	Yersel Çözünürlük	Şerit Genişliği	Tekrar Ziyaret Zamanı
Mavi	450-530	0.5m	20km	1 gün
Kırmızı µm	510-590			
Yeşil	490-610			
Yakın Kızılötesi	750-950			

3.1.2. OpenStreetMap (OSM)

OpenStreetMap (OSM), dünya genelindeki coğrafi bilgilerin herkesin katkıda bulunabileceği ve kullanabileceği şekilde oluşturulduğu, açık ve özgür bir harita platformudur. Bu çalışmada, analiz için gerekli olan bina ayak izleri, OSM (<https://www.openstreetmap.org/>) internet adresinden ücretsiz olarak indirilen OSM verileri üzerinde çeşitli ön işlemleri gerçekleştirilerek elde edilmiş ve analizlerde kullanılmıştır.

Elde edilen bina verilerinin uydu görüntüsü ile aynı coğrafi koordinat düzlemine olmasını sağlamak amacıyla projeksiyon düzeltilmesi yapılmıştır. Projeksiyon düzeltilmesi sonucunda veri GCS_WGS_1984 koordinat düzleminden WGS_1984_UTM_Zone_37N koordinat düzlemine aktarılmıştır. Daha sonra, veri üzerinde mevcut olan coğrafik kaymalar, çift kayıtlar ve eksik binalar manuel olarak düzeltilmiş ve bina ayak izleri güncellenmiştir. Şekil 4 de görüldüğü üzere bazı binalar veri setinde eksik (Şekil 4; 1a) bazıları ise aslında mevcut olmayan binalar olarak gösterilmiştir (Şekil 4; 2a). Ayrıca, bina envanterinde bulunan binaların büyük bir kısmı gerçek mekânsal alanından sapmıştır (Şekil 4; 3a). Bu tür hatalar manuel olarak düzeltilmiş ve sonuç olarak (Şekil 4; 1b, 2b, 3b) güncellenmiş bir bina ayak izleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bina envanteri 17.400 yapıyı içermektedir.



Şekil 4. OpenStreetMap aracılığıyla elde edilen bina ayak izleri ve hatalı olan verilerin düzenlenmesi. (Building footprints obtained through OpenStreetMap and correction of erroneous data)

3.1.3. Litoloji Verileri (Lithology Data)

Deprem sonrası yıkımın boyutlarını tam olarak anlayabilmek için bölgenin jeolojik yapısının incelenmesi kritik öneme sahiptir. Seçilen örneklem alanının jeolojik yapısı, depremin yıkıcı etkilerini doğrudan etkilemektedir. Bu doğrultuda, yıkımın boyutu ve zeminin litolojik ilişkilerini değerlendirmek amacıyla 1/100.000 ölçekli DAF Atlas (Herece, 2008). kullanılarak alanın litolojik bilgileri P36 paftasından dijital ortama aktarılıp sayısallaştırılmıştır. Buna göre örneklem alanında 6 temel birim mevcuttur. Bu birimlerden ilki, alanın yaklaşık %1.15'ini oluşturan Sofular Formasyonu (Tms)'dur. Formasyon resifal kireçtaşlarından oluşur ve ilk kez Selçuk (1985) tarafından adlandırılmıştır. Şafak (1993) tarafından belirlenen ve fosil bulgularına göre (*Praeorbulina gloerasa curva*, *Orbulina suluralis* faunasına) formasyonun yaşı Langiyen'dir. Boulton vd. (2006) ifade ettiğine göre, birim sığ deniz ortamında çökelmiştir. Bu birimin üzerinde yine ilk defa Selçuk (1985) tarafından adlandırılan Tepehan Formasyonu (Tmt-%0.12) gelir ve bu formasyon kumtaşı, killi kireçtaşı, kiltası ve marnlardan oluşmuştur. Selçuk (1985) tarafından derlenen örneklerde *Gfobigerinoides rubra* fosiline göre formasyonun yaşı Geç Miyosen 'dir. Formasyonun hangi coğrafi şartlarda çökelmiş olduğuna dair Boulton vd. (2006) birimin alt bölümü sığ, orta ve üst bölümü ise gittikçe derinleşen sığ-açık deniz ortamında çökelmiş olduğunu ifade etmişlerdir (Tablo 2, Şekil 1-c).

Alanda bulunan diğer birim Selçuk (1985) tarafından Samandağ Formasyonu (pls) olarak adlandırılan ve alanın yaklaşık %16.26'ini kaplayan formasyon kumtaşı, killi kireçtaşı ve kiltasından oluşur. Formasyonda killi kireçtaşı ara tabakaları kapsayan kumtaşları egemen kaya türüdür. Birim Hatay grabeninde ve Amik gölünün yer aldığı ovada Kuvaterner çökellerinin altında yüzyenir. Formasyonun yaşı hakkında birçok çalışma yapılmış olup genel olarak Pliyosen (Boulton vd., 2006) ile geç Pliyosen (Dubertret, 1953; Karakuş ve Taner, 1994) olarak belirlenmiştir. Elde edilen fosillere göre Pliyosen yaşında olan formasyonun alt bölümü sığ denizel, üst bölümü ise akarsu ortamında çökelmiştir.

Çalışma alanının büyük bir bölümünde ise Kuaterner'e ait alüvyal birimler bulunmaktadır. Bu birimler Alüvyon (Qal), Göl Tabanı Çökelleri (Qgt) ve Alüvyon Yelpazesi (Qha)'dir. Kuvaterner yaşlı alüvyal birimler çalışma alanının yaklaşık %82,48'ini kapsamaktadır. Bu birimler genellikle tutturulmamış, olgun ve az olgun, farklı kökenli, çakıl ve kum düzeylerinden oluşan alüvyonlar olup yer yer silt düzeyleri içermektedir. Çakıl ve kum düzeyleri yanal ve

düşey yönde geçişlidir. Nehir ve dere kenarlarında alüvyal koşullarda çökelmiş olan litolojiler olup gevşek ve zayıf zemini oluştururlar (Herece, 2008).

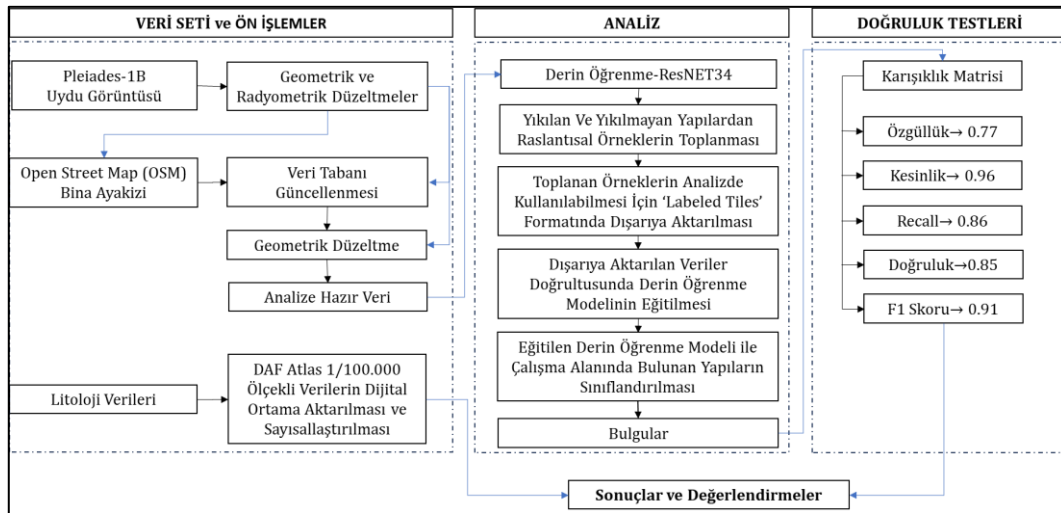
Tablo 2. Çalışma alanında bulunan jeolojik birimler ve yüzde dağılımları.
(Geological units in the study area and their percentage distributions)

Formasyon	Alan (km ²)	%
Tepahan Formasyonu (Tmt)	0.03	0.12
Sofular Formasyonu (Tms)	0.25	1.15
Aluyyon Yelpazesi (Qha)	12.60	57.10
Samandağ Formasyonu (pls)	3.59	16.26
Aluyyon (Qal)	4.58	20.74
Göl Tabanı Çökelleri (Qgt)	1.02	4.64

3.2. Yöntem (Method)

Çalışmada uygulanan yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, yöntemin uygulanabilmesi için gerekli verilerin temin edilmesini ve bu verilerin ön işlemlerinin yapılmasını kapsamaktadır. Bu amaçla, çalışmada kullanılacak Pleiades-1B uydu görüntüsü İstanbul Teknik Üniversitesi Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Uygulama ve Araştırma Merkezi'nden (İTÜ-CSCRS) temin edilmiştir ve uydu görüntüsünün geometrik ve radyometrik düzeltmeleri yapılmıştır. Bina ayak izleri, [OpenStreetMap](#) internet sitesinden alınmıştır. Uydu görüntülerinin OpenStreetMap ile karşılaştırılması yoluyla bina veri tabanları güncellenmiştir. Son olarak litoloji verisi 1/100.000 ölçekli DAF Atlas'ından dijital ortama aktarılmış ve sayısallaştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ön işlemleri tamamlanan uydu görüntüleri ve bina ayak izleri kullanılarak, ResNET-34 derin öğrenme mimarisi aracılığıyla çalışma alanındaki yıkılan ve yıkılmayan yapılar sınıflandırılmıştır. Üçüncü aşamada ise, ResNET-34 derin öğrenme mimarisi ile elde edilen bulguların doğruluk analizleri yapılmış ve sonuçlar litolojik birimlerle ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir (Şekil 5).

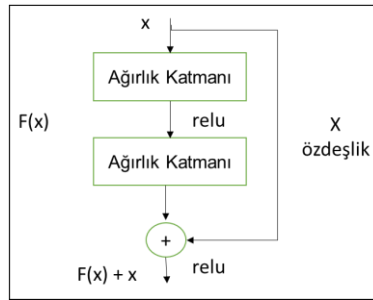


Şekil 5. Uygulanan yönteme ait iş akış şeması (Flow chart of the study)

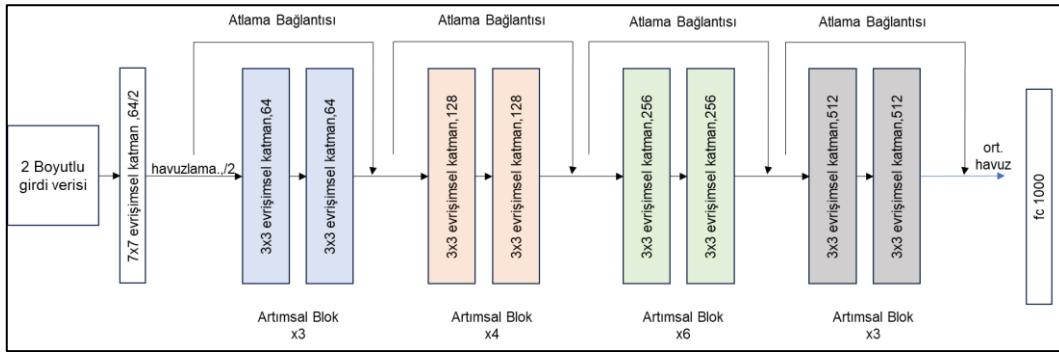
3.2.1: Derin Öğrenme Algoritması ResNET-34 Mimarisi (Deep Learning Algorithm ResNET-34 Architecture)

Derin Öğrenme (Deep Learning- DL), yapay zekanın (Artificial Intelligence- AI) bir alt kümesi olup, aynı zamanda makine öğrenmesinin (Machine Learning- ML) bir alt alanı olarak kabul edilmektedir. Hinton vd. (2006) yapmış olduğu çalışmalarla yayınlamış olduğu makalede yapay sinir ağlarına yeni bir yaklaşım getirerek, bu yaklaşımı derin öğrenme olarak adlandırılmıştır. Bu çalışma, deprem sonrası yıkılan ve yıkılmayan yapıların sınıflandırılmasını gerçekleştirmek amacıyla Derin Öğrenme yöntemlerinden biri olan ResNET-34 mimarisini kullanılmıştır. Çalışmada, ResNET-34 mimarisinin kullanılmasının amacı, büyük ölçekli veri setleri üzerinde etkili ve hassas analizler yapabile potansiyeline sahip olmasıdır. Bu mimari 2015 yılında düzenlenen ILSVRC ImageNet yarışmasında görüntü sınıflandırma alanında %3.6'lık bir hata payı ile yarışmayı kazanarak büyük bir başarı elde etmiştir. Görüntü sınıflandırmada hata payı insanlarda ortalama %5-10 oranında olurken mimarinin %3.6'lık bir hata payı ile sınıflandırmayı başarması insanlardan daha iyi bir görsel tanıma yeteneğinin olduğunu göstermiştir.

ResNet 'in temel amacı, ağlar derinleştikçe ortaya çıkan "vanishing gradient" (kaybolan gradyan) sorununu aşmak için bir çözüm sunmaktır. Bu, derin ağlarda eğitimin zorlaşmasına neden olan temel bir problemdir ve daha derin ağların performans artışından ziyade düşüşe geçmesine sebep olabilir (He vd., 2016). Kendisinden önceki mimarilerden (LeNet, AlexNet, VGGNet, GoogLeNet, ZFNet) daha fazla derinliğe sahip olan ResNet-34'ün katman sayısı diğer mimarilerden fazladır (Russakovsky, 2015; Doğan ve Türkoğlu, 2019). Bu tasarım, ağın bu katmanların girdilerine göre artık fonksiyonları öğrenmesini sağlar. ResNet, doğrudan eşlemeleri öğrenmek yerine, girdiler ve çıktılar arasındaki farkları (artıklar) öğrenerek önemli ölçüde derin ağlar için gelişmiş eğitimi kolaylaştırır (Shafik ve Gu, 2022; Tan vd., 2024). ResNet mimarisinde iki Relu (Rectified Linear Unit) ile doğrusal katman arasında bir kez kalıntı değeri (Residual Value) beslenen bir bloktan (Residual Block) oluşturulmuştur. Şekil 6' da görüldüğü üzere Residual blokta, x girişinin, konvolüsyon-ReLu-konvolüsyon serisinden sonra bir $F(x)$ sonucu vermektedir. Bu sonuç daha sonra orijinal x girişine eklenir ve $H(x) = F(x) + x$ olarak ifade edilir (He vd., 2016; İnik ve Ülker, 2017; Doğan ve Türkoğlu, 2019) (Şekil 6). Şekil 7' de ResNET-34'ün 34 katmanlı mimari yapısı görülmektedir. Böyle bir yapı ile öğrenmenin daha hızlı gelişeceği düşünülmüştür. Etkili derinlik ve eğitim verimliliği dengesi sayesinde ResNET derin öğrenmede temel bir model haline gelmiş ve bu alanda daha sonra yapılan çok sayıda yeniliğe ve çeşitliliğe ilham kaynağı olmuştur (Tan vd., 2024).



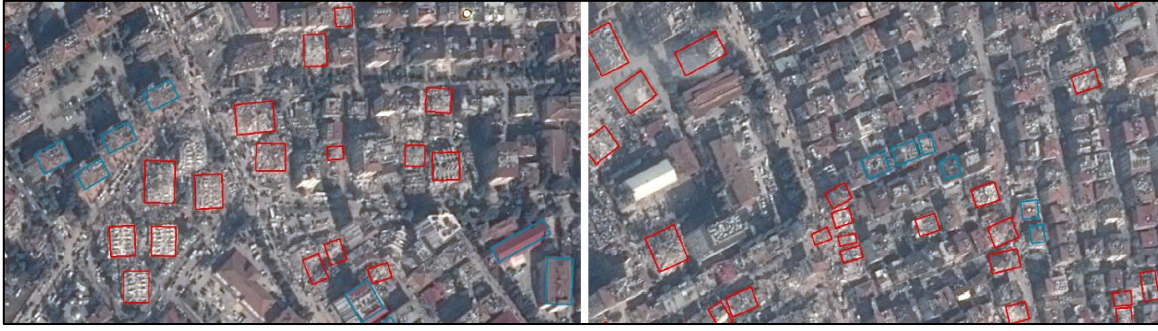
Şekil 6. Residual blok (He vd., 2016'dan değiştirilmiştir). (Residual block (Modified from He et al., 2016)).



Şekil 7. ResNet-34' e ait 34 katmanının ağ mimarisi (Zhang vd., 2023'ten değiştirilmiştir). (Network architecture of layer 34 of ResNet-34 (Modified from Zhang et al., 2023)).

4. Bulgular (Findings)

Uydu görüntüleri ve OpenStreetMap (OSM) bina verileri üzerinde ön işleme adımları uygulandıktan sonra, analiz sürecine geçilmiştir. Tüm ön işlemler ve analizler ArcGIS Pro 3.0.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinin ilk adımında, ResNET-34 derin öğrenme algoritması ile yıkılan ve yıkılmayan binaların tespitine yönelik eğitim örneklerinin toplanması ve etiketlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çalışma alanındaki toplam 17.400 binadan 849 örnek rastlantısal bir şekilde seçilmiş ve bu örneklerden 680'i yıkılmayan binaları, 169'u ise yıkılan binaları temsil edecek şekilde etiketlenmiştir. Şekil 8'de, toplanan eğitim veri setlerinin örnekleri sunulmaktadır; bu örneklerde mavi çerçeveli binalar yıkılmayan yapıların, kırmızı çerçeveli binalar ise yıkılan yapıların temsilini göstermektedir. Etiketleme işlemi tamamlandıktan sonra, veri setleri 'Labeled Tiles' formatında metadata olarak düzenlenmiş ve her çıktı verisi belirli bir sınıfla ilişkilendirilmiştir. Bu sınıflar, nesne sınıflandırması aşamasında kullanılmak üzere hazırlanmıştır.



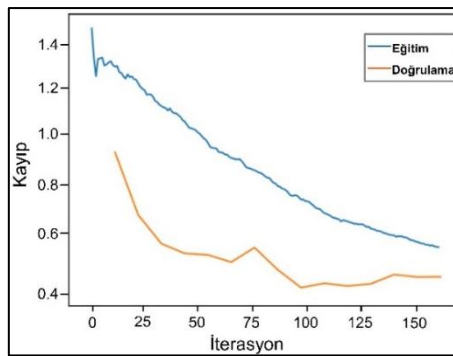
Şekil 8. Çalışma alanına ait yıkılan ve yıkılmayan binalardan alınan eğitim örnekleri.
(Educational examples taken from collapsed and non-collapsed buildings in the study area)

Derin öğrenme modelinin ihtiyaç duyduğu metadata formatında düzenlenen veriler, eğitim için hazır hale getirilmiştir. Eğitim aşamasında, nesne sınıflandırması amacıyla kullanılan model tipi Feature Classifier (Nesne Sınıflandırması) olarak belirlenmiş ve transfer öğrenme mimarisi olarak önceden yapılandırılmış ResNet-34 modeli kullanılmıştır. ResNet-34, 34 katman derinliğine sahip bir konvolüsyonel sinir ağıdır. İki eğitim sınıfı için gerçekleştirilen eğitim parametreleri detaylı olarak Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3' de verilen eğitim parametrelerine göre maksimum dönem sayısı; eğitim verisinin model tarafından kaç kez taranacağını belirleyen parametredir. Yığın boyutu; modelin çalışırken her adımda ne kadar görüntü işleneceğini belirtirken, parça boyutu ise eğitim sırasında görüntülerin küçük görüntülere bölünerek işlenmesini sağlar ve böylelikle model daha esnek ve verimli bir eğitim sürecinden geçer. Doğrulama, eğitim süreci boyunca eğitim verilerinden ayrı tutulan ve modelin hiç görmediği başka bir altkümedir. Öğrenme oranı modelin her adımda ağırlıklarının ne kadar değiştirileceğini belirten bir parametre olup yüksek öğrenme oranı hızlı öğrenme sağlar fakat kararsız bir davranış gösterirken düşük öğrenme oranı ise yavaş öğrenme sağlayıp daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Eğitim süreci boyunca kayıp fonksiyonunun değişimi, Şekil 9'de gösterilen grafik aracılığıyla görselleştirilmiştir.

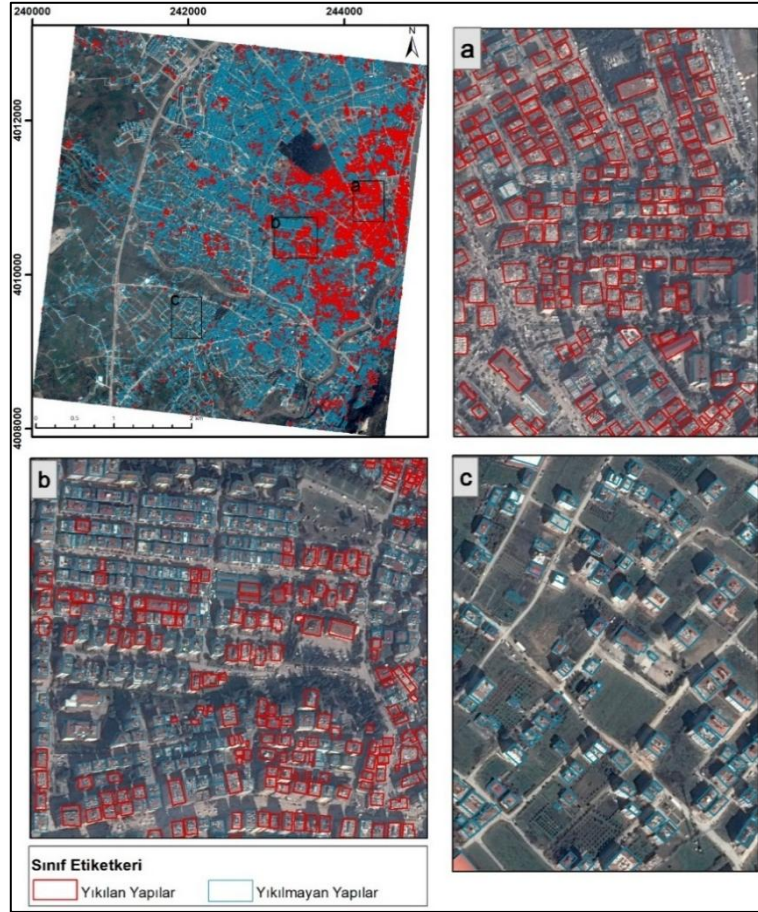
Tablo 3. Eğitilen modelin eğitim parametreleri. (Training parameters of the trained model)

Model Türü	Nesne Sınıflandırması
Maksimum Dönem Sayısı	20
Yığın Boyutu	64
Parça Boyutu	448
Doğrulama	%10
Öğrenme Oranı	8.317637711026709e-05, 0.0008317637711026709
Eğitim Süresi	10 dakika 47 saniye

Derin öğrenme algoritması, yapıların hasar durumu tespiti için belirlenen parametreler doğrultusunda eğitildikten sonra, analiz sürecinin son aşamasına geçilerek yapılar yıkılan ve yıkılmayan olarak sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, çalışma alanındaki toplam 17.400 yapıdan 3.948'i yıkılmış, 13.452'si ise yıkılmamış olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 10'da uygulanan sınıflandırma sonucunda hasarın yoğun olduğu ve yıkılan yapıların yüksek yoğunlukta bulunduğu alanlar (Şekil 10-a), orta derecede hasarın ve yıkımın gözlemlendiği alanlar (Şekil 10-b), hasarın ve yıkımın gözlemlenmediği alanlar gösterilmiştir.



Şekil 9. Eğitim boyunca oluşan kayıp fonksiyonunun grafiği. (Plot of the loss function generated during training)



Şekil 10. Derin öğrenme algoritmaları kullanılarak oluşturulan sınıflandırma analizi sonuçları; a) hasarın yoğun olduğu ve yıkılan yapıların yüksek yoğunlukta bulunduğu alanlar, b) orta derecede hasarın ve yıkımın gözlemlendiği alanlar, c) hasarın ve yıkımın gözlemlenmediği alanlar. (Classification analysis results generated using deep learning algorithms; a) areas where damage is intense and collapsed structures are in high density, b) areas where moderate damage and destruction are observed, c) areas where damage and destruction are not observed)

Analiz sonuçlarına göre, litolojik birimler ve yıkım oranları arasındaki ilişki incelendiğinde, en yüksek yıkım oranının gevşek ve dayanıksız malzemelerden oluşan Alüvyon formasyonlarında gerçekleştiği görülmüştür. Alüvyon formasyonlar içerisinde, en fazla yıkım 2.744 bina ile Alüvyon Yelpazesi (Qha) biriminde gözlemlenmiştir. Bu formasyonu, Asi Nehri tarafından biriktirilen alüvyonlar üzerinde meydana gelen 633 bina yıkımı takip etmektedir. Ayrıca, gevşek malzemelerden oluşan Göl Tabanı Çökelleri üzerinde 295 binanın yıkıldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çalışma alanının yaklaşık %82,48'ini kapsayan alüvyal formasyonlar üzerinde toplam yıkılan bina sayısı 3.672 olarak belirlenmiştir. (Tablo 4).

Tablo 4. Analiz sonuçlarına göre yıkılan ve yıkılmayan yapılar ile litolojik birimler arasındaki ilişki. (Relationship between collapsed and non-collapsed structures and geological units according to analysis results)

Formasyon	Yıkılan	Yıkılan %	Yıkılmayan	Yıkılmayan %
Tepehan Formasyonu (Tmt)	0	0	0	0
Sofular Formasyonu (Tms)	4	0.02	18	0.10
Alüvyon Yelpazesi (Qha)	2744	15.77	8587	49.35
Samandağ Formasyonu (pls)	272	1.56	1265	7.27
Alüvyon (Qal)	633	3.64	2851	16.39
Göl Tabanı Çökelleri (Qgt)	295	1.70	731	4.20

Kuvaterner yaşlı alüvyal formasyonlar çalışma alanının yaklaşık %82,48'ini kapsamakta olduğuna yukarıda değinilmiştir. Çalışma alanının da içerisinde bulunduğu Antakya ve çevresinin gevşek ve sağlam olmayan bir birim üzerine inşa edilmesi ve bu durumun ciddi kayıplara neden olabileceği daha önce araştırmacılar tarafından da vurgulanmıştır (Beyen vd., 2003; Korkmaz, 2006).

5. Doğruluk Değerlendirmeleri (Accuracy Assessments)

ResNET-34 derin öğrenme algoritmasıyla yıkılan ve yıkılmayan binaların sınıflandırılması işleminden sonra elde edilen sonuçların doğruluğu karışıklık matrisi (confusion matrix) ile hesaplanmıştır. Hesaplama sınıflandırma için kullanılan eğitim örnekleri (yer doğrulama noktaları) kullanılmıştır. ArcGIS ortamında eğitim örneklerinin üzerine 500 örnek nokta rastgele örnekleme yöntemi ile seçilmiştir. Örnek noktalar üzerinde sınıflandırma ve yer doğrulama noktaları üzerinde karışıklık matrisi hesaplanmıştır. Bu matriste Gerçek Pozitif (TP) pozitif olarak sınıflandırılan pozitif örnektir; Yanlış Negatif (FN) negatif olarak yanlış sınıflandırılan pozitif örnektir; Gerçek Negatif (TN) negatif olarak sınıflandırılan negatif örnektir; Yanlış Pozitif (FP) pozitif olarak yanlış sınıflandırılan negatif örnektir. Doğruluk değerlendirmelerinde; Özgüllük (Specificity), bir testin gerçek negatifleri doğru bir şekilde tanımlama yeteneğidir. Presicion (Kesinlik), gerçek pozitif ve yanlış pozitif örneklerinin toplamı ile temsil edilen pozitif sınıf örneklerinin toplam sayısı içinde doğru etiketlenmiş pozitif örneklerin payıdır. Recall, bir testin doğru tanımlanan pozitif sınıf örneklerinin gerçek Pozitif sınıf örneklerinin toplam sayısı içindeki payıdır ve bir testin gerçek pozitifleri doğru bir şekilde tanımlama yeteneğini ölçer. Toplam sınıflandırma Doğruluğu (Accuracy), sınıflandırıcının iki grup arasında ayırım yapma yeteneğidir. Bazı durumlarda Presicion ve Recall ölçütleri tek başlarına anlamlı bir karşılaştırma sonucu çıkarılmasında yeterli olmamaktadır. İki değeri bir arada değerlendiren F1 Skoru sayesinde daha anlamlı sonuçlar üretebilmektedir. F1 Skoru, Presicion ve Recall değerlerinin harmonik ortalaması alınarak elde edilmektedir ve hem yanlış pozitifleri hem de yanlış negatifleri hesaba kattığı için dengeli bir performans değerlendirmesi sunar (Lipton vd., 2014; Congalton ve Green, 2019; Kranjčić vd., 2019; Huang vd., 2015).

Analiz sonucunda elde edilen doğruluk değerlerine bakıldığında, bir testin gerçek pozitifleri doğru bir şekilde tanımlama yeteneğini ölçen Recall değeri %86, gerçek negatifleri doğru bir şekilde tanımlama yeteneğini ölçen Özgüllük (Specificity) değeri %77 olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra genel Doğruluk (Accuracy), %85 ve F1 Skor değeri %91 olarak tespit edilmiştir. Doğruluk hesaplamalarında kullanılan formüller ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmada kullanılan karışıklık matrisleri ve elde edilen sonuçlar.
(Confusion matrices used in the study and the results obtained)

	Formül	Sonuç
Özgüllük (Specificity),	$TN / (TN + FP)$	0.77
Kesinlik (Presicion)	$TP / (TP + FP)$	0.96
Recall	$TP / (TP + FN)$	0.86
Doğruluk (Accuracy)	$(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$	0.85
F1 Skoru	$2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall})$	0.91

6. Tartışmalar (Discussions)

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depreminin etkilediği Hatay ilinin Antakya ve Defne ilçeleri üzerindeki seçilen bir örneklem alanında ResNET-34 derin öğrenme algoritması kullanılarak deprem sırasında yıkılan ve yıkılmayan yapılar yüksek doğrulukta tespit edilmiştir. Literatürde de birçok çalışma derin öğrenmenin farklı algoritmalarını kullanarak yüksek doğrulukta yıkılan yapıları tespit edebilmiştir (Vetrivel vd., 2018; Ji vd., 2018; Ma vd., 2019; Rashidian vd., 2019; Toby vd., 2022). Krizhevsky vd. (2012) derin öğrenmenin; görüntü işleme için önceki geleneksel yöntemlerden önemli ölçüde daha iyi performans gösterebilen, hızla gelişen bir teknoloji olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak çalışmada uygulanan yöntemin sadece küçük bir örneklem alanında test edilmesi farklı alanlarda yapısal özelliklerin çeşitliliğine bağlı olarak (örneğin; çatı özellikleri, binaların yapı malzemeleri, bina yoğunlukları vb.) benzer başarı oranını ne ölçüde göstereceği üzerinde çalışılması gereken bir soru işaretidir. Gelecekteki çalışmalar, farklı yapısal özelliklere sahip ve çeşitli doğal afet türlerinde algoritmanın performansını ölçmeye yönelik uygulamalarla genelleyici sonuçlar elde etmeyi hedeflemelidir.

Eğitim sürecinde kullanılan veri setlerinin çeşitliliği ve kapsamı, modelin genellenebilirliğini etkileyebilir ve yerel koşulları ve yapı özelliklerini tespit etmek zordur. Açık ki, uydu görüntüleri kullanılarak yapılan derin öğrenme tabanlı hasar tespiti ile yüksek performans elde edilebilse de derinlik bilgisi elde edilemediği için çatıları ağır hasar görmediğinde yıkılan binaların tespit edilmesi zordur (Xiu vd., 2020). Bu sınırlamalar, farklı veri kaynaklarının ve ek saha çalışmalarının elde edilen sonuçları destekleyici ve daha kapsamlı hale getirecek şekilde değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra Toby vd. (2022)'nin ifade ettiği gibi derin öğrenme algoritmaları kullanarak Uzaktan Algılanan görüntülerden nesne tespiti çalışmalarında, veri setinin niteliğinin modelin

performansını belirlemektedir. Özellikle algoritmanın başarı ölçütleri kullanılan uydu görüntülerinin mekânsal, spektral ve radyometrik çözünürlüklerine bağlı olarak değişebilir.

Ayrıca, derin öğrenme algoritmalarının performansı, uygulayıcı tarafından etiketlenen veri setinin kalitesine ve doğruluğuna da bağlıdır. Bu, etiketleme sürecinde insana bağımlılığın artması anlamına gelmektedir, ki bu da subjektiflik içerebilir ve yanlış sınıflandırmalara yol açabilir. Ayrıca 2023 Kahramanmaraş depremi gibi yıkım etkisinin çok büyük olduğu ve çok fazla hasarın meydana geldiği alanda binaları sadece "yıkıldı" veya "yıkılmadı" şeklinde etiketlemek çok fazla zaman ve emek gerektirir bu da acil müdahalenin gerektiği afet durumlarında bir dezavantaj olarak görülür.

Çalışmada bina ayak izlerinin belirlenmesinde kullanılan OSM verisinin açık kaynaklı ve ücretsiz erişime sahip olması bir avantaj olarak görülse de bu verinin doğruluğu ve güvenilirliği kullanıcı katkılarına dayandığı için her zaman yüksek doğrulukta veya güncel olmayabilir. Bu nedenle yöntemin uygulanması için gerekli olan bina ayak izlerinin afet öncesine ait güncel durumu temsil eden yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntülerle güncellenmesi gerekebilir. Özellikle afet durumlarda, verilere erişim, veriler arasında entegrasyon sağlanması ve verilerin güncellenmesi için gereken süre, acil müdahale planlaması gerektiren durumlarda bir dezavantaj olarak görülebilir.

Kendisinden önceki mimarilerden (LeNet, AlexNet, VGGNet, GoogLeNet, ZFNet) daha fazla derinliğe sahip olan ResNet-34'ün (Russakovsky, 2015; Doğan ve Türkoğlu, 2019) yüksek başarısı afet yönetimi süreçlerine entegrasyonunda teknik ve altyapısal engellere de bağlı olabilir. Özellikle teknolojik alt yapının büyük ölçüde etkilendiği afet durumlarında algoritmanın uygulandığı saha koşullarına adaptasyonu için gereken bilgi işlem gücü ve veri iletim altyapısının mevcut olmayışı, bu teknolojilerin yaygın kullanımını sınırlayabilir.

Son olarak depremin yıkım etkisini ve dolayısıyla can ve mal kaybını en aza indirmek amacı ile yapılaşma ve zemin özellikleri arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurmak oldukça önemlidir. Özellikle alüvyon formasyonlar üzerinde kurulan yerleşim alanları büyük risk altındadır. Bunlar; zemin sıvılaşması, oturma, erozyon ve heyelan olarak sıralanabilir ayrıca böyle bir zeminde deprem meydana geldiğinde deprem dalgaları büyüyebilir ve böylece yapıların zarar görmesi kaçınılmaz olur (Bowles, 1996; Ulusay, 1999; Das, 2010). Derin öğrenme algoritmalarının yüksek doğruluk oranı, afet sonrası hasar tespitinin yanı sıra, bu gibi riskli bölgelerde yapıların güvenliğini değerlendirme süreçlerinde de kullanılabilirliğini desteklemektedir. Hatay depremi sonrasında yıkım etkisi en fazla Asi Nehri tarafından biriktirilen alüvyon dolgular ve gevşek zeminler üzerinde meydana gelmiştir. Bu durum, alüvyon formasyonlarının ve gevşek zeminlerin yapı güvenliğini nasıl etkilediğini açıkça göstermiştir. Bu nedenden dolayı bu tür zeminlerde yapılan inşaat projelerinin daha dikkatli bir şekilde planlanması gerekir. Bu bağlamda, derin öğrenme yöntemlerinin sağladığı yüksek doğruluk, afet yönetimi ve şehir planlaması için önemli bir avantaj sunmaktadır.

7. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminin etkilediği Hatay ilinin Antakya ve Defne ilçeleri üzerinde seçilen bir örneklem alanında ResNET-34 derin öğrenme algoritması ile PLAIDES uydu görüntülerinden yapı hasarı tespiti %85 doğruluk ve %91 F1 skoru oranıyla tespit edilmiştir. Analiz sonuçları afet sonrası hasar tespitinde ResNET-34 derin öğrenme algoritmasının yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden hasar tespitini etkili bir şekilde belirlediğini göstermiştir. Modelin yüksek doğruluk oranı, derin öğrenme tekniklerinin afet sonrası hasar tespitinde ve yapı güvenliği değerlendirmelerinde etkili bir araç olarak kullanılabileceğini desteklemektedir. Çalışma sonuçları deprem riskine karşı yapıların dayanıklılığını artırmak için zemin özellikleri ile yapılaşmanın entegre bir şekilde ele alınması gerektiğini göstermiştir. Analiz sonuçları, yıkılan binaların büyük ölçüde alüvyon formasyonları üzerinde yoğunlaştığını, özellikle Alüvyon Yelpazesi (Qha) ve Asi Nehri alüvyonlarında önemli hasarların olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, gevşek zeminlerin yapı dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkisini açıkça göstermiştir.

Derin öğrenme algoritmalarının yüksek doğruluk kapasitesi hem afet sonrası hasar tespitinde hem de riskli zeminlerde yapı güvenliğini değerlendirmede önemli bir potansiyele sahiptir. Derin öğrenme algoritmalarındaki gelişmeler, gelecekteki afet yönetimi ve şehir planlama uygulamaları için kritik bir avantaj sunacak ve daha güvenli yerleşim alanları oluşturulmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, bu araştırma için Pleiades uydu görüntülerini ücretsiz olarak sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi- Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (İTÜ- CSCRS) teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Beyen, K., Erdik, M., Mazmanoğlu, C., & Ekmekçiöğlü, Z., 2003. Antakya'nın geçmişten günümüze sismik aktivitesi ve yapılması gerekenlerin bir uluslararası konferansın ışığında değerlendirilmesi. *Engineering Report of Turkey*, 423(1), 51-53.
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/> (Erişim Tarihi: 03.05.2024)
- Boulton, S.J., Robertson, A.H.F. & Ünlügenç, U.C., 2006. Tectonic and sedimentary evolution of the Cenozoic Hatay Graben, Southern Turkey: A two-phase model for graben formation. In A. H. F. Robertson & D. Mountrakis (Eds.), *Tectonic development of the Eastern Mediterranean Region* Geological Society of London, Special Publications, 206, 613-634.
- Bowles, J. E., 1996. *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill International Editions.
- Ci, T., Liu, Z., & Wang, Y., 2019. Assessment of the degree of building damage caused by disaster using convolutional neural networks in combination with ordinal regression. *Remote Sensing*, 11(23), 2858
- Congalton, R. G., & Green, K., 2019. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (3rd ed.). CRC Press.
- Das, B.M., 2010. *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Doğan, F., & Türkoğlu, İ., 2019. Derin öğrenme modelleri ve uygulama alanlarına ilişkin bir derleme. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 409-445
- Dubertret, L., & Hudson, R. G. S., 1953. Géologie des roches vertes du nord-ouest de la Syrie et du Hatay (Turquie). *Mémoires Moyen-Orient*, 6, 227.
- Ekin, Ü., 2007. 1822 Halep-Antakya depremi ve bölgeye etkileri. *Türk Kültürü İncelemeleri Dergisi*, 2(17), 29-50.
- Emre, Ö., Duman T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Active fault map of Turkey with an explanatory text 1: 1,250,000 scale. *General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication Series*, 30, 89.
- Ge, J., Tang, H., & Ji, C., 2023. Self-incremental learning for rapid identification of collapsed buildings triggered by natural disasters. *Remote Sensing*, 15(15), 3909.
- Google Earth: <https://www.google.com/earth> (Erişim Tarihi: 03.05.2024)
- Gursoy, H., Piper, J., Tatar, O., & Mesci, L., 1998. Palaeomagnetic study of the Karaman and Karapınar volcanic complexes, central Turkey: neotectonic rotation in the south-central sector of the Anatolian Block. *Tectonophysics*, 299(1-3), 191-211.
- Gülen, L., Barka, A. A. ve Toksöz, M. N., 1987. Kıtaların çarpışması ve ilgili kompleks deformasyon: Maraş üçlü eklemi ve çevre yapıları. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Yerbilimleri Dergisi*, 14, 319-336.
- Hacıefendioğlu, K., Başağa, H. B., Kahya, V., Özgün, K., & Altunışık, A. C., 2024. Automatic detection of collapsed buildings after the 6 February 2023 Türkiye earthquakes using post-disaster satellite images with deep learning-based semantic segmentation models. *Buildings*, 14(3), 582.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J., 2016. Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 770-778.
- He, M., Zhu, Q., Du, Z., Hu, H., Ding, Y., & Chen, M., 2016. A 3D shape descriptor based on contour clusters for damaged roof detection using airborne LiDAR point clouds. *Remote Sensing*, 8(3), 189.
- Herece, E., 2008. Doğu Anadolu Fayı (DAF) Atlası. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi*, 13. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Hinton, G. E., Osindero, S., & Teh, Y. W., 2006. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*, 18(7), 1527-1554.
- Huang, H., Xu, H., Wang, X., & Silamu, W., 2015. Maximum F1-score discriminative training criterion for automatic mispronunciation detection. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 23(4), 787-797.
- Irwansyah, E., Young, H., & Gunawan, A. A., 2023. Multi disaster building damage assessment with deep learning using satellite imagery data *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(1), 122-131.
- İnik, Ö., & Ülker, E., 2017. Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6(3), 85-104.
- Ji, M., Liu, L., & Buchroithner, M., 2018. Identifying collapsed buildings using post-earthquake satellite imagery and convolutional neural networks: A case study of the 2010 Haiti earthquake. *Remote Sensing*, 10(11), 1689.
- Ji, M., Liu, L., Zhang, R., & F. Buchroithner, M., 2020. Discrimination of earthquake-induced building destruction from space using a pretrained CNN model. *Applied Sciences*, 10(2), 602.
- Jia, J., & Ye, W., 2023. Deep Learning for Earthquake Disaster Assessment: Objects, Data, Models, Stages, Challenges, and Opportunities. *Remote Sensing*, 15(16), 4098.
- Karakuş, K., & Taner, G., 1994. Samandağ formasyonunun (Antakya havzası) yaşı ve molluska faunasına bağlı paleoekolojik özellikleri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 37(2), 87-109
- Korkmaz, H., 2006. Antakya'da zemin özellikleri ve deprem etkisi arasındaki ilişki. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 4(2), 49-66.
- Kranjčić, N., Medak, D., Župan, R., & Rezo, M., 2019. Support vector machine accuracy assessment for extracting green urban areas in towns. *Remote Sensing*, 11(6), 655.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E., 2012. *Imagenet classification with deep convolutional neural networks*. *Adv. Neural Informat. Process. Syst.* 25, 1097-1105.
- Lebègue, L., Greslou, D., Blanchet, G., de Lussy, F., Fourest, S., Martin, V., ... & Amberg, V., 2013. Pleiades satellites image quality commissioning. In *Earth Observing Systems XVIII, SPIE*, 8866, 292-303.

- Li, S., & Tang, H., 2020. Classification of building damage triggered by earthquakes using decision tree. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-15.
- Lipton, Z. C., Elkan, C., & Naryanaswamy, B., 2014. Optimal thresholding of classifiers to maximize F1 measure. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: European Conference, ECML PKDD 2014, Nancy, France, September 15-19, 2014. Proceedings, Part II* (225-239). Springer Berlin Heidelberg.
- Ma, H., Liu, Y., Ren, Y., & Yu, J., 2019. Detection of collapsed buildings in post-earthquake remote sensing images based on the improved YOLOv3. *Remote Sensing*, 12(1), 44.
- Ma, H., Liu, Y., Ren, Y., Wang, D., Yu, L., & Yu, J., 2020. Improved CNN classification method for groups of buildings damaged by earthquake, based on high resolution remote sensing images. *Remote Sensing*, 12(2), 260.
- Menderes, A., Erener, A., & Sarp, G., 2015. Automatic detection of damaged buildings after earthquake hazard by using remote sensing and information Technologies. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 257-262.
- Moradi, M., & Shah-Hosseini, R., 2020. Earthquake damage assessment based on deep learning method using VHR images. *Environmental Sciences Proceedings*, 5(1), 16.
- Moya, L., Marval Perez, L. R., Mas, E., Adriano, B., Koshimura, S., & Yamazaki, F., 2018. Novel unsupervised classification of collapsed buildings using satellite imagery, hazard scenarios and fragility functions. *Remote Sensing*, 10(2), 296.
- OpenStreetMap: OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/>. (Erişim Tarihi: 27.04.2024)
- Over, S., Ozden, S. ve Unlugenç, U. C., 2004a. Late Cenozoic stress distribution along the Misis Range in the Anatolian, Arabian, and African plate intersection region, SE Turkey. *Tectonics*, 23, TC3008
- Over, S., Ozden, S., & Yilmaz, H., 2004b. Late Cenozoic stress evolution along the Karasu Valley, SE Turkey. *Tectonophysics*, 380(1-2), 43-68
- Över, S.; Ünlügenç, U.C.; Özden, S., 2001. Hatay bölgesi etkin gerilme durumu, Hacettepe Üniversitesi., Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, *Yerbilimleri Dergisi*, 23, 1-14.
- Pleiades Imagery User Guide: <http://www.astriumgeo.com/en/4572-pleiades-technical-documents> (Ekim 2012)
- Rashidian, V., Baise, L. G., & Koch, M., 2019. Detecting collapsed buildings after a natural hazard on vhr optical satellite imagery using u-net convolutional neural networks. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 9394-9397.
- Rashidian, V., Baise, L. G., Koch, M., & Moaveni, B., 2021. Detecting demolished buildings after a natural hazard using high resolution RGB satellite imagery and modified U-Net convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 13(11), 2176.
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., ... & Fei-Fei, L., 2015. Imagenet large scale visual recognition challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115, 211-252.
- Sarp, G., Erener, A., Duzgun, S., & Sahin, K., 2014. An approach for detection of buildings and changes in buildings using orthophotos and point clouds: A case study of Van Erriş earthquake. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), 627-642.
- Selçuk, H., 1985. Kızıldağ-Keldağ-Hatay dolayının jeolojisi ve jeodinamik evrimi MTA Enstitüsü, *Jeoloji Etütleri Dairesi, Derleme Raporu*, No: 7787, Ankara.
- Sengor, A. M. C., 1979. The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of the Geological Society*, 136(3), 269-282.
- Shafiq, M., & Gu, Z., 2022. Deep residual learning for image recognition: A survey. *Applied Sciences*, 12(18), 8972.
- Şafak, Ü., 1993. Antakya Havzası ostrakod biyostratigrafisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 36(2), 115-137.
- Tan, C., Chen, T., Liu, J., Deng, X., Wang, H., & Ma, J., 2024. Building Extraction from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Data in a Landslide-Affected Scattered Mountainous Area Based on Res-Unet. *Sustainability*, 16(22), 9791.
- Toby, T., Gopalakrishnan, U., & Rao, S. N., 2022. A deeper cnn approach for detection of collapsed buildings in drone images. In *Proceedings of the 2022 5th International Conference on Computational Intelligence and Communication Technologies (CCICT)*, 404-410.
- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB), 2023. TMMOB Mimarlar Odası 6 ŞUBAT DEPREMLERİ 8. ay değerlendirme raporu. https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/depremin_8_ayina_iliskin_degerlendirmelerimiz.pdf. (Erişim Tarihi: 03.09.2024)
- Türk Tabipleri Birliği (TTB), 2023. VI. Ay Deprem Raporu: Olağandışı Durumlara Dayanısız Birinci Basamak Sağlık Hizmetleri. <https://www.ttb.org.tr/userfiles/files/6ayraporu.pdf> (Erişim Tarihi: 22.06.2024)
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2023: <https://data.tuik.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 03.05.2024)
- Ulusay, R., 1999. Kentleşme sürecinde yer seçimi ve depreme dayanıklı yapı inşasında jeolojik-jeoteknik etütlerin önemi ve işlevi. *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını*, 51, 23-27.
- Uslu Azarak, L., 2023. Tarihin İzdüşümünde Antakya (Antiocheia) Kentinin Depremselliği. *Vakanüvis-Uluslararası Tarih Araştırmaları Dergisi*, 8, 3210-3228.
- Vetrivel, A., Gerke, M., Kerle, N., Nex, F., & Vosselman, G., 2018. Disaster damage detection through synergistic use of deep learning and 3D point cloud features derived from very high resolution oblique aerial images, and multiple-kernel-learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140, 45-59.
- Xiu, H., Shinohara, T., Matsuoka, M., Inoguchi, M., Kawabe, K., & Horie, K., 2020. Collapsed building detection using 3D point clouds and deep learning. *Remote Sensing*, 12(24), 4057.
- Yüksel, Ş., 2023. Antakya'nın Deprem Öyküsü. *Modular Journal*, 6(2), 102-106.
- Zhang, Z., Wang, S., Li, Z., Gao, F., & Wang, H., 2023. A Multi-Dimensional Covert Transaction Recognition Scheme for Blockchain. *Mathematics*, 11(4), 1015.



BETON DAYANIMI TAHMİNİNDE İKİLİ VE ÇOKLU DOĞRUSAL REGRESYON ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Nevbahar EKİN^{1*}

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Beton Dayanım, Ultrasonik, Özdirenç, İkili Doğrusal Regresyon, Çoklu Doğrusal Regresyon.</i>	Bu çalışma tahribatsız yöntemler kullanarak Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) analizi ile düşük-orta dayanımlı donatılı betonların basınç dayanımını tahmin etmeyi amaçlamıştır. Tahribatsız olarak ultrasonik ve özdirenç yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden elde edilen donatılı betonun ultrasonik P ve S dalga hızları ve görünür özdirenç değerlerinden yararlanılmıştır. Ayrıca donatılı betonun kür süresi, donatı çapı, beton numunelerin ağırlık ve yoğunluk değerleri de kullanılmıştır. Tüm bu parametreler ile betonun tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) arasında ayrı ayrı ilişkiler elde edilmiştir. Ayrıca ÇDR analizi ile oluşturulan matematiksel model yardımıyla bağımlı değişken TEBD tahmin edilmeye çalışılmıştır. TEBD tahmininde hangi bağımsız değişkenin önemli ve etkili olduğunu gösteren anlamlılık (önem) düzeyleri de belirlenmiştir. Anlamlılık düzeylerine göre donatı çapı, ağırlık ve yoğunluk parametrelerinin eşik değer olan 0.05 değerinden büyük olması nedeni ile anlamlı parametreler olmadığı anlaşılmıştır. Buna karşın kür süresi, ultrasonik P ve S dalga hızları ve görünür özdirenç parametreleri anlamlı bulunmuştur. ÇDR analizinden anlamlı bulunan parametrelerden elde edilen TEBD değerleri ve İkili Doğrusal Regresyon (İDR) ile belirlenen TEBD değerleri karşılaştırılarak hata oranları ortaya konulmuştur.

COMPARISON OF BINARY AND MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS IN CONCRETE STRENGTH PREDICTION

Keywords	Abstract
<i>Concrete Strength, Ultrasonic, Resistivity, Binary Linear Regression, Multiple Linear Regression.</i>	This study aims to estimate the compressive strength of low-medium strength reinforced concretes using non-destructive methods with Multiple Linear Regression (MLR) analysis. Ultrasonic and resistivity methods were utilized as non-destructive methods. Ultrasonic P and S wave velocities and apparent resistivity values of reinforced concrete obtained from these methods were used. In addition, the curing time of reinforced concrete, reinforcement diameter, weight, and density values of concrete samples were used. Separate relationships were obtained between all these parameters and the uniaxial compressive strength (UCS) of the concrete. In addition, the dependent variable UCS was tried to be estimated with the help of the mathematical model created with the MLR analysis. Significance levels showing which independent variables are important and effective in UCS estimation were also determined. According to the significance levels, it was understood that the reinforcement diameter, weight, and density parameters were not significant parameters because they were greater than the threshold value of 0.05. On the other hand, curing time, ultrasonic P and S wave velocities, and apparent resistivity parameters were found to be significant. The error rates were revealed by comparing the UCS values obtained from the parameters found to be significant in the MLR analysis and the UCS values determined by binary linear regressions (BLR).

Alıntı / Cite

Ekin, N., (2025). Beton Dayanımı Tahmininde İkili ve Çoklu Doğrusal Regresyon Analizlerinin Karşılaştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 64-77.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process								
N. Ekin, 0000-0003-4959-8077	<table><tr><td>Başvuru Tarihi / Submission Date</td><td>23.10.2024</td></tr><tr><td>Revizyon Tarihi / Revision Date</td><td>21.11.2024</td></tr><tr><td>Kabul Tarihi / Accepted Date</td><td>27.11.2024</td></tr><tr><td>Yayın Tarihi / Published Date</td><td>20.03.2025</td></tr></table>	Başvuru Tarihi / Submission Date	23.10.2024	Revizyon Tarihi / Revision Date	21.11.2024	Kabul Tarihi / Accepted Date	27.11.2024	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025
Başvuru Tarihi / Submission Date	23.10.2024								
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.11.2024								
Kabul Tarihi / Accepted Date	27.11.2024								
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025								

* İlgili yazar / Corresponding author: nevbaharsabbag@sdu.edu.tr, +90-246-211-1353

COMPARISON OF BINARY AND MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS IN CONCRETE STRENGTH PREDICTION

Nevbahar EKİN^{1†}

¹Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geophysical Engineering, Isparta, Türkiye.

Highlights

- Non-destructive methods estimate concrete compressive strength.
- Different parameters can be used to predict the concrete compressive strength.
- Binary and multiple linear regression analyses estimate concrete strength.
- Concrete strength is predicted from multiple linear regression analysis with high accuracy.

Purpose and Scope

This study was carried out to estimate the compressive strength values of low-medium strength concretes using parameters determined from non-destructive methods. The BLR and MLR analysis are used for this prediction. It is aimed to determine the concrete strength with high accuracy.

Design/methodology/approach

The P and S wave velocities and resistivity values obtained using the ultrasonic and resistivity methods were non-destructively used to estimate the concrete strength. In addition to P and S-wave velocity and resistivity parameters, the curing time of the reinforced concrete, the diameter of the reinforcement, and the weight and density values of the concrete samples were also considered to predict the concrete strength. The BLR and MLR analysis were used to determine the relationships between all these parameters and the uniaxial concrete compressive strength (UCS).

Findings

Binary and multiple analyses were performed using the parameters obtained from non-destructive methods and the physical parameters of the concrete. As a result of binary analyses, the correlation coefficients were low, and the error rates were high. However, the MLR analysis distinguished the parameters according to their significance levels. According to the significance levels of MLR analysis, it was understood that the reinforcement diameter, weight, and density parameters were not significant parameters because they were greater than the threshold value of 0.05. On the other hand, the curing time, ultrasonic P and S wave velocities, and apparent resistivity parameters were found to be significant. Therefore, UCS values were estimated by using the significant parameters in MLR analysis with high accuracy.

Originality

The most important innovation in this study is that it enables the estimation of UCS values from the MLR analysis by using ultrasonic P and S wave velocities and resistivity parameters together. In addition, different physical properties of the concrete are interpreted from the parameters used in MLR analysis. Therefore, an approach with a high correlation coefficient was made to the strength values determined by the destructive method by using non-destructive methods.

[†] Corresponding author: nevbaharsabbag@sdu.edu.tr, +90-246-211-1353

1. Giriş (Introduction)

Kompozit bir yapı olan beton malzemesinin dayanımı aranılan en önemli özelliğidir. Beton basınç dayanımı TEBD testi gibi tahribatlı yöntemler kullanılarak doğrudan belirlenebildiği gibi tahribatsız (hasarsız) yöntemler vasıtasıyla da dolaylı olarak belirlemek mümkündür (Uyanık, 2012; Uyanık ve Tezcan, 2012; Uyanık vd., 2012a; 2012b; 2012c; 2013; Uyanık, 2014; Jedidi, 2020; Yörübulut vd., 2020; Ekin, (2021a; 2021b); Ekin ve Uyanık, (2021a; 2021b); Arora vd., 2024; Singh vd., 2024). Günümüzde, hızlı, etkin, güvenilir ve daha az maliyetli tahribatsız deneyler ile elde edilen parametreler kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda beton dayanımına yaklaşım yapılması oldukça tercih edilen bir yöntem haline almıştır (Jain vd., 2013; Pucinotti, 2015; Amini vd., 2016; Bhosale ve Salunkhe, 2016; Rashid ve Waqas, 2017; Sabbağ ve Uyanık, (2017; 2018a)). Bu durumun en önemli nedeni, beton dayanımı belirlenirken tahribatlı bir şekilde yapıdan karot numunesi alınması esnasında yapı elemanlarında hem kesit hem de taşıma kapasitesi kayıplarına sebep olunmasıdır (Yörübulut vd., 2020).

Yerinde veya laboratuvarında ultrasonik yöntem gibi tahribatsız yöntemler kullanılarak beton dayanımına yaklaşım yapmak ve karot sayısını azaltmak amaçlanmalıdır (Öziçer ve Uyanık, 2017). Ayrıca, elektrik yöntemi kullanılarak belirlenen görünür özdirenç parametresi ile hem betonun dayanımı hem de nem içeriği, korozyon durumu gibi betona ait diğer birçok özelliğin belirlenmesi sağlanabilir (Wei vd., 2012; Sabbağ ve Uyanık, (2018a; 2018b)). Bu yöntemlerin ayrı ayrı kullanılmasının yanı sıra bir arada kullanılması da mümkündür ve bu durum elde edilen verilerin değerlendirilmesinde ve yorumlanmasında oldukça yararlı olmaktadır. Zira bir yöntemden elde edilen parametre beton içerisindeki özelliklerden bazılarında daha az etkilenirken, diğer bir yöntem bu durumdan çok daha fazla etkilenebilmektedir. Örneğin yerinde veya laboratuvarında yapılan ölçümlerde kür koşullarının dolayısıyla beton içerisindeki gözeneklerin sıvı veya hava dolgulu olmasının yanı sıra gözeneklerin miktarı, boyutu ve uzanım yönleri de dayanım üzerinde etkili olabilmektedir. Bu etki ultrasonik yöntemde daha az iken özdirenç yönteminde çok daha fazla olmaktadır (Sabbağ ve Uyanık, (2017; 2018a; 2020); Ekin, (2021a; 2021b); Ekin ve Uyanık, (2021a; 2021b)). Buna karşın ultrasonik yöntemde P dalgalarının yanı sıra S dalgalarının da belirlenmesi betonun elastik modüllerinin (elastisite modülü, kayma modülü ve bulk modülü) yanı sıra Poisson oranı, sismik hız oranı, beton içeriğinin kırıklı ya da çatlaklı olup olmadığı gibi durumların da ortaya konulmasını sağlayabilecektir (Uyanık ve Tezcan, 2012; Uyanık vd., 2012a; Sabbağ ve Uyanık, 2017). Cu ve Chen (2016) karbon fiber takviyeli iletken betonda iletkenlik ve hasar derecesi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu kapsamda özdirenç (iletkenliğin tersi) ve ultrasonik yöntemlerden yararlanmışlardır. Azarsa ve Gupta (2017) özdirenç ile betonun belirli dayanıklılık özellikleri arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır. Böylece, dış ortam (örneğin sıcaklık) ve beton karışımı gibi çeşitli etki eden parametrelerin özdirenç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öziçer ve Uyanık (2017) yerinde beton dayanımını belirlemek amacıyla İzmir’de mevcut binalar üzerinde yaptıkları çalışmada P dalga hızı ile TEBD arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sabbağ ve Uyanık (2017) düşük orta ve yüksek dayanımlı donatılı ve donatısız betonların P ve S dalga hızlarından beton dayanımını tahmin etmiştir. Amini vd. (2018), geçirgen betonun basınç dayanımını analiz etmek için istatistiksel modelleme yaklaşımını kullanmışlardır. Bu yaklaşım, analizde kritik parametreler olarak ultrasonik P dalga hızı ve boşluk oranı ölçümlerinin kullanımını kapsamaktadır. Sabbağ ve Uyanık (2018a) donatılı betonlarda özdirenç yönteminden beton dayanımının belirlenmesi esnasında kür koşullarının önemini ortaya koymuşlardır. Sertçelik vd. (2018) farklı beton türleri üzerinde yaptıkları çalışmada ultrasonik P dalga hızı, özdirenç, yüklenebilirlik ve TEBD arasında bir ilişki bulmaya çalışmışlardır. Sathiparan vd. (2024) geçirgen betonun özelliklerini tahmin etmek için ultrasonik P dalga hızı ve özdirenç yöntemini birlikte kullanarak elde ettiği parametreleri makine öğrenmesi tekniği ile değerlendirmişlerdir. Bu hedefte düşündüğümüzde beton dayanımına yaklaşım yapmak amacı ile birçok yöntemden elde edilen parametreler ile ampirik ilişkiler elde edilmektedir (Wei vd., 2012; Jain vd., 2013; Rashid ve Waqas, 2017; Sabbağ ve Uyanık, (2017; 2018a); Kouddane vd., 2024). Bu ilişkilere ek olarak mühendislik yapılarının analizi başta olmak üzere birçok alanda ÇDR analizi uygulanmaktadır. Çeşitli bağımsız değişkenlere dayalı olarak beton mukavemetini tahmin etmek için ÇDR kullanılmaktadır. Beton mukavemet tahmini bağlamında bu bağımsız değişkenler, kullanılan çimento türü, su-çimento oranı, agrega türü ve boyutu, kür süresi vb. gibi faktörleri içerebilir (Kalaycı, 2008; Subaşı vd., 2008; Durmuş ve Can, 2009; Başıyigit vd., 2012; Sabbağ ve Uyanık, 2017; Çakır vd., 2023).

Bu çalışmada bağımlı değişken olarak TEBD; bağımsız değişkenler olarak ise Ultrasonik boyuna (P) ve enine (S) hız değerleri, özdirenç (R), ölçüm zamanı (T), donatı çapı (D), ağırlık (A) ve yoğunluk (Y) kullanılarak ÇDR analizi ile düşük-orta dayanımlı donatılı betonların basınç dayanımı tahmin edilmeye çalışılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre ÇDR analizi yardımıyla anlamlı bulunan bütün parametreler bir arada kullanılarak beton basınç dayanımı İDR analizlerinden çok daha yüksek bir ilişki katsayısıyla elde edilebilmiştir (R^2 : 0.915).

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Farklı amaçlar için farklı mekanik özelliklere (basınç dayanım, çekme dayanımı, elastisite modülü, sünme, büzülme, termal genleşme, yangın dayanımı vs.) sahip olarak tasarlanabilen beton malzemesi agrega ve çimentonun, su ve gerektiğinde yardımcı kimyasal katkı maddeleri ile birleşmesinden oluşmaktadır. Beton günümüzde yapıların inşasında en çok kullanılan malzeme haline gelmiştir (Jedidi, 2020). Donatılı beton ise, beton ve içerisine yerleştirilmiş olan çelik (çubuklar veya ağ) gibi güçlendirici malzemelerden yapılmış bir kompozit materyaldir (Sabbag, 2016; Sabbag ve Uyanık, (2016; 2017; 2018a)). Donatılı betonların dayanım ve esneklik gibi mekanik özellikleri, hazırlanan karışım tasarımı, kür koşulları ve donatının türü, çapı ve miktarı gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenebilmektedir.

Çalışma kapsamında, 150 mm³ boyutundaki küp şeklindeki beton numuneler TS EN 12390-2 (2019) standardına göre hazırlanmıştır. Daha sonra, her bir beton numunesinde bir adet çapları 10 mm, 14 mm veya 20 mm ve boyu 250 mm olan donatı demiri tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilerek 3 adet düşük-orta dayanımlı (B1: 4-10 MPa, B2: 15-20 MPa ve B3: 25-35 MPa) beton tasarımına ait donatılı numuneler hazırlanmıştır. Toplam 74 adet numunenin yarısı su küründe (laboratuvarda 20±2°C'deki kür havuzlarında) ve yarısı da hava küründe (ortalama sıcaklığın 20° ve nemin %50 civarında olduğu çevre koşullarında) bekletilerek 7., 28. ve 90. günlerde üzerlerinde tahribatsız ve tahribatlı ölçümler yapılmıştır. Ölçü alım günlerinde numunelerin ağırlıkları ve yoğunlukları belirlenmiştir. Ardından tahribatsız bir şekilde özdirenç cihazları ile donatılı betonların özdirençleri belirlenmiş ve ultrasonik cihaz ile de P ve S dalga ölçümleri yapılarak dalga hızları hesaplanmıştır. Tahribatsız ölçümlerden sonra da TEBD ölçümleri yapılmıştır.

2.1. Tek Eksenli Basınç Dayanım (TEBD) Testi

Tek eksenli basınç dayanım testinde beton numunelerin uygulanan basınca karşı göstermiş olduğu direnç belirlenmektedir (Uyanık, 2014). Tek eksenli basınç testinde cihazın plakaları arasına yerleştirilen beton numuneler sıkıştırılarak kırılma anında uygulanan yük belirlenmekte ve yük/alan oranından dayanım değeri hesaplanmaktadır (Sabbag ve Uyanık, (2016; 2017; 2018a); Uyanık vd., 2019; Ekin, 2021; Singh vd., 2024). Bu test betonun basınç dayanımı kalitesinin ortaya konulmasını sağlayan en önemli parametredir. Basınç dayanımı, betonun yapım aşamasındaki yerleşme, sıkıştırma, kürlenme gibi koşullardan etkilendiği gibi kullanılan agrega malzemesinin özellikleri, su/çimento oranı, kür koşulları, donatı içeriği, tek eksenli basınç dayanım testinin yükleme hızı gibi birçok parametreden de etkilenebilmektedir (Jedidi, 2020). Mevcut yapılarda elde edilen basınç dayanımı ile laboratuvar ortamında hazırlanan betonların basınç dayanımları da bu sebeplerle birbirinden farklı çıkabilmektedir. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi (TEBD)'nden tahribatlı bir şekilde belirlenen basınç dayanımlarına tahribatsız yöntemlerle yaklaşımlar yapılarak alınacak karot sayılarının en aza indirgenmesi hedeflenmektedir (Öziçer ve Uyanık, 2017). Çalışma kapsamında hazırlanan donatılı numunelerin dayanımları TS EN 12390-3, (2019)'te belirtilen esaslara uygun olarak belirlenirken donatı bulunan yüzey yana gelecek şekilde kırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece cihaza zarar verilmesinin de önüne geçilebilmiştir.

2.2. Ultrasonik Yöntem

Malzeme içerisinden geçen ultrasonik dalganın geçiş süresinin ölçülmesi esasına dayanan bu yöntemde, dalganın geçiş mesafesinin ölçülen geçiş süresine oranı ultrasonik hızları vermektedir (Uyanık, (1999; 2012); Kouddane vd., 2022; Babacan vd., 2023). Boyuna veya birincil ultrasonik dalgası olarak bilinen P dalgası katı, sıvı ve gaz şeklindeki bütün ortamlarda yayılabilmektedir. Buna karşın, enine veya ikincil ultrasonik dalgası olarak bilinen S dalgası sadece katı ortamlarda yayılabilmekte, sıvı ve gaz gibi ortamlarda rijiditesi sıfır olduğu için yayılamamaktadır (Sabbag ve Uyanık, (2016; 2017)).

Donatılı beton bağlamında, uygulanan doğal veya yapay bir yük altında bulunan malzemenin yapısal bütünlüğünü ve davranışını değerlendirmek amacıyla ultrasonik hızlar önemli birer parametredir. Ultrasonik P ve S dalga hızları bir arada kullanılarak elastik modüller de bazı ampirik bağıntılardan hesaplanabilmektedir (Uyanık ve Tezcan, 2012; Uyanık vd., 2012a; Sabbag ve Uyanık, 2017). Yapılan çalışmada, küp şeklindeki donatılı numunelerde donatı demiri üst yüzeye gelecek şekilde karşılıklı iki yan yüzeyden OYO marka Sonic Viewer-SX ultrasonik cihaz ile P ve S dalgalarının seyahat süreleri ölçülmüştür. Küp şeklindeki numunelerin boyutu 15 cm³ tür. Buna göre, numune boyu-dalganın seyahat süresine oranlanarak ultrasonik hızlar hesaplanabilmıştır.

2.3. Özdirenç Yöntemi

Özdirenç, bir maddenin elektriksel akımın akışına direnme özelliğidir (Yoon ve Park, 2001). Beton üzerinde ölçü alınmasına olanak sağlayan bir portatif özdirenç cihazı (Proseq Resipod marka beton direnç ölçer) yardımıyla yapılan ölçümlerde 4 nokta elektrod sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde dışarıdaki iki elektrod vasıtasıyla uygulanan

akımın içerideki iki elektrod arasında oluşturduğu potansiyel ölçülerek bir bağıntı yardımıyla özdirenç değerleri hesaplanabilmektedir (Kim vd., 2011; Sabbağ, (2016; 2018a; 2018b)). Küp şeklindeki donatılı beton numuneleri üzerinde donatı çubuğu yan yüzeye gelecek şekilde bu ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Beton içindeki çelik donatının korozyon potansiyelini değerlendirmek amacıyla sıklıkla direnç ölçümleri kullanılmaktadır (Hornbostel vd., 2013; Azarsa ve Gupta, 2017; Yoon ve Chang, 2020). Ancak kür koşulları göz önünde bulundurularak beton dayanımının tahminine yönelik araştırma yapmak da mümkündür (Wei vd., 2012; Sabbağ ve Uyanık, 2018c; Shahmansouri vd., 2019; Ekin, 2021; Castillo ve Hedjazi, 2024). Çünkü, özdirenç değerleri betondaki gözeneklilik türü ve miktarından oldukça etkilenmektedir. Suya doygunluk arttıkça özdirenç değerleri azalırken, havaya doygunluk ile birlikte özdirenç değerleri de artmaktadır. Bu durumda, beton dayanımı ile özdirenç arasında yapılan ilişkilendirmelerde doğrusal bir ilişkiden söz edilmemelidir. Tam tersi doğrusal olmayan bir ilişki denklemi ile özdirenç değerlerinden beton dayanımına yaklaşım yapılması gerekir (Sabbağ ve Uyanık, 2018a).

2.4. Analizler

2.4.1. İkili Doğrusal Regresyon Analizi

İkili doğrusal regresyon analizinde bir bağımlı ve bir bağımsız değişken kullanılarak aralarında doğrusal bir ilişki belirlenmeye çalışılmaktadır. Böylece bağımsız değişken kullanılarak bağımlı değişkenin hesaplandığı ilişki denklemi, ilişki katsayısına (R^2) bağlı olarak sunulabilmektedir.

$$Y = b_0 + b_1X \quad (1)$$

Burada, Y : bağımlı değişken; X : bağımsız değişken; b_0 : sabit değer; b_1 : bağımsız değişkenle ilişkilendirilmiş katsayıdır.

Ölçülen ve hesaplanan regresyon çizgisi, eksik değerleri tahmin etmek veya kestirmek amacıyla kullanılabilir. Hesaplama en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Bunun temel sebebi, tüm veri noktaları ile en iyi uyum çizgisi arasındaki dikey mesafenin toplamını en aza indirmektir.

2.4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) Analizi

ÇDR, bağımlı bir değişken ve iki veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellemeyi içeren ikili doğrusal (linear) regresyonun bir uzantısıdır. Çoklu doğrusal regresyon için temel denklem Eşitlik (2)'de tanımlanmıştır.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n \quad (2)$$

Burada, Y : bağımlı değişken (yanıt); $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$: bağımsız değişkenler; b_0 : sabit değer; $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$: bağımsız değişkenlerle ilişkilendirilmiş katsayılarıdır.

Çoklu doğrusal regresyon analizinde bağımlı değişkenin belirlenmesi amacıyla kullanılacak en uygun bağımsız değişkenlerin belirlenmesi ve uygun olmayan önemsiz değişkenlerin kurulan modelden çıkarılması gerekmektedir (Alpar, 2003). Bu aşamadan sonra bağımlı değişken en iyi tahmin eden model kurularak bağımsız değişkenlerin her birinin bağımlı değişken üzerindeki etkileri incelenebilmektedir. Modelin etkinliği seçilen bağımsız değişkenlerin kalitesine ve alaka düzeyine bağlıdır (Kalaycı vd., 2008; Subaşı vd., 2010).

İstatistiksel olarak kullanılan parametrelerin anlamlılık seviyesi 0-1 aralığında değişmekte ve hipotezin kazara ortaya çıkma olasılığının ne kadar olası olduğunu gösterebilmektedir. α ile gösterilen anlamlılık derecesi için yapılan çalışmada kritik eşik değeri 0.05 olarak belirlenmiştir. Bu durumda şans eseri ortaya çıkabilecek olayların önüne geçilebilmektedir. α değerinin 0.05' ten küçük olması bu parametrelerin kurulan modelde önemli (anlamlı) olduğunu ve 0.05' ten büyük olması da istatistiksel olarak bu parametrelerin anlamlı olmadığını göstermektedir.

Analiz sonucunda belirlenen modele ait hesaplanan veriler ile ölçüm sonucu belirlenen bağımlı değişkene ait değerler karşılaştırılarak doğrusal (düz bir çizgi) biçiminde bir ilişki oluşturulmakta ve karekök hata değerine (R^2) bağlı olarak modelin tahmin aşamasındaki doğruluğu ortaya konulmaktadır. Bu parametrenin yanı sıra istatistiksel analizlerden elde edilen ortalama hata miktarlarının belirlenmesi de sınır değerlerinin ortaya konulabilmesi açısından değerlidir. Bu kapsamda, Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE), Hata Kareler Ortalaması (MSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) sırasıyla Eşitlik (3), (4) ve (5) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (5)$$

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışma kapsamında ultrasonik boyuna ve enine hız değerleri, özdirenç, ölçüm zamanı, donatı çapı, ağırlık ve yoğunluk parametrelerinin elde edilmesi amacıyla hazırlanan düşük-orta dayanımlı 3 adet beton tasarımı (B1, B2 ve B3)'na ait istatistiksel sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

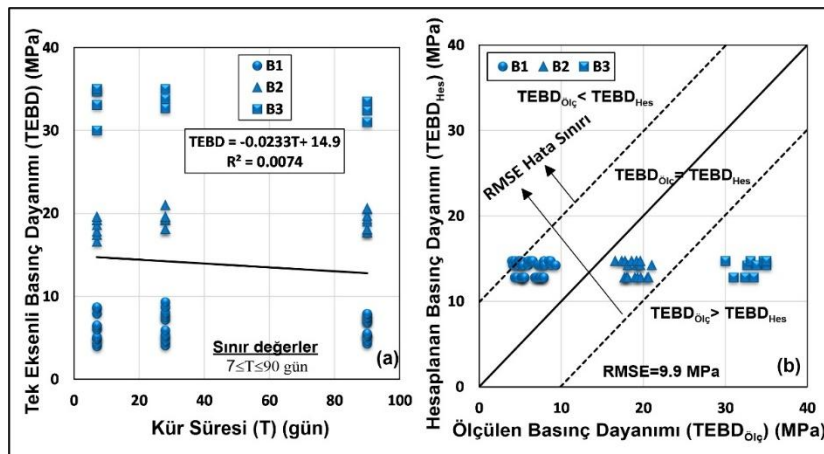
Buna göre, küp şeklindeki beton numunelerin ortalama ağırlık ve yoğunlukları sırasıyla 7980 gr ve 2.36 gr/cm³ 'tür. Donatılı beton numunelerin V_p hızları 3.030-4.878 km/s, V_s hızları 1.700-2.564 km/s ve Özdirenç değerleri 4.3-48 kohm.cm aralığında değişmektedir. Tek eksenli basınç dayanım testine göre betonların dayanımlarının ise 4-35 MPa aralığında değiştiği gözlenmiştir.

Tablo 1. Çalışma kapsamında kullanılan parametrelerin istatistiksel sonuçları
(Statistical results of the parameters used in the study)

Parametreler	Birimler	Min.	Max.	Ortalama	Std. Sapma	N
TEBD	MPa	4	35	13.831	9.969	74
T	gün	7	90	45.770	36.687	74
D	mm	10	20	14.811	4.173	74
A	gr	7390	8485.2	7979.75	260.08	74
Y	gr/cm ³	2.189	2.514	2.365	0.076	74
V _p	km/s	3.030	4.878	3.895	0.456	74
V _s	km/s	1.700	2.564	2.102	0.210	74
R	kohm.cm	4.3	48	17.652	13.707	74

T: Zaman; D: Donatı çapı; A: Ağırlık; Y: Yoğunluk; V_p: Boyuna dalga hızı;
Vs: Enine dalga hızı; R: Özdirenç; TEBD: Tek eksenli basınç dayanımı, N: Veri sayısı

Şekil 1-7'de bağımsız değişkenler ile beton dayanımı arasındaki İDR analizi ile belirlenen ikili ilişkiler ayrı ayrı sunulmuştur. 3 tasarıma ait veriler daire (B1), üçgen (B2) ve kare (B3) şeklinde ayrı ayrı şekillerle gösterilmiştir. Her şeklin içerisindeki (a)'da bağımsız değişken ve beton dayanımı arasındaki ilişki sunulurken (b)'de ise ölçülen basınç dayanımı ile (a) şeklinde kullanılan bağımsız değişkenden hesaplanan basınç dayanımı arasındaki ilişkiler sunulmuştur.

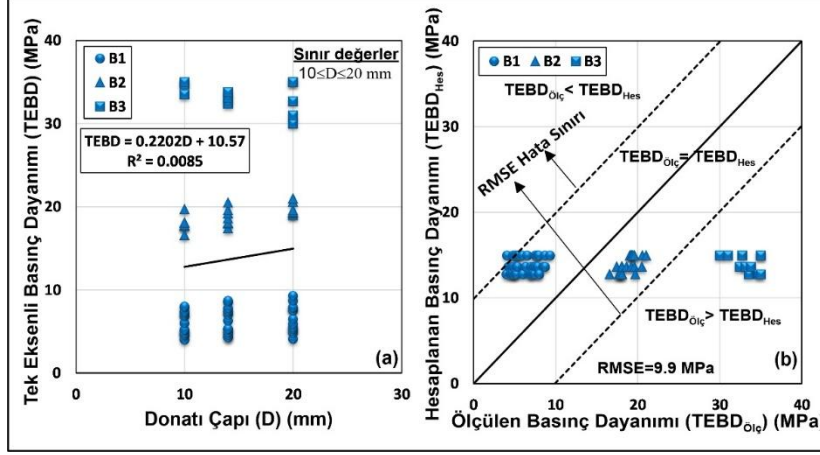


Şekil 1. a) Kür süresi ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve kür süresinden hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between curing time and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from curing time)

Normal şartlarda kür süresinin artışı ile beton dayanımının artması beklenir. Bu durumun oluşmasında gözeneklerin suya doygunluğunun da etkisi vardır (Sabbağ, 2016). Ancak yapılan çalışmada elde edilen Şekil 1 incelendiğinde kür süresi ile basınç dayanımı arasında ters yönlü bir doğrusal ilişki belirlenmiştir. İlişki

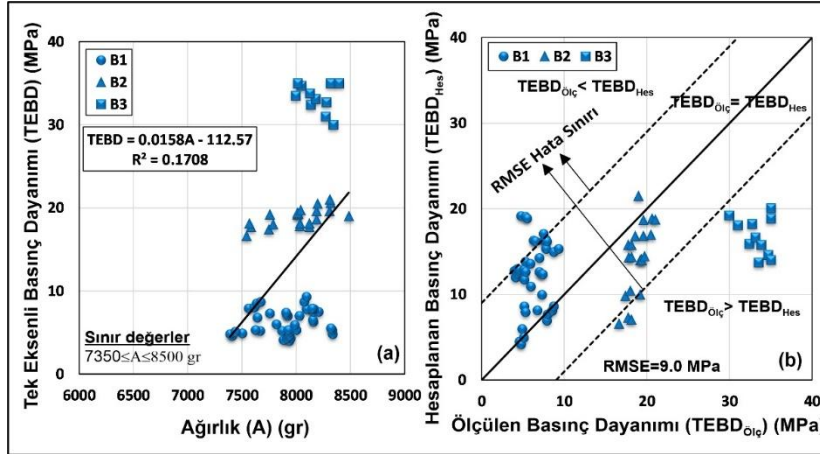
katsayısının çok düşük olması ve ölçülen ile hesaplanan basınç dayanımları arasında bir ilişkinin olmaması da bu iki parametre arasında doğrudan bir ilişki aramanın doğru olmadığını ortaya koymaktadır.

Şekil 2’de küp şeklindeki beton numunelerinin içerisindeki donatıların çaplarındaki artışa bağlı olarak basınç dayanımındaki değişim ortaya konulmuştur. Buna göre, donatı çapındaki artış ile beton dayanımı da artma eğilimi göstermiştir. Ancak kurulan ilişki denkleminde ilişki katsayısının oldukça düşük olduğu ve bu nedenle iki parametre arasında kurulan bu denklemin kullanımının doğru sonuçlar üretemeyebileceği düşünülmektedir.



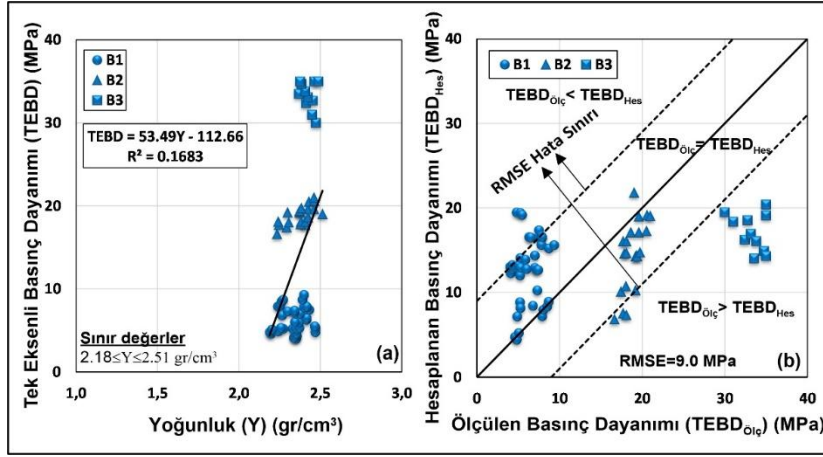
Şekil 2. a) Donatı çapı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve donatı çapından hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between reinforcement diameter and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from reinforcement diameter)

Şekil 3 ve 4’te numunelerin ağırlık ve yoğunluklarındaki artışa bağlı olarak beton dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Bu durumun oluşmasında gözenek miktarının da etkisi vardır. Düşük dayanımlı (B1 ve B2) betonlarda gözenek miktarı daha fazla olduğu için beton numunelerinin ağırlık ve yoğunlukları da düşük bulunacaktır. Orta dayanımlı (B3) betonlarda gözenek miktarı daha az olacağı için ağırlık ve yoğunlukları da daha fazla bulunacaktır.

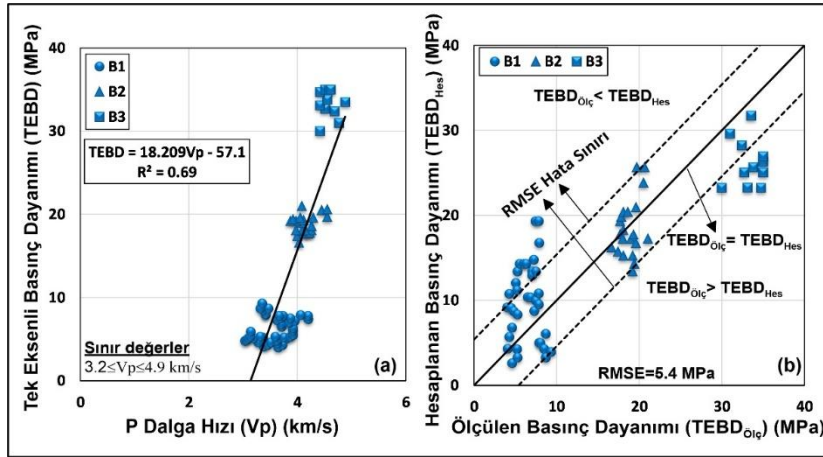


Şekil 3. a) Ağırlık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve ağırlıktan hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between weight and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from weight)

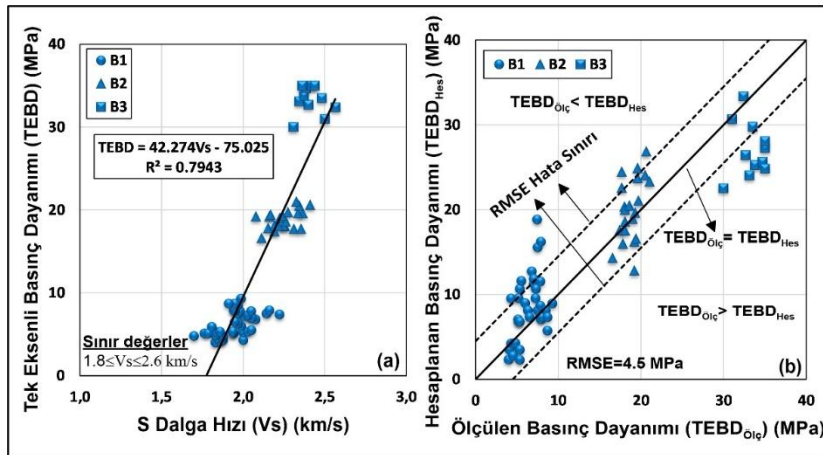
Ultrasonik P ve S dalga hızları ile beton dayanımı arasındaki ilişkiler Şekil 5 ve 6 ‘da sırasıyla verilmiştir. Buna göre, ultrasonik hızlar ile beton dayanımı arasında doğrusal yönde artan ilişkiler gözlenmiş, ultrasonik hızlar arttıkça basınç dayanımlarının da arttığı belirlenmiştir (V_p için: $R^2=0.69$ ve V_s için: $R^2=0.79$). Ayrıca, sismik hızlardan hesaplanan ve ölçülen basınç dayanımları diğer parametrelerdeki karşılaştırmalardan farklı olarak birbirine yakın çıkmıştır. Bu durumda, P ve S dalga hızlarından ayrı ayrı beton dayanımının belirlenebilir. Ayrıca, her iki dalga hızının bir arada kullanılması ile betona ait elastik parametreler ve Poisson oranı da belirlenebilir (Sabbag ve Uyanık, 2017).



Şekil 4. a) Yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve yoğunluktan hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between density and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from density)



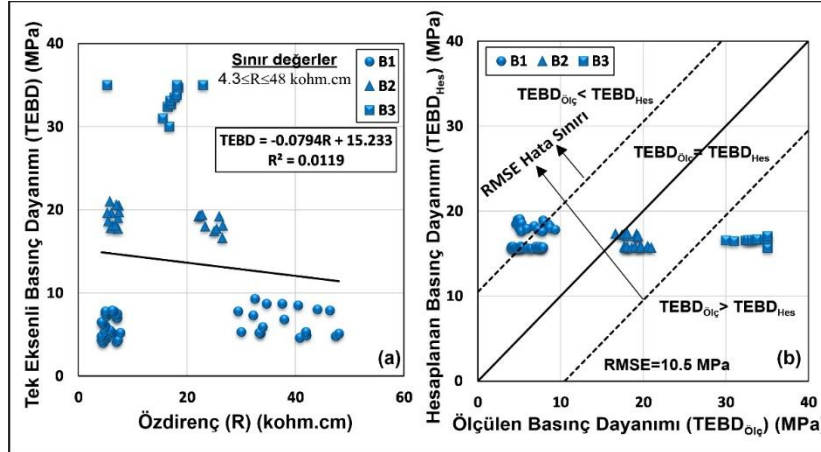
Şekil 5. a) P dalga hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve P dalga hızından hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between P wave velocity and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from P wave velocity)



Şekil 6. a) S dalga hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve S dalga hızından hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between S wave velocity and compressive strength b) relationship between measured and calculated compressive strengths from S wave velocity)

Şekil 7'de öz direnç yönteminden beton dayanımının elde edilmesi amacıyla kurulan ilişki grafiği görülmektedir. Buna göre öz direnç değeri arttıkça dayanım değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu şekilde bir ilişki kurulması doğrusallığın sağlanamaması nedeniyle doğru olmayacaktır. İlişki katsayısı da oldukça düşük bulunmuştur. Bu durumun asıl sebebi öz direncin betonlardaki gözenek doygunluğundan yani kür koşullarından oldukça etkilenmesidir. Suyu doygunluk arttıkça öz direnç değerleri azalırken, havaya doygunluk ile birlikte öz direnç değerleri de artış göstermektedir. Dolayısıyla öz direnç yönteminde kür koşullarının etkisiyle suya doygun

betonlarda artan, havaya doymun betonlarda ise azalan bir eğri ortaya çıkması beklenmektedir (Sabbağ ve Uyanık, 2018c).



Şekil 7. a) Özdirenç ve basınç dayanımı arasındaki ilişki b) ölçülen ve özdirençten hesaplanan basınç dayanımları arasındaki ilişki (a) Relationship between resistivity and compressive strength b) relationship between measured and compressive strengths calculated from resistivity)

ÇDR analizine başlamadan önce her bir bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında ayrı ayrı İDR analizleri yapılarak ilişki katsayılarındaki (R^2) değişim irdelenmiştir (Tablo 2). Buna göre, TEBD ile diğer parametreler arasında ayrı ayrı yapılan ilişkilendirmelerde ilişki katsayılarının (R^2) 0.005-0.753 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda her bir parametrenin ayrı ayrı ilişkilendirmesi yerinde hepsinin bir arada kullanılarak ÇDR analizi yapılmıştır. Böylece bütün parametrelerin denklemdaki anlamlılık düzeyleri de belirlenerek basınç dayanımı daha doğru tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 2. İkili regresyon analizi ($y=ax+b$) ile bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki denklemleri (Relationship equations between dependent and independent variables with binary regression analysis ($y=ax+b$))

Bağımsız Değişken	İlişki Denklemi ($y=ax+b$)	İlişki Katsayısı (R^2)
T	TEBD= -0.0233*T+14.9	0.0074
D	TEBD= 0.2202*D+10.57	0.0085
A	TEBD= 0.0158*A-112.57	0.1708
Y	TEBD= 53.49*Y-112.66	0.1683
Vp	TEBD= 18.209*Vp-57.1	0.6933
Vs	TEBD= 42.274*Vs-75.025	0.7943
R	TEBD= -0.0794*R+15.233	0.0119

Tablo 3. Model 1 özeti^a (a: bağımlı değişken: TEBD; b: bağımsız değişken: Y, T, Vs, D, R, Vp, A) (Model 1 summary^a (a: dependent variable: TEBD; b: independent variable: Y, T, Vs, D, R, Vp, A))

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Standart Hatası
1	0.964 ^a	0.929	0.921	2.803

Şekil 1-7' deki İDR analizi ile kullanılan bütün ikili ilişkilendirmelerin basınç dayanımının belirlenmesinde doğrudan kullanımı açısından bazı eksiklikler ya da yanlış değerlendirmelere yol açacağı ortaya konulmuştur. Örneğin sadece P hızı yerine P ve S hızlarının birlikte kullanımı ile elastik parametrelerin elde edilebilmesi mümkün olacaktır. Bunun yanı sıra özdirenç yönteminin de kullanımı ile gözeneklerdeki doygunluk durumunun beton dayanımına etkisi ortaya konulabilecektir. Dolayısıyla, oluşabilecek yanlış ya da eksik yorumlamaların önüne geçebilmek ve beton dayanımını yüksek doğrulukla belirleyebilmek amacıyla bütün parametreler bir arada değerlendirilerek basınç dayanımının çoklu regresyon analizi (ÇDR) ile tahmin edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda SPSS istatistik paket programında ÇDR analizi uygulanan 7 adet bağımsız değişken (Y, T, Vs, D, R, Vp, A) kullanılarak bir model oluşturulmuştur (Model 1). Burada modelin uygunluk göstergesi ilişki katsayısı (R^2) ile ifade edilmektedir ve R^2 değeri 1'e ne kadar yakın bulunursa modelin o kadar iyi olduğu sonucuna varılmaktadır (R^2 : 0.929). Düzeltilmiş R^2 değeri ise modeldeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki varyansının yüzde kaçını açıklayabildiğini gösteren bir parametredir ve bu değer 1'e yakın bulunmuştur

(Düzeltilmiş R^2 : 0.921). Tablo 3'de Model 1 özeti verilmiştir. Buna göre ilişki katsayısı (R^2) değeri 0.929 olarak bulunmuştur.

Tablo 4'te ÇDR analizi yardımıyla TEBD bağımlı değişkeninin belirlenmesi amacıyla 7 adet bağımsız değişken (Y, T, Vs, D, R, Vp, A) kullanılarak oluşturulan modele ait denklem katsayıları sunulmuştur.

Tablo 4. ÇDR analizinde model 1 denkleminin katsayıları (Coefficients for model 1 equation in the CDR analysis)

Model	Birimler	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	α (Anlamlılık Düzeyi)
		B	Standart Hata	Beta		
Sabit		-125.527	23.216		-5.407	0.000
T	gün	-0.069	0.009	-0.256	-7.341	0.000
D	(mm)	0.029	0.145	0.012	0.197	0.844*
A	(gr)	0.033	0.025	0.861	1.312	0.194*
Y	(gr/cm ³)	-93.281	86.242	-0.715	-1.082	0.283*
Vp	(km/s)	11.709	2.741	0.535	4.273	0.000
Vs	(km/s)	23.338	5.223	0.492	4.468	0.000
R	(kohm.cm)	0.273	0.044	0.376	6.240	0.000

T: Zaman; D: Donatı çapı; A: Ağırlık; Y: Yoğunluk; Vp: Boyuna dalga hızı; Vs: Enine dalga hızı; R: Özdirenç
* işareti ile gösterilen parametrelerin anlamlılık düzeyleri $\alpha > 0.05$ olduğu için Model 1'den çıkarılarak Model 2 kurulmuştur.

Tablo 4'teki B değeri, kullanılan bağımsız değişkenlerdeki 1 birim artışının bağımlı değişken TEBD'deki artış veya azalış miktarını göstermektedir. Tablodaki standart hata, B değerinin standart hata miktarıdır. Beta değeri ise B değerinin standartlaştırılmış halidir. Beta değeri bağımsız değişkendeki bir standart sapma artış veya azalışın TEBD'nin standart sapmasındaki artış veya azalışının göstergesidir. Ayrıca, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni tahmin etme aşamasındaki anlamlılık (önem) düzeyleri için t veya α değeri tercih edilebilmektedir. t değeri regresyon katsayılarının standart hatalara bölünmesi ile elde edilmektedir. Yapılan çalışmada anlamlılık düzeyi belirleme değeri olarak α değeri dikkate alınmıştır. Bu değer kurulan regresyon modelinin, rastgele bir dağılımdan anlamlı şekilde farklı olup olmadığını belirlemeye yararmaktadır. Eğer α değeri 0.05'ten küçükse, bağımsız değişkenlerden en az 1 tanesinin bağımlı değişken ile arasında anlamlı bir korelasyon ilişkisi var demektir. Örneğin, ağırlık (A) bağımsız değişkenindeki 1 birim artış TEBD üzerinde 0.033 birimlik bir artışa sebep olmaktadır. Bu değerinin standart hatası 0.025 olarak bulunmuştur. Yine ağırlık parametresinin standart sapmasındaki 1 birimlik artış TEBD değerinin standart sapmasında 0.861'lik bir artışa sebep olmaktadır. Ayrıca, t değeri kullanılarak yapılan hesaplamalarla belirlenen önem derecesi (anlamlılık düzeyi) 0.194 olarak bulunmuştur. Model 1 incelendiğinde T, Vp, Vs ve R bağımsız değişkenlerinin anlamlılık düzeyi $\alpha < 0.05$ olduğu için modele alınmıştır. Ancak, D, A, ve Y bağımsız değişkenlerinin anlamlılık düzeyi $\alpha > 0.05$ olduğu için bu değişkenlerin modele giremeyeceği anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda ikinci bir model (Model 2) kurulması sağlanmıştır. Tablo 5'te Model 2'nin özeti verilmiştir.

Tablo 5. Model 2 özeti^a (a: bağımlı değişken: TEBD; b: bağımsız değişken: T, Vp, Vs, R)
(Model 2 summary^a (a: dependent variable: TEBD; b: independent variable: T, Vp, Vs, R))

Model	R	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahminin Standart Hatası
2	0.957 ^a	0.915	0.911	2.98

Buna göre ilişki katsayısı (R^2) değeri 0.915 ve düzeltilmiş R^2 değeri 0.911 olarak bulunmuştur. Ölçülen ve hesaplanan TEBD değerleri kullanılarak Eşitlik 2, 3 ve 4 kullanılarak Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE) = 2.88 ve Hata Kareler Ortalaması (MSE) = 0.33, Ortalama Mutlak Hata (MAE) = 2.25 olarak hesaplanmıştır.

Model 2'de kullanılan bağımsız değişkenler ile elde edilen bağımlı değişken TEBD'nin kalıntı (rezidüel) analizinin istatistik sonuçları Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 7'de ÇDR analizi yardımıyla TEBD bağımlı değişkeninin belirlemek amacıyla 4 adet bağımsız değişken (T, Vp, Vs ve R) kullanılarak oluşturulan Model 2'ye ait denklem katsayıları sunulmuştur.

Tablo 6. Bağımlı değişken TEBD'nın kalıntı (rezidüel) analizinin istatistik sonuçları^a (a: bağımlı değişken: TEBD; b: bağımsız değişken: T, Vp, Vs, R) (Statistical results of residual analysis of dependent variable TEBD^a (a: dependent variable: TEBD; b: independent variable: T, Vp, Vs, R))

	Min.	Max.	Ort.	Std. Sapma	N
Tahmini değer	0.2585	34.6326	13.8311	9.5386	74
Rezidüel	-7.55075	7.14987	0.00000	2.89802	74
Std. Tahmini değer	-1.423	2.181	0.000	1.000	74
Std. Rezidüel	-2.533	2.399	0.000	0.972	74

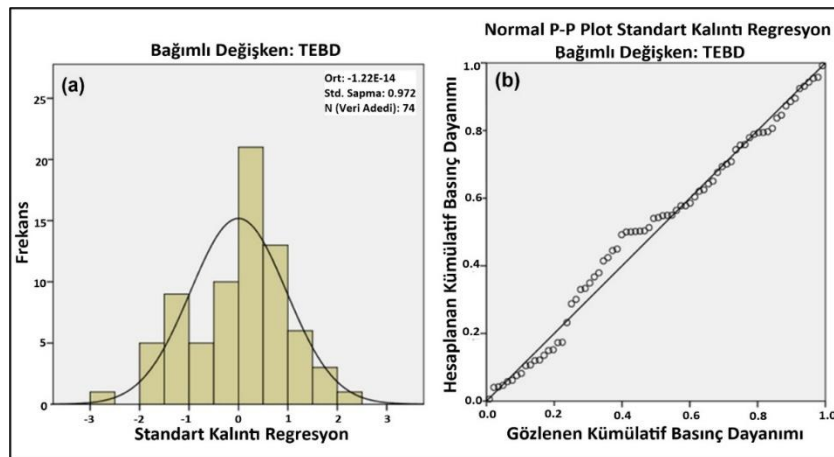
Tablo 7. ÇDR analizinde model 2 denkleminin katsayıları (Coefficients for model 2 equation in the CDR analysis)

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	α (Anlamlılık Düzeyi)
	B	Standart Hata	Beta		
Sabit	-85.888	3.880		-22.0136	0.000
T	-0.072	0.01	-0.266	-7.406	0.000
Vp	10.292	2.613	0.471	3.939	0.000
Vs	28.257	5.181	0.596	5.454	0.000
R	0.201	0.034	0.276	5.938	0.000

ÇDR analizi sonucunda bağımsız değişkenler kullanılarak bağımlı değişken TEBD değeri Eşitlik 6'dan hesaplanmıştır. Bu eşitliğin geçerli olduğu sınır değerler $3.2 \leq Vp \leq 4.9$ km/s; $1.8 \leq Vs \leq 2.6$ km/s; $4.3 \leq R \leq 48$ kohm.cm ve $7 \leq T \leq 90$ gün şeklindedir.

$$TEBD = -85.89 + 10.29 * Vp + 28.26 * Vs + 0.2 * R - 0.07 * T \quad (6)$$

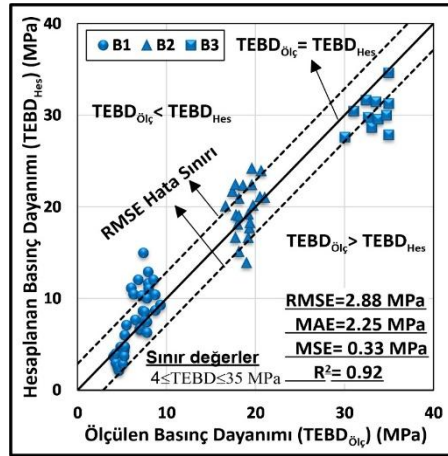
Normallik testi yapılması amacıyla bağımlı değişken olan tek eksenli basınç dayanımının frekans dağılımı Şekil 8'deki regresyon standartlaştırılmış kalıntı histogramında verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametreler arasındaki farklılık kalıntı olarak adlandırılmaktadır. Kalıntıların analizi, regresyon modelinin doğrulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Frekans dağılımı her dayanım türündeki toplam sayıyla birlikte verilerin türlerini veya aralıklarını göstermektedir. Frekans dağılımına ait histogram grafiği hataların normal dağılması ön koşulunun sağlanması amacıyla çan eğrisi şeklinde dağılmalıdır. Şekil 8a'daki frekans dağılımı incelendiğinde verilerin normal dağıldığı belirlenmiştir. Ek olarak, regresyon standartlaştırılmış kalıntısının da normal dağıldığı, gözlemlenen ve hesaplanan değerlerin herhangi bir önemli sapma olmaksızın regresyon çizgisi boyunca dağıldığı bulunmuştur (Şekil 8b).



Şekil 8. Bağımlı değişken TEBD'nın normallik testi (Normality test of dependent variable UCS)

Eşitlik 6 kullanılarak ÇDR analizi ile oluşturulan modele ait %95 güven aralığında hesaplanan basınç dayanım değerleri ile tek eksenli basınç dayanım testi ile ölçülen basınç dayanım değerleri karşılaştırılması RMSE hata sınırları içerisinde Şekil 9'da gösterilmiştir.

Buna göre ölçülen ve bağımsız değişkenler olarak belirlenen T, Vp, Vs ve R parametreleri kullanılarak hesaplanan TEBD değerleri özellikle B2 (15-20 MPa) ve B3(25-35 MPa) tasarımlarında birbirine oldukça yakın bulunmuştur ($R^2=0.915$). Ölçülen ve hesaplanan verilerin karşılaştırılmasındaki en büyük sapmanın ise 4-10 MPa aralığında düşük dayanımlı B1 tasarımında olduğu gözlenmiştir. Bu farklılıkların özdirençin gözeneklerdeki sıvı dolgusundan etkilenmesi sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, veri sayısının B1 tasarımında en fazla olmasının da bu duruma yol açmış olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 9. Ölçülen ve hesaplanan basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması
(Comparison of measured and calculated compressive strength values)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapılan çalışmada İDR ve ÇDR analizi ile farklı kür koşullarındaki düşük-orta dayanımlı donatılı betonların basınç dayanımları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle İDR analizi ile her bir bağımsız değişken (ultrasonik boyuna ve enine dalga hızları, özdirenç, ölçüm zamanı, donatı çapı, ağırlık ve yoğunluk) ile bağımlı değişken olan TEBD arasında ikili ilişkilendirmeler yapılmıştır. Bunun sonucunda ilişki katsayılarının (R^2) 0.0074-0.7943 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, betonlardaki doymunluk türünün beton dayanımına etkisi ve elastik parametrelerin belirlenmesi gibi durumların ortaya konulabilmesi amacıyla tahribatsız yöntemler bir arada kullanılarak beton dayanımı ÇDR analizinden yüksek doğrulukla tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında ÇDR analizinde oluşturulan Model 1'de kullanılan ağırlık, yoğunluk, donatı çapı parametrelerinin anlamlılık düzeyi düşük ($\alpha > 0.05$) bulunduğu için bu parametrelerin TEBD üzerinde etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (anlamlılık derecesi sırasıyla α : 0.194, 0.283, ve 0.844). Bu kapsamda bağımsız değişkenler olan ağırlık, yoğunluk, donatı çapı Model 1'den (R^2 : 0.921) daha sonra çıkartılarak yeni bir model (Model 2) oluşturulmuştur (R^2 : 0.911).

Anlamlılık düzeyinin iyi ($\alpha < 0.05$) olduğu belirlenen bağımsız değişkenlerin (T, Vp, Vs ve R) kullanılması ile (T, Vp, Vs ve R için anlamlılık dereceleri α : 0.000) tahribatsız bir şekilde elde edilen parametreler kullanılarak Model 2 oluşturulmuştur. Bu durumda kür süresi, Vp ve Vs hızı ile özdirenç parametrelerinin basınç dayanım üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Ölçülen ve Model 2'deki Eşitlik 5'ten hesaplanan tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucunda başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür (RMSE: 2.88, MAE: 2.25, MSE: 0.33, ve R^2 : 0.92).

Ultrasonik P dalga hızının tek başına kullanımı yerine P ve S dalga hızlarının birlikte kullanımı beton dayanımının yanı sıra betona ait özellikler olan ve inşaat hesaplamalarında oldukça önemli olan elastik parametrelerin (elastisite modülü, kayma modülü, bulk modülü ve Poisson oranı) elde edilebilmesini sağlamaktadır.

Kür koşullarının özdirenç üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Kür koşullarının etkisiyle gözeneklerdeki doymunluk durumuna bağlı özdirenç değişmektedir ve bu durumun beton dayanımına etkisi ortaya konulmuştur. Yani betondaki gözeneklerin suya doymunluğu arttıkça özdirenç değerleri düşmekte, havaya doymunluk ile artmaktadır. Bu durumda sadece suya doymunluk göz önüne alındığında özdirenç arttıkça beton dayanımının da arttığı görülmektedir. Ancak betondaki gözeneklerin hava ile doymun olması durumunda özdirenç arttıkça beton dayanımının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 7a). Dolayısıyla, beton dayanımının özdirençten belirlenmesi esnasında gözeneklerin doymunluk türünün de göz önünde bulundurulması şarttır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Makalenin gelişmesine yaptığı katkılardan dolayı Prof. Dr. Osman UYANIK 'a çok teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Alpar, R., 2003. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş. 1. 2. Baskı, Nobel Basımevi, Ankara.
- Amini, K., Jalalpour, M., Delatte, N., 2016. Advancing Concrete Strength Prediction Using Nondestructive Testing: Development and Verification of A Generalizable Model. *Constr. Build. Mater.*, 102, Part 1 762-768.
- Amini, K., Wang, X., Delatte, N., 2018. Statistical Modeling of Hydraulic and Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Nondestructive Tests. *J. Mater. Civ. Eng.*, 30 (6), 04018077.
- Arora, H.C., Bhushan, B., Kumar, A., Kumar, P., Hadzima-Nyarko, M., Radu, D., Cazacu, C.E., Kapoor, N.R., 2024. Ensemble Learning Based Compressive Strength Prediction of Concrete Structures Through Real-Time Non-Destructive Testing. *Sci Rep* 14, 1824
- Azarsa, P., Gupta, R., 2017. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*. Article ID 8453095, 30 p.
- Babacan, A.E., Karşlı, H., Şenkaya, M. 2023. Picking of First Arrival Times on Noisy Ultrasonic S-Wave Signals for Concrete and Rock Materials. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 58(4), 631-648.
- Başığit, C., Akkaş, A.K., Kurtarıcı, M.N., 2012. Betonların Radyasyon Zırh Kalınlıklarının Yapay Sinir Ağları ve Çoklu Regresyon Metotları ile Tahmini. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(1): 77-81.
- Bhosale, N., Salunkhe. P.A., 2016. To Establish Relation between Destructive and Nondestructive Tests on Concrete. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci* 4(2): 634-644.
- Castillo, D., Hedjazi, S., 2024. Application of Electrical Resistivity for Estimating Compressive Strength of FRC at Early-Ages. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 9(1).
- Chu, H.Y., Chen, J.K., 2016. The Experimental Study on the Correlation of Resistivity and Damage for Conductive Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 67, 12-19.
- Çakır, D., Genç, O., Cansız, Ö.F., 2023. Beton Basınç Dayanımının Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Çok Değişkenli Regresyon Analizi ile Tahmin Edilmesi. *2nd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, April 4-6, Konya, Turkey, 493-499.
- Durmuş G., Can, Ö., 2009. Yüksek Sıcaklık Uygulanmış Katkılı Betonun Bulanık Mantık ve Regresyon Yöntemiyle Basınç Dayanımının Tahmini. *Politeknik Dergisi*, 12(3): 195-200.
- Ekin, N., 2021a. Relationship between Amplitude Anisotropy and Compressive Strength of Reinforced Concrete Depending on Curing Conditions. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 28(3), 286-299.
- Ekin, N., 2021b. Concrete Anisotropy Estimated from Ultrasonic Signal Amplitudes. *Materials Testing*, 63(12), 1164-1173.
- Ekin, N., Uyanık, O., 2021a. Anisotropy of Reinforced Concrete from Geophysical Methods. *Science of Sintering*, 53(3), 323-345.
- Ekin, N., Uyanık, O., 2021b. Comparison of Static and Dynamic Elastic Moduli in Concrete: Effects of Compressive Strength, Curing Conditions and Reinforcement. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Eng.*, 45, 2327-2343.
- Hornbostel, K., Larsen, C.K., Geiker, M.R., 2013. Relationship between Concrete Resistivity and Corrosion Rate—A literature Review. *Cement and Concrete Composites*, 39, 60-72.
- Jain, A., Kathuria, A., Kumara, A., Vermaa, Y., Muraria, K., 2013. Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. *The 2nd Int. Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, Procedia Engineering*, 54, 241-251.
- Jedidi, M., 2020. Determination of Concrete Characteristics Using Destructive and Non-Destructive Tests. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, ISSN: 2643-6876, DOI: 10.33552/CTCSE.2020.06.000627
- Kalaycı, Ş., 2008. SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri. Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 3. Baskı, Ankara, 426s.
- Kim, J.H., Yoon, H.-K., Cho, S.-H., Kim, Y.S., Lee, J.-S., 2011. Four Electrode Resistivity Probe for Porosity Evaluation. *ASTM International West Conshohocken, PA, USA*.
- Kouddane, B., Sbartai, Z.M., Alwash, M., Benyahia, K.A., Elachachi, S.M., Lamdouar, N., Kenai, S., 2022. Assessment of Concrete Strength Using the Combination of NDT—Review and Performance Analysis. *Applied Sciences*. 12. 12190. 10.3390/app122312190.
- Özicer, S., Uyanık, O., 2017. Beton Dayanımının Yerinde P Dalga Hızından Belirlenmesi ve İzmir Örneği. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 9(1), 1-16.
- Pucinotti, R., 2015. Reinforced Concrete Structure: Non-Destructive in Situ Strength Assessment of Concrete. *Construction and Building Materials* 75,331-341.
- Rashid, K., Waqas, R., 2017. Compressive Strength Evaluation by Non-Destructive Techniques: An automated Approach in Construction Industry. *Journal of Building Engineering*, 12, 147-154, ISSN 2352-7102.
- Sabbağ, N., 2016. Beton kalitesinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Müh. Anabilimdalı, Doktora Tezi*, 172.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2016. Time-Dependent Change of Seismic Velocities on Low Strength Concrete. *The Online Journal of Science and Technology*, 6(4), 49-57.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2017. Prediction of Reinforced Concrete Strength by Ultrasonic Velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23.

- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2018a. Determination of the Reinforced Concrete Strength by Apparent Resistivity Depending on The Curing Conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 155, 13- 25.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2018b. Doygun Betonların Statik ve Dinamik Elastik Parametrelerinin Karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(017201), 1181-1189.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2018c. Determination of Reinforced Dry Concrete Strength by Electrical Resistivity Method. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1230-1236.
- Sabbağ, N., Uyanık, O., 2020. Özdirenç yöntemi kullanılarak donatılı betonların anizotropisinin belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 572-580.
- Sathiparan, N., Jeyanthan, P., Subramaniam, D.N., 2024. Surface Response Regression and Machine Learning Techniques to Predict the Characteristics of Previous Concrete Using Non-Destructive Measurement: Ultrasonic Pulse Velocity and Electrical Resistivity, *Measurement*, 225, 114006, ISSN 0263-2241.
- Sertçelik, I., Kurtuluş, C., Sertçelik, F., Pekşen, E., Aşçı, M., 2018. Investigation into Relations between Physical and Electrical Properties of Rocks and Concretes, *IOP Publishing, J. Geophys. Eng.* 15, 142–152.
- Shahmansouri, A., Bengar, H., Jahani, E., 2019. Predicting Compressive Strength and Electrical Resistivity of Eco-Friendly Concrete Containing Natural Zeolite Via GEP Algorithm. *Construction and Building Materials*, 229, 116883.
- Singh, S., Alhussainy, A.K., Panduri, B., Rajalakshmi, B., Gupta, M., Singh, H., Reddy, G.C., 2024. Compressive Strength Prediction Model of High Strength Concrete by Destructive and Nondestructive Technique, *E3S Web Conf. 16th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2024)* 552 01111, DOI: 10.1051/e3sconf/202455201111
- Subaşı, S., Beycioğlu, A., Çullu, M., 2010. Bulanık Mantık ve İstatistiksel Analiz Yöntemleri ile Revibrasyon Uygulanmış Betonlarda Basınç Dayanımı Tahmini. *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 2(3): 46-52.
- Subaşı, S., Kap, T., Beycioğlu, A., Emiroğlu, M., 2008. Hafif Betonlarda Basınç Dayanımlarının Tahmin Edilmesinde Kullanılan Farklı Tahmin Metotlarının Karşılaştırılması. *Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu- BMYS'2008*, 15-17 Ekim 2008 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 1053-1062.
- TS EN 12390-2., 2019. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3., 2019. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- Uyanık, O., 1999. Kayaçlarda Ultrasonik Hızlar ve Kayma Direncinin İncelenmesi. 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 63-70.
- Uyanık, O., 2012. Ultrasonik Hızlardan Beton Dayanımının Belirlenmesi. *Jeofizik Bülteni*, 23(70), 25-30.
- Uyanık, O., 2014. Jeofizik ve Klasik Yöntemlerle Yapı İncelemeleri (Yapı Jeofiziği). *JFMO Eğitim Yayınları*, No:19 ISBN:978-605-01-0643-5.
- Uyanık, O., Tezcan, S., 2012. Determination of Concrete Strength by Ultrasonic Method. *Geophysical Bulletin*, 41–45.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B., Uyanık, N.A., Öncü, Z., Sabbağ, N., 2012a. Determination of Concrete Quality of Reinforced Concrete Structures from Seismic Ultrasonic Velocities in Urban Transformation Projects. 1st Earth Sciences Symposium, 18-20.
- Uyanık, O., Çatlıoğlu, B., Sabbağ, N., Öncü, Z., Uyanık, N.A., 2012b. Kayaçların Fiziksel Özellikleri ile Ultrasonik Ultrasonik Hızlar Arasındaki İlişkilendirmeler. 1. Yerbilimleri Sempozyumu, 165-169.
- Uyanık, O., Gülay, F.G., Tezcan S., 2012c. Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. *Hazır Beton*, 82-85.
- Uyanık, O., Sabbağ, N., Uyanık, N.A., Öncü, Z., 2019. Prediction of Mechanical and Physical Properties of Some Sedimentary Rocks from Ultrasonic Velocities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 6003-6016.
- Uyanık, O., Şenli, G., Çatlıoğlu, B., 2013. Binaların Beton Kalitesinin Tahribatsız Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi, *SDÜ Uluslararası Teknoloji Bil. Dergisi*, 5(2), 156-165.
- Wei, X., Xiao, L., Li, Z., 2012. Prediction of Standard Compressive Strength of Cement by the Electrical Resistivity Measurement, *Constr. Build. Mater.*, 31, 341-346.
- Yoon, I.S., Chang, C., 2020. Effect of Chloride on Electrical Resistivity in Carbonated and Non-Carbonated Concrete. *Applied Sciences*. 10. 6272. 10.3390/app10186272.
- Yoon, G.L., Park, J.B., 2001. Sensitivity of Leachate and Fine Contents on Electrical Resistivity Variations of Sandy Soils. *J. Hazard. Mater.*, 84,147-161.
- Yörübulut, S., Doğan, O., Erdugan, F., Yörübulut, S., 2020. Tahribatsız Yöntem Verileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağı ve Regresyon Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Tahmin Edilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2): 769-776.



INVESTIGATION OF WASTE TRANSFORMER OIL/BIODIESEL/DIESEL TRIPLE FUEL MIXTURE IN SEARCH OF ALTERNATIVE FUEL

Tuba KARACA¹, Tuba Hatice DOĞAN^{2*}

^{1,2} Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Erzurum, Turkey

Keywords	Abstract
<i>Alternative Fuel, Waste Transformer Oil, Biodiesel, Diesel, Triple Mixture.</i>	In this study, triple fuel mixtures were formed by using biodiesel, which is a clean and sustainable fuel produced from waste frying oils (WFO), waste transformer oil (WTO), which is an important waste of electrical transformers and has similar properties to diesel fuel and commercially purchased diesel fuel. Detailed characterization of each component in the mixture was also made. The diesel fuel ratio was kept to a minimum (10% by volume) and the waste transformer oil ratio was mixed at rates ranging from 20% to 100% by volume while creating the triple mixtures. In this study, in which wastes are evaluated and alternative fuel is produced in this way, some important fuel properties of six different fuel mixtures prepared were compared with EN/ASTM standards. Optimum triple fuel mixtures complying with these standards have been determined.

ALTERNATİF YAKIT ARAYIŞINDA ATIK TRAFÖ YAGI/BİYODİZEL/DİZEL ÜÇLÜ YAKIT KARIŞIMININ İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Alternatif Yakıt, Atık Trafo Yağı, Biyodizel, Dizel, Üçlü Karışım.</i>	Bu çalışmada, atık kızartma yağlarından (WFO) üretilen, temiz ve sürdürülebilir bir yakıt olan biyodizel, elektrik transformatörlerinin önemli bir atığı olan ve dizel yakıtına benzer özelliklere sahip olan atık transformatör yağı (WTO) ve ticari olarak satın alınan dizel yakıt kullanılarak üçlü yakıt karışımları oluşturulmuş, karışımdaki her bileşenin ayrıntılı karakterizasyonu da yapılmıştır. Üçlü karışımlar oluşturulurken dizel yakıt oranı minimumda tutulmuş (hacimce %10) ve atık trafo yağı oranı hacimce %20 ile %100 arasında değişen oranlarda karıştırılmıştır. Atıkların değerlendirilerek alternatif yakıt üretildiği bu çalışmada, hazırlanan altı farklı yakıt karışımının bazı önemli yakıt özellikleri EN/ASTM standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu standartlara uygun olan optimum üçlü yakıt karışımları belirlenmiştir.

Alıntı / Cite

Karaca, T., Doğan, TH., (2025). Investigation of Waste Transformer Oil/Biodiesel/Diesel Triple Fuel Mixture in Search of Alternative Fuel, Journal of Engineering Science and Design, 13(1), 78-89.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
T. Karaca, 0000-0002-8016-3736	Başvuru Tarihi / Submission Date 25.09.2024
T.H. Doğan, 0000-0001-8369-9416	Revizyon Tarihi / Revision Date 22.11.2024
	Kabul Tarihi / Accepted Date 28.11.2024
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: hatice@atauni.edu.tr, +90-442-231-4560

INVESTIGATION OF WASTE TRANSFORMER OIL/BIODIESEL/DIESEL TRIPLE FUEL MIXTURE IN SEARCH OF ALTERNATIVE FUEL

Tuba KARACA¹, Tuba Hatice DOĞAN^{2†}

^{1,2}Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Erzurum, Turkey

Highlights

- An alternative fuel to diesel has been produced
- Different ratios of biodiesel/waste transformer oil/diesel triple mixtures were prepared
- Some important fuel properties of triple fuel blends were investigated
- Optimum triple fuel mixtures complying with relevant standards have been determined

Purpose and Scope

The aim of this study is to produce an alternative fuel to reduce the consumption of diesel fuel, which is a fossil-based, exhaustible fuel. For this purpose, it is to investigate the alternative feasibility of triple fuel mixtures prepared with biodiesel, a clean, sustainable fuel, and waste transformer oil, a waste oil with similar properties to diesel.

Design/methodology/approach

Waste transformer oil supplied from an electricity company, WFO collected from homes and commercially purchased diesel fuel were first characterized through various analyses. Some important fuel properties such as density, kinematic viscosity, heat value, pour and cloud point, acid value, ash and sulfur content of the triple fuel mixtures prepared by keeping the diesel fuel ratio to a minimum (10% by volume) were determined and these properties were compared with EN/ASTM standards. Optimum mixing ratios meeting these standards were determined.

Findings

According to the findings of the study, three triple fuel mixtures were identified as optimum blends considering their compliance with EN/ASTM standards.

Social Implications

This research provides significant contributions to the environment, economy and scientific literature by evaluating waste and reducing diesel fuel consumption.

Originality

In this study, a triple fuel mixture in which wastes were evaluated was developed as an alternative to fossil-based diesel fuel. The compliance of this fuel with the standards was tested. No study was encountered in the literature investigating the alternative feasibility of such a triple fuel.

[†] Corresponding author: hatice@atauni.edu.tr, +90-442-231-4560

1. Introduction

A large part of the energy needed in the world is met from fossil fuels. The limited reserves of these fuels, the serious damage to the environment and the significant increases in oil prices are their most important disadvantages. The unequal distribution of fossil fuels all over the world also causes some economic and political crises among countries. Considering all these disadvantages, researchers are now looking for alternative fuels (Sathish et al., 2023). Many researchers are doing research concerned with the production of alternative fuels from bio-based waste oils such as waste frying oil (Yusuff et al., 2022; Doğan, 2016), waste animal tallow (Öner and Altun, 2009; Rosson et al., 2021) and fossil-based waste oils such as waste motor oil (Dordic et al., 2021) and waste transformer oil (Nabi et al., 2013; Ajay and Viswanath, 2020).

Transformer oils are remarkable oils as an alternative fuel. Their waste potential and calorific value are quite high and they have properties similar to diesel fuel (Behera and Murugan, 2013). The process in the transformer of transformer oils, which is a mineral oil obtained from the refining of crude oil, which is used for cooling in electrical transformers and has very high insulation properties, causes water to form in it. With the increase in the water content of the transformer oil over time, unwanted oxidation reactions occur in the oil and the physicochemical properties of the oil deteriorate. As a result of this process, called oil aging, oil is separated as waste (Dmitriev et al., 2019).

Tons of transformer oil are separated as waste every year. These oils are usually incinerated and have no known significant use. They create significant pollution when thrown into the environment. Considering all these features, waste transformer oils can be considered as fuel, and in this way, significant contributions can be made to both the environment and the economy, considering the high prices of fuel raw materials (Yadav et al., 2020; Vershinina et al., 2018).

The high viscosity of these oils, which seems to be a good alternative fuel, prevents their use as a alone fuel. For this reason, many researchers have used waste transformer oil by mixing it with different fuels in certain proportions. In particular, it is widely used by mixing it with biodiesel, which is a clean, biodegradable, environmentally friendly and renewable fuel produced from vegetable and animal oils (Yadav and Saravanan, 2015; Qasim et al., 2019). In a study, waste transformer oil and biodiesel mixtures in different ratios (B10, B20, B30, B40 and B100) were investigated as an alternative to diesel fuel. The prepared mixtures were tested in a single-cylinder engine and performance and emission evaluations were made and it was concluded that B30 is the best among all mixtures (Ajay and Viswanath, 2020). In another study, transesterified waste transformer oil was mixed with biodiesel produced from waste canola oils at a ratio of 50:50 by volume, and this mixture was then mixed with diesel in different ratios. Engine tests of fuel mixtures called biodiesel-like fuel (BLF) were made and combustion, performance and emission characteristics of these fuels were examined (Qasim et al., 2017). Behera and Murugan examined the engine performance, combustion and emission characteristics of waste transformer oil-diesel mixtures in a compression ignition engine. It was found that when 100% waste transformer oil was used, the characteristics of the engine deteriorated and the optimum mixture was 40% waste transformer oil and 60% diesel mixture (Behera and Murugan, 2013). There are many studies in the literature investigating different fuel mixtures as alternative fuels. However, there is not encountered study on triple fuel mixture using diesel, biodiesel and waste transformer oil.

In this study, triple fuel mixtures consisting of biodiesel, waste transformer oil (WTO) and diesel in different ratios were prepared and some important fuel properties (density, kinematic viscosity, heat value, pour and cloud point, acid value, ash and sulfur content) of these mixtures were investigated. The ratio of diesel fuel, which has increased in value due to decreasing oil reserves, has been kept to a minimum while preparing triple fuel mixtures. Biodiesel, a clean and renewable energy source, was produced from waste frying oils. In this way, waste oils were evaluated and the environmental damage of the triple fuel mixture was tried to be reduced. Waste transformer oils were also evaluated. In this way, the optimum mixing ratio showing the best fuel properties was determined.

2. Materials and Method

2.1. Materials

Waste transformer oils (Figure 1-a) were obtained from an electricity distribution company in Erzurum, Turkey. Diesel fuel was purchased commercially from a fuel company located in Erzurum. Waste frying oils (Figure 1-b) used to produce biodiesel were collected from different houses. Methanol and potassium hydroxide used in biodiesel production were obtained from Merck and Lach-Ner, respectively. The potassium hydroxide solution (0.1 N) in ethanol (Merck) was used to analyze the acid value. Coulometric anode and cathode solutions (Cou-Lo Formula A and Cou-Lo Formula C, GRScientific, U.K.) were used to analyze the water content.

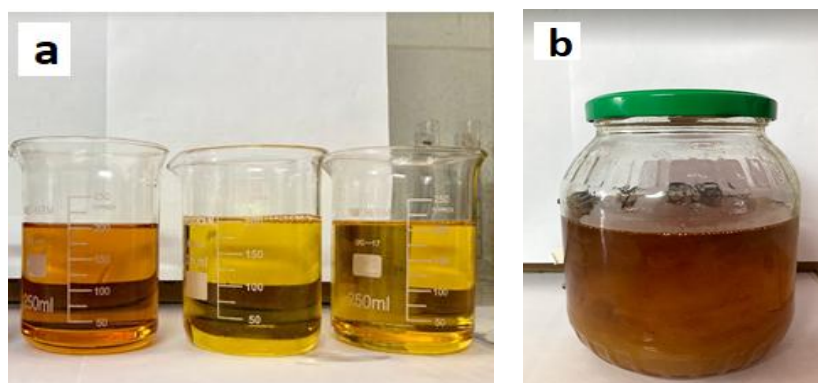


Figure 1. a) Waste transformer oil, b) waste frying oil

2.2. Characterization of Waste Transformer Oil, Waste Frying Oil and Diesel Fuel

The characterization of waste transformer oil (WTO), waste frying oil (WFO) and diesel fuel was carried with the analyzes given in Table 1.

Table 1. Performed analyzes for the characterization of WTO, WFO and diesel.

Type	Analysis
Waste Transformer Oil (WTO)	Density, kinematic viscosity, pour and cloud point, heat value, sulfur, ash and water content
Waste Frying Oil (WFO)	Density, iodine number, saponification number, acid value and fatty acid composition
Commercially Purchased Diesel	Density, kinematic viscosity, pour and cloud point, heat value, sulfur and ash value

The details of the analyzes performed are given in Table 2.

Table 2. Analyzes used in the characterization of waste transformer oils, waste frying oils, biodiesel and diesel fuel

Property Measured	Device/Method	Model	Standard Used
Density (at 15°C)	Automatic density meter	Rudolph Research Analytical, DDM 2909	ASTM D4052
Kinematic viscosity (at 40°C)	Digital constant temperature kinematic viscosity bath	Koehler KV4000 series	ASTM D445
Cloud point	Cloud and Pour Point Bath	SETA (11010-2)	ASTM D2500
Pour point	Cloud and Pour Point Bath	SETA (11010-2)	ASTM D97
Heat value	Calorimeter bomb	IKA C200	ASTM D240
Sulfur content	Carbon sulfur analyzer using an infrared cell	ELTRA CS 580	ASTM D1552
Water content	Karl Fischer coulometric titrator in conjunction with anode and cathode solutions	GR Scientific Cou-Lo Aquamax KF Moisture Meter	ASTM D6304
Ash content	Muffle furnace	Magma Therm	ASTM D482
Acid value	Titration method (using a KOH-ethanol solution)	-	EN ISO 660
Iodine number	Titration method	-	EN ISO 3961
Saponification number	Titration method	-	EN ISO 3657
Fatty acid composition	Gas chromatograph system equipped with an auto-injector	SHIMADZU, QP 2010 and the RESTEK Rtx-Wax capillary column (60 m × 0.25 mm id., 0.25)	EN 14103
Fourier Transform Infrared (FTIR) analysis	FTIR spectrophotometer (in the range of 4000-400cm ⁻¹)	Bruker VERTEX 70v	-

In the analyses conducted using gas chromatography (GC), the initial oven temperature was set to 140°C and held for 5 minutes. Then, the temperature was increased at a rate of 3°C per minute until reaching 240°C, where it was maintained for 17 minutes.

2.3. Production and Characterization of Biodiesel

Waste frying oils collected from different houses are firstly filtered in order to be purified from the impurities they contain. A certain amount of filtered oil was weighed and placed in a jacketed glass reactor and the oil was converted to biodiesel according to the basic transesterification reaction using methanol in the presence of KOH catalyst. The parameters (6:1 alcohol:oil molar ratio, 1% by weight catalyst amount, 60°C reaction temperature and 2 hours reaction time) were selected considering the literature information while performing the transesterification reaction. The details on biodiesel production and purification are explained in another article (Çelik-Okumuş et al., 2019).

Biodiesel samples synthesized from WFOs collected from households were characterized by analyzing density, kinematic viscosity, cloud and pour points, heating value, and ash content. Additionally, fatty acid methyl ester composition was determined using GC. The devices and models used in these analyses are presented in Table 2.

2.4. Preparation of Waste Transformer Oil/Biodiesel/Diesel Triple Mixtures

In the study, before the triple fuel mixtures were prepared, first a simple filtration process was applied to improve the waste transformer oil and then an adsorption process was applied to remove the water it contained.

It is undesirable for fuels to contain water (Çelik-Okumuş et al., 2019) and therefore, water of waste transformer oils was removed before using them in triple fuel mixtures. Optimum conditions of the adsorption process in which factory tea waste (FTW) was used as adsorbent were determined. Under these conditions, a very large proportion (98.6%) of the water in the WTO was removed. Studies on the adsorption process were described in detail in another article (Karaca and Doğan, 2022).

WTO, biodiesel and diesel fuel were mixed in 6 different volumetric ratios. While determining the mixing ratios, the percentage of diesel fuel, which is the most valuable component of the mixture, was kept to a minimum (10%). The ratios of WTO and biodiesel were changed. In addition, the sample (6) consisting of 100% WTO was also evaluated. The ratios of the prepared triple fuel mixtures are given in Table 3.

Table 3. Ratios of prepared triple fuel mixtures

Type of Fuel	Mixing Ratios (volume %)					
	1	2	3	4	5	6
Biodiesel	70	50	30	20	10	0
Waste transformer oil	20	40	60	70	80	100
Diesel	10	10	10	10	10	0

Some important fuel properties (density, kinematic viscosity, heat value, pour and cloud points, acid value, ash content and sulfur content) of each triple fuel mixture were examined and the most suitable mixture was tried to be determined by considering fuel standards.

3. Results and Discussion

3.1. Characterization of WTO

The properties of waste transformer oil used in forming triple fuel mixtures are given in Table 4.

Table 4. Some properties of waste transformer oil

Property	Unit	Value
Density (at 15°C)	g/cm ³	885.3
Kinematic viscosity (at 40 °C)	mm ² /sn	9.64
Sulfur content	mg/kg	0.89
Ash Amount (%)	-	0.21
Heat value	kJ/kg	44.6
Pour Point	°C	-43
Cloud Point	°C	-32
Water content	ppm	55

The density (885.3g/cm^3), heat value (44.6kJ/kg) and high kinematic viscosity value ($9.64\text{ mm}^2/\text{s}$) of WTO were similar to the values in a study (Rajan et al., 2022) and were consistent with the literature. The 55 ppm water content of WTO is above the maximum allowable amount (50 ppm) and these oils have a very high pour and cloud point as seen in Table 4. Transformer oil is virtually free of corrosive sulfur, which allows its stability to increase (Preethivasani et al., 2021). The low sulfur content of WTO (0.89 mg/kg) in Table 4 also confirms this. Ash content of fuels is also an important parameter and can be considered as an impurity in the structure of the fuel (Karaca and Doğan, 2022). The ash content of WTO (0.21%) is well above the standard value (≤ 0.02). FTIR analysis of WTO was also carried. The obtained spectrum is shown in Figure 2.

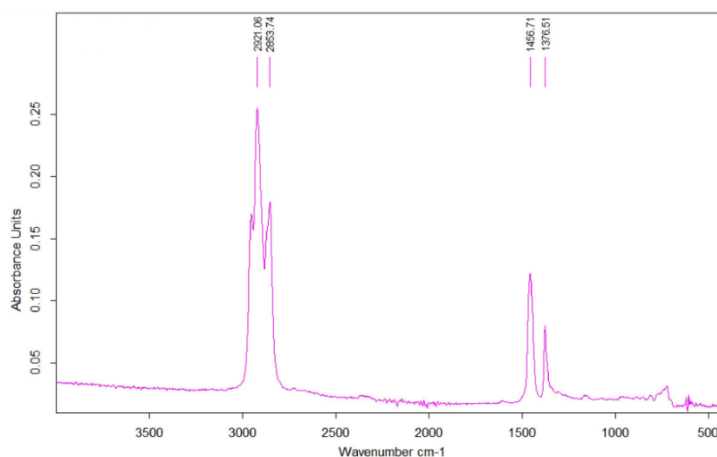


Figure 2. FTIR spectrum of waste transformer oil

The FTIR spectrum of WTO shows two strong peaks at 2921.06 cm^{-1} and 2853.74 cm^{-1} . These peaks are due to the C-H stretching bands of methyl and methylene groups. The strong peak at 1456.71 cm^{-1} and the weak band at 1376.51 cm^{-1} in the FTIR spectrum may be attributed to CH_2 asymmetric bending vibration and the CH_3 bending vibration symmetric for methyl groups, respectively (Al-Samarrae et al., 2020).

3.2. Characterization of WFO

Some properties and fatty acid composition of WFO collected from different houses and mixed after filtering are given in Table 5. The gas chromatogram of the WFO is given in Figure 3.

Table 5. Some properties and fatty acid composition of WFO used in biodiesel production

Property	Unit	Value
Density (at 15°C)	g/cm^3	0.9239
Iodine number	$\text{g I}_2 (100\text{ g})^{-1}$	120.12
Saponification number	-	185.13
Acid value	mgKOH/g oil	0.73
Fatty Acid Composition		Concentration (wt. %)
Stearic acid (C18:0)		3.77
Oleic Acid (C18:1n9c)		32.73
Linoleic Acid (C18:2n6c)		53.37
Palmitic Acid (C16:0)		6.94
Lauric Acid (C12:0)		1.36
Other		1.83

Accordingly, the density and saponification number of WFO were determined as 0.9239 g/cm^3 and 185.13, respectively. These values were similar to those in one study (Sani et al., 2017). The iodine number of WFO (120.12) was equal to the EN standard value (max. 120) and was above the value (116.8) determined by Xu et al. (Xu et al., 2022). The acid value was within EN and ASTM standards.

In addition, when the fatty acid composition of WFO is examined, it is seen that a significant part (86.1%) of the WFO consists of unsaturated fatty acids (oleic acid, linoleic acid). This can often be due to the use of vegetable oils as frying oil. However, it is seen that there are also lower levels of saturated fatty acids (stearic, palmitic, lauric) in the oil.

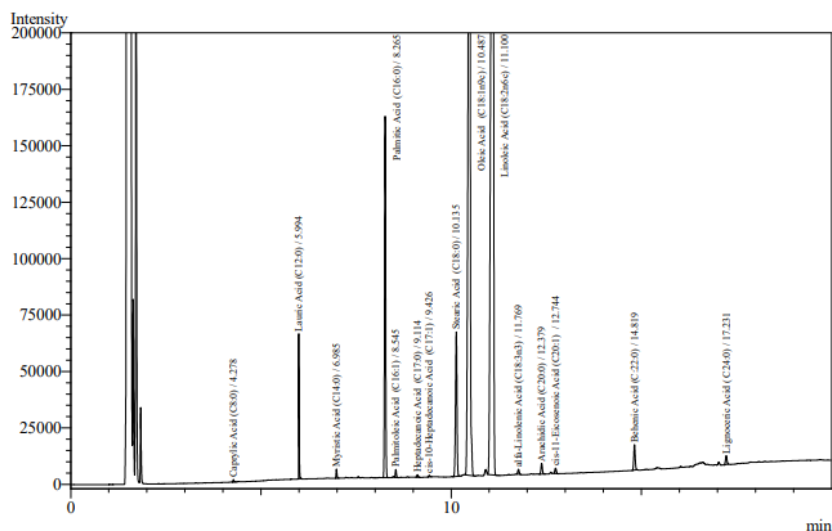


Figure 3. GC spectrum of waste frying oil

3.3. Characterization of Biodiesel and Diesel

Some properties of commercially purchased diesel fuel are also examined and presented in Table 6.

Table 6. Some properties of diesel fuel used in the study

Property	Value
Density (at 15°C, g/cm ³)	0.83
Kinematic viscosity (at 40 °C, mm ² /sn)	2.7
Cloud point (°C)	-14.8
Pour point (°C)	-28.1
Heat value (kJ/kg)	55.3
Sulfur Amount (mg/kg)	1.68
Ash Amount (%)	0.005

Accordingly, the density of diesel fuel at 15°C was the same as that of Kumar et al. (Kumar et al., 2022), and the heat value was higher than the value they found (42.57 kJ/kg). The kinematic viscosity value (2.7 mm²/s) was almost the same as in the study of Wang et al. (Wang et al., 2020). The low cloud point (-14.8°C) was above their value (-19°C). The pour point was determined as -28.1°C. This value was very close to the value (-26°C) obtained by some researchers (Al-Samarae et al., 2020). The very low sulfur content of diesel fuel (1.68 mg/kg) was consistent with the results of Kasumba et al.'s study (Kasumba et al., 2019) and the ash content (0.005%) by Gupta and Agarwal (Gupta and Agarwal, 2021). In addition, FTIR analysis of diesel fuel was also carried and the obtained spectrum is shown in Figure 4.

The two strong peaks (2921.74 cm⁻¹ and 2853.24 cm⁻¹) and the peak at 1457.74 cm⁻¹ seen in the FTIR spectrum of diesel represent C-H stretching and C-H bending, respectively. These peaks confirm the presence of alkanes. There is also a weak band (1377.10 cm⁻¹) in the spectrum attributable to the CH₃ bending vibration symmetric for methyl groups. The FTIR results for diese were similar to those reported by Qasim et al. (Qasim et al., 2017).

Biodiesel was produced from WFO by transesterification reaction and some properties of the produced biodiesel were investigated. In addition, fatty acid methyl ester (FAME) composition was determined with the help of GC. The obtained results are given in Table 7 and the gas chromatogram of the biodiesel sample is given in Figure 5.

Accordingly, in the biodiesel produced from WFO, unsaturated fatty acid methyl esters such as linoleic acid (56.46%) and oleic acid (31.27%) were found to be the highest, respectively. Sahar et al. detected the same fatty acid methyl esters in the biodiesel they produced from WFO (Sahar et al., 2018).

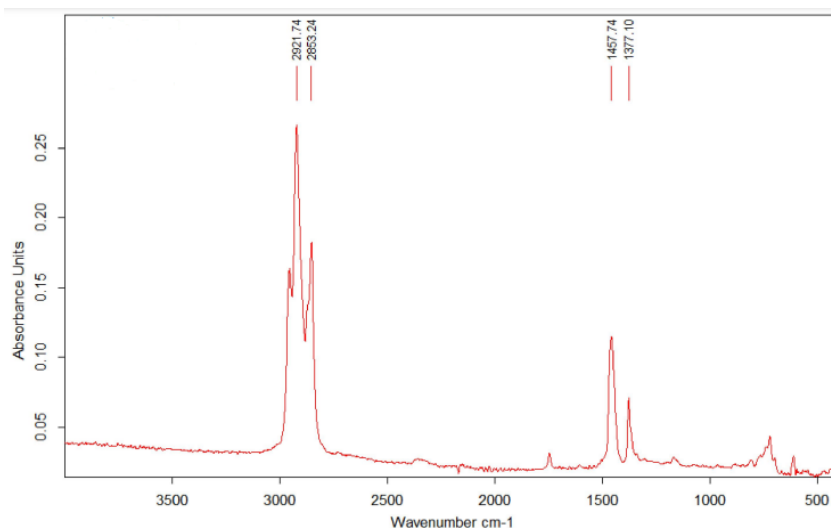


Figure 4. FTIR spectrum of diesel fuel

In addition, the density value of the biodiesel sample synthesized from WFO was determined as 0.8853 g/cm^3 at 15°C and the kinematic viscosity value at 40°C was determined as $3.5 \text{ mm}^2/\text{s}$. These values were slightly higher than the density value (870 kg/m^3) and slightly lower than the kinematic viscosity value ($4.0 \text{ mm}^2/\text{s}$) in the study by Corro et al. (Corro et al., 2019). The heat value was found to be higher than the 38.35 kJ/kg value obtained by Arthanarisamy et al. (Arthanarisamy et al., 2020), while the acid value was within the standard ranges, similar to the study by Naem et al. (Naem et al., 2022). In addition, cloud and pour points were determined as -2.8°C and -13.5°C , respectively. These values were lower than the values obtained by Nawaz et al. (Nawaz et al., 2021), and close to the values obtained by Soltani et al. (Soltani et al., 2020). It is seen that the ash content of biodiesel, which is 0.01% , is below the relevant standard value (≤ 0.02) (Gupta and Agarwal, 2021).

Table 7. Some properties and fatty acid composition of produced biodiesel

Property	Unit	Value
Density (at 15°C)	g/cm^3	0.8853
Kinematic viscosity (at 40°C)	mm^2/sn	3.5
Cloud point	$^\circ\text{C}$	-2.8
Pour point	$^\circ\text{C}$	-13.5
Heat value	kJ/kg	39.9
Acid value	mgKOH/g oil	0.78
Ash Amount (%)	-	0.01
Fatty Acid Methyl Ester Composition		Concentration (wt. %)
Stearic acid methyl ester (C18:0)		3.64
Oleic acid methyl ester (C18:1n9c)		31.27
Linoleic acid methyl ester (C18:2n6c)		56.46
Palmitic acid methyl ester (C16:0)		6.71
Other		1.92

FTIR analysis of biodiesel produced from WFO was also carried and the obtained spectrum is shown in Figure 6.

The two strong peaks (2921.97 cm^{-1} and 2852.87 cm^{-1}) seen in the FTIR spectrum of biodiesel represent stretching vibrations of $(\text{CH})_n$ ($n=1,2,3$). The strong peak at 1743.09 cm^{-1} represents the $\text{C}=\text{O}$ stretching vibration of carbonyl groups present in esters. The peak at 1463.51 cm^{-1} represents C-H bending. The peak at 1162.53 cm^{-1} indicates O-CH_3 stretching, while the weak peak at 722.44 cm^{-1} indicates CH_2 rocking vibration. The FTIR results for biodiesel were similar to those reported by Ali et al. (Ali et al., 2018).

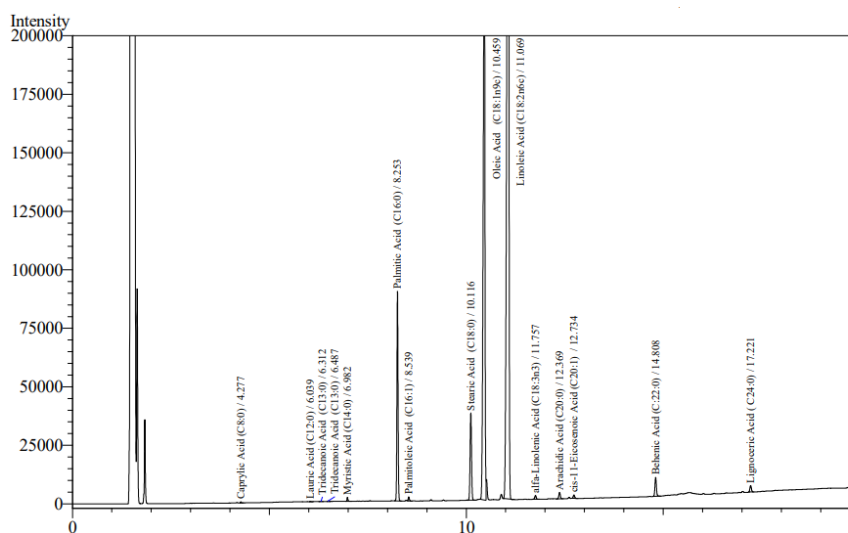


Figure 5. GC spectrum of the biodiesel sample produced from WFO

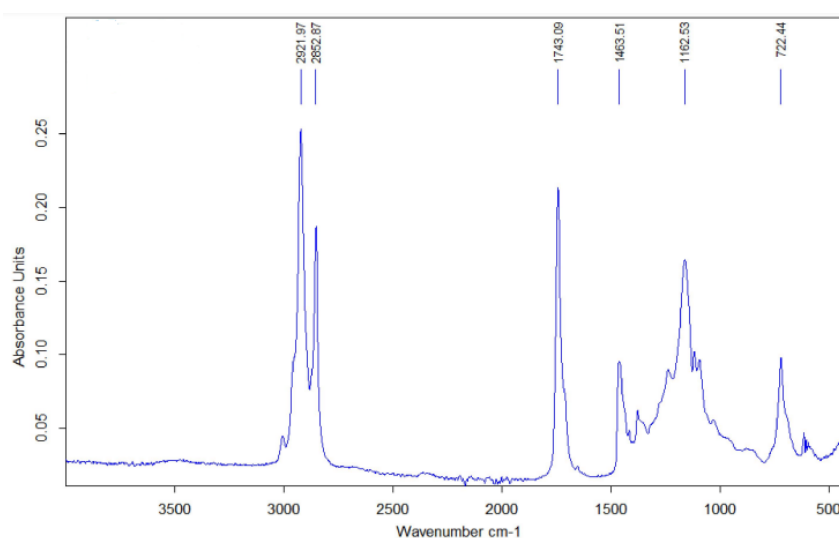


Figure 6. FTIR spectrum of biodiesel

3.4. Investigation of Fuel Properties of WTO /Biodiesel/Diesel Triple Mixtures

At this stage of the study, WTO, which was dehydrated under optimum conditions, biodiesel synthesized from WFO and commercially purchased diesel fuel were mixed in different proportions and triple fuel mixtures were prepared at the mixing ratios given in Table 3. Since our aim here is to keep diesel fuel consumption to a minimum, the ratio of diesel fuel was kept at the lowest level (10%) while preparing the mixtures. On the contrary, the ratio of biodiesel (clean and renewable energy source) and the ratio of WTO, which has a significant potential as waste, were changed. Some important fuel properties such as density, kinematic viscosity, heat value, pour point, cloud point, acid value, ash content and sulfur content of each sample prepared at different ratios were determined and an alternative triple fuel mixture was tried to be determined, which complies with diesel fuel standards. The results obtained are given in Table 8. The fuel properties of 6 samples prepared at different rates were investigated for compliance with EN and ASTM standards.

As seen in Table 8, the density values of the mixtures vary between 0.87 and 0.89 g/cm³ and comply with the standard ranges. Since the density value is an important property that affects the atomization efficiency of the fuel, it is important that these values comply with the standard ranges (Venkatesan et al., 2019).

The kinematic viscosity values of the samples vary in the range of 2.7-9.6 mm²/s and increase as the ratio of waste transformer oil in the mixture increases. This is due to the high viscosity of the WTO (T100). The lowest viscosity value (2.7 mm²/s) belongs to diesel fuel (D100). In a study conducted with diesel fuel and waste transformer oil mixtures, similar results were obtained regarding viscosity values, and kinematic viscosity values increased with the increase of WTO ratio, similar to our study (Behera and Murugan, 2013). Kinematic viscosity is a very important fuel property that shows the fluidity of the fuel. Because a high viscosity fuel is difficult to flow, injection

equipment operation and spray atomization will also be difficult (Al-Samarrae et al., 2020). For this reason, it is important for the fuel to have the viscosity values in the standard ranges. Here, it is seen that the kinematic viscosity values of samples 1,2,3, D100 and B100 comply with EN or ASTM standards, but the kinematic viscosity values of samples 4, 5 and 6 are above both standard ranges.

Table 8. Some important fuel properties of triple fuel mixtures

Fuel Property	1	2	3	4	5	6 (T100)	D100	B100	Europe EN 14214	ASTM D 6751
Density, g/cm ³	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.89	0.83	0.88	0.86 -0.9	0.575-0.90
Kinematic viscosity, mm ² /s	4.0	4.8	5.8	6.2	6.2	9.6	2.7	3.5	3.5-5.0	1.9-6.0
Heat value, kJ/kg	43.5	47.4	45.5	47.7	47.6	44.6	55.3	39.9	-	-
Pour point, °C	-22.2	-32.8	-33.4	-39.8	-38.5	-43	-28.1	-13.5	-	-15 to +10
Cloud point, °C	-15.4	-20.9	-19,6	-22.6	-23.6	-32	-14.8	-2.8	-	-3 to +12
Acid value, mgKOH/g oil	0.77	0.77	0.66	0.60	0.54	-	-	0.78	<0.5	<0.8
Ash Amount, %	0.008	0.012	0.014	0.17	0.2	0.21	0.005	0.01	≤0.02	≤0.02
Sulfur Amount, mg/kg	0.25	0.31	0.78	0.81	0.86	0.89	1.68	-	≤10	≤15

The heat value has a significant effect on the fuel consumption of the engine. High heat value means that the fuel releases higher heat energy during combustion. Similar results to the heat values (39.9-55.3 kJ/kg) obtained for the samples here were also obtained in other studies (Qasim et al., 2017; Kumbhar et al., 2021).

Cloud and pour points are the most important cold flow properties that affect the performance of fuels at low temperatures. As the fuel is cooled, a cloud of wax crystals forms that has the potential to clog fuel filters. The temperature at which this first crystal cloud forms is the cloud point. If the fuel continues to be cooled after this point, the amount of wax crystals increases, the fuel begins to gel and the fuel can no longer be pumped. This temperature is called the pour point (Yunus Khan, 2021). As seen in Table 8, the cloud and pour points of the samples were quite low. Cloud points ranged from -2.8°C to -32°C, while pour points ranged from -13.5°C to -43°C. Low pour point and cloud point cause the fuel to perform higher in cold weather (Doğan, 2016). Since the cloud (-32°C) and pour points (-43°C) of WTO are quite low, it is seen that the pour and cloud points decrease with the increase in the WTO ratio of the samples. Considering the fuel standards here, the low values are a positive situation for all samples.

The acid values of the samples vary between 0.54-0.78 mgKOH/g oil. High acid value is undesirable in fuels as it increases corrosion. Biodiesel contains fatty acids due to its structure (Dharma et al., 2019). Here, it is seen that the acid value increases with the increase in the biodiesel ratio, but the acid values of the samples are in accordance with ASTM standards, although the acid values are above EN standards.

The ash content of the samples varies between 0.008% and 0.21% and increases as the waste transformer oil ratio increases. Since ash is considered as an impurity in the structure, high ash content is undesirable in fuels (Karaca and Doğan, 2022). Here, it is seen that the ash amounts of samples 1,2,3,D100 and B100 comply with both standards, but the ash amounts of samples 4,5 and 6 are above both standard ranges.

Sulfur is one of the most common impurities found in petroleum products in different forms. Sulfur-containing compounds are among the most undesirable components of petroleum, as they cause significant environmental pollution. Therefore, sulfur limits in conventional diesel have been significantly lowered (Margui et al., 2019). The amount of sulfur should be below 10 mg/kg according to the EN standard, and below 15 mg/kg according to the ASTM standard. In the study, as the waste transformer oil ratio of the samples increased, the sulfur content increased from 0.25 to 0.89 mg/kg. However, it was observed that the sulfur content of all samples remained well below the EN and ASTM standard ranges.

When all mixtures are evaluated together, it can be said that fuel properties such as density, heat value, pour and cloud point, acid value and sulfur content were positive for all mixtures. Kinematic viscosity is a key fuel property and in this study only kinematic viscosity values of fuel mixtures 1, 2 and 3 fit within the standard ranges. Similarly, only the ash amounts of samples 1, 2 and 3 are in the standard ranges. It is also noteworthy that the acid values, ash and sulfur amounts of these three samples are lower than the samples 4,5 and 6. For all these reasons, it can be said that the most optimum triple fuel mixture ratios for this study are 1, 2 and 3 mixtures.

4. Conclusion

In this study, in order to develop an alternative fuel to fossil-based diesel fuel, triple fuel mixtures were prepared using biodiesel synthesized from WFO, WTO and diesel at different rates. Detailed characterizations of the components in the triple fuel mixture were made by using analysis techniques such as FTIR, GC, and by examining some fuel properties. Then some important fuel properties (density, kinematic viscosity, heat value, pour and cloud point, acid value, ash and sulfur content) of the triple fuel mixtures prepared by keeping the diesel fuel ratio to a minimum (10% by volume) were determined. Compliance of these properties with EN and ASTM standards was examined.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Ajay, J., Viswanath, G., 2020. A study on waste transformer oil blended with BD IC engine application. *Materials today: Proceedings*, 22, 865-868.
- Ali, C.H., Asif, A.H., Iqbal, T., Qureshi, A.S., Kazmi, M.A., Yasin, S., Danish, M., 2018. Improved transesterification of waste cooking oil into biodiesel using calcined goat bone as a catalyst. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40 (9), 1076-1083.
- Al-Samarrae, R.R., Atabani, A.E., Uguz, G., Kumar, G., Arpa, O., Ayanoğlu, A., Mohammed, M.N., Farouk, H., 2020. Perspective of safflower (*Carthamus tinctorius*) as a potential biodiesel feedstock in Turkey: characterization, engine performance and emissions analyses of butanol-biodiesel-diesel blends. *Biofuels*, 11(6), 715-731.
- Arthanarisamy, M., Alagumalai, A., Arumugam, K., 2020. An experimental insight into optimized biodiesel production and external re-breathing of burned gases on biodiesel combustion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139, 2109-2118.
- Behera, P., Murugan, S., 2013. Combustion, performance and emission parameters of used transformer oil and its diesel blends in a DI diesel engine. *Fuel*, 104, 147-154.
- Corro, G., Flores, A., Pacheco-Aguirre, F., Pal, U., Banuelos, F., Ramirez, A., Zehe, A., 2019. Biodiesel and fossil-fuel diesel soot oxidation activities of Ag/CeO₂ catalyst. *Fuel*, 250, 17-26.
- Çelik-Okumus, Z., Doğan, T.H., Temur, H., 2019. Removal of water by using cationic resin during biodiesel purification. *Renewable Energy*, 143, 47-51.
- Dharma, S., Silitonga, A.S., Shamsuddin, A.H., Sebayang, A.H., Milano, J., Sebayang, R., Sarjianto., Ibrahim, H., Bahri, N., Ginting, B., Damanik, N., 2023. Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(2), 3887-3899.
- Dmitriev, A., Zinurov, V., Vinh, D., Dmitrieva, O., 2019. Removal of moisture from contaminated transformer oil in rectangular separators. *E3S Web of Conferences* 110, 01026.
- Doğan, T.H., 2016. The testing of the effects of cooking conditions on the quality of biodiesel produced from waste cooking oils. *Renewable Energy*, 94, 466-473.
- Dordic, D., Milotic, M., Curguz, Z., Duric, S., Duric, T., 2021. Experimental testing of combustion parameters and emissions of waste motor oil and its diesel mixtures. *Energies*, 14, 5950.
- Gupta, J.G., Agarwal, A.K., 2021. Engine durability and lubricating oil tribology study of a biodiesel fuelled common rail direct injection medium-duty transportation diesel engine. *Wear*, 486-487, 204104.
- Karaca, T., Doğan, T.H., 2024. Removal of water in waste transformer oil considered as an alternative fuel by a factory tea waste-based adsorption process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 8917-8930.
- Kasumba, J., Fukagawa, N.K., Holmen, B.A., 2019. Fuel Composition Effects on Carbonyls and Quinones in Particulate Matter from a Light-Duty Diesel Engine Running Biodiesel Blends from Two Feedstocks. *Energy and Fuels*, 33, 1133-1145.
- Kumar, N., Koul, R., Singh, R.C., 2022. Comparative analysis of ternary blends of renewable Diesel, diesel and ethanol with diesel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101828.
- Kumbhar, V.S., Pandey, A., Varghese, A., Patil, V., 2021. Comparative assessment of performance, combustion, and emission of compression ignition engine fuelled with different generations of biodiesel. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14 (6), 2082-2096.
- Margui, E., Resano, M., Queralt, I., 2019. A sustainable and simple energy dispersive X-ray fluorescence method for sulfur determination at trace levels in biodiesel samples via formation of biodiesel spots on a suitable solid support. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 156, 7-12.
- Nabi, M.N., Akhter, M.S., Rahman, M.A., 2013. Waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine. *Procedia Engineering*, 56, 401-406.
- Naeem, A., Zaman, S., Farooq, M., Khan, I.W., Ghazi, Z.A., Saeed, T., Hamayun, M., 2022. Biodiesel production from waste cooking oil employing natural bentonite supported heterogeneous catalyst: Waste to biodiesel. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39, 1450-1459.
- Nawaz, K., Nisar, J., Anwar, F., Mumtaz, M.W., Ali, G., Ur Rehman, N., Ullah, R., 2023. Optimised transesterification of used frying oils: production and characterisation of biodiesel. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103 (7), 1615-1632.
- Öner, C., Altun, Ş., 2009. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. *Applied Energy*, 86(10), 2114-2120.

- Preethivasani, T.R., Senthilkumar, T., Chandrasekar, M., 2021. Refuse-derived fuel for diesel engine utilizing waste transformer oil. *Biofuels*, 12 (7), 737-748.
- Qasim, M., Ansari, T.M., Hussain, M., 2017. Combustion, Performance, and Emission Evaluation of a Diesel Engine with Biodiesel Like Fuel Blends Derived From a Mixture of Pakistani Waste Canola and Waste Transformer Oils. *Energies*, 10, 1023.
- Rajan, K., Babu, A.M., Paladi, R., Nallusamy, S., Kumar, K.R.S., 2022. Performance assessment of DI diesel engine using waste transformer oil with different compression ratios. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 3536-3544.
- Rosson, E., Sgarbossa, P., Pedrielli, F., Mozzon, M., Bertani, R., 2021. Bioliquids from raw waste animal fats: an alternative renewable energy source. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 1475-1490.
- Sahar, S., Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H.N., Nouren, S., Habib-ur-Rehman, Nisar, J., Iqbal, M., 2018. Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, 41, 220-226.
- Sani, J., Sokoto, A.M., Tambuwal, A.D., Garba, N.A., 2017. Effect of NiO/SiO₂ on thermo-chemical conversion of waste cooking oil to hydrocarbons. *Heliyon*, 3 (5), e00304.
- Sathish, T., Surakasi, R., Kishore, L., Rathinasamy, S., Ağbulut, Ü., Shaik, S., Park, S.G., Afzal, A., 2023. Waste to fuel: Pyrolysis of waste transformer oil and its evaluation as alternative fuel along with different nanoparticles in CI engine with exhaust gas recirculation. *Energy*, 267, 126595.
- Soltani, S., Khanian, N., Rashid, U., Choong, T.S.Y., 2020. Core-shell ZnO-TiO₂ hollow spheres synthesized by in-situ hydrothermal method for ester production application. *Renewable Energy*, 151, 1076-1081.
- Venkatesan, H., Fernandes, J.L., Sivamani, S., 2019. Effect of nano-enriched emulsified Pongamia biodiesel on combustion, performance and emission parameters of a compression ignition engine. *World Journal of Engineering*, 16 (6), 737-750.
- Vershinina, K.Y., Glushkov, D.O., Strizhak, P.A., 2018. Ignition of droplets of coal-water-oil mixtures based on coke and semicoke. *Coke and Chemistry*, 60, 28-36.
- Wang, Z., Paulauskiene, T., Uebe, J., Bucas, M., 2020. Characterization of Biomethanol-Biodiesel-Diesel Blends as Alternative Fuel for Marine Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 730.
- Xu, H., Li, Y., Li, Z., Song, Y., Zhang, Y., Song, H., 2022. Methane-assisted waste cooking oil conversion for renewable fuel production. *Fuel*, 311, 122613.
- Yadav, S.P.R., Saravanan, C.G., 2015. Engine characterization study of hydrocarbon fuel derived through recycling of waste transformer oil. *Journal of the Energy Institute*, 88 (4), 386-397.
- Yadav, S.P.R., Saravanan, C.G., Karthick, S., Senthilnathan, K., 2020. Fundamental droplet evaporation and engine application studies of an alternate fuel produced from waste transformer oil. *Fuel*, 259, 116253.
- Yunus Khan, T.M., 2021. Direct Transesterification for Biodiesel Production and Testing the Engine for Performance and Emissions Run on Biodiesel-Diesel-Nano Blends. *Nanomaterials*, 11 (2), 417.
- Yusuff, A.S., Thompson-Yusuff, K.A., Igbafe, A.I., 2024. Synthesis of biodiesel via methanolysis of waste frying oil by biowaste-derived catalyst: process optimization and biodiesel blends characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 1781-1792.



COMPARISON OF QUANTUM DEEP LEARNING METHODS FOR IMAGE CLASSIFICATION

Bekir Eray KATI^{1*}, Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE¹, Güncel SARIMAN²

¹Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Isparta, Türkiye.

²Muğla Sıtkı Kocaman University, Faculty of Technology, Department of Information Systems Engineering, Muğla, Türkiye.

Keywords

Quantum Transfer Learning, Quantum Artificial Intelligence Models, Hybrid Quantum-Classical Learning, Vision Transformers.

Abstract

Nowadays, with the discovery of the power and potential of quantum computers, developing and understanding quantum-based deep learning models has become an important research area. This study investigates Quantum Transfer Learning and Quantum Hybrid Learning models that involve feature extraction and training processes using Convolutional Neural Networks (CNN) and Vision Transformer (ViT). The study aims to explore the potential advantages and differences of quantum deep learning techniques. It is envisioned that quantum computing can provide significant advantages in terms of computational speed and efficiency, especially in complex and large-scale data sets. Therefore, this study will contribute to a better understanding of the practical applications and potential impacts of quantum deep learning techniques. In this study, we evaluate the performance of four different quantum deep learning architectures using two different datasets. The classifiers used are the pre-trained ResNet-50 with a kernel size of 5x5 and the state-of-the-art CaiT-24-XXS-224 (CaiT) transducers. Optimization was performed with Adam optimizer using the cross entropy loss function. A total of eight models were trained, each with ten iterations. Accuracy (Acc), balanced accuracy (BA), overall $F\beta$ (F_{β}) macro score F1 and F2, Matthew's Correlation Coefficient (MCC), sensitivity (Sens) and specificity (Spec) were used as performance measures.

GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMADA KUANTUM DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Anahtar Kelimeler

Öz

Kuantum Transfer Öğrenme, Kuantum Yapay Zeka Modelleri, Hibrit Kuantum-Klasik Öğrenme, Vision Transformers.

Günümüzde kuantum bilgisayarların gücü ve potansiyelinin keşfedilmesiyle birlikte, kuantum tabanlı derin öğrenme modelleri geliştirmek ve anlamak önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu çalışma, Evrişimli Sınır Ağları (CNN) ve Vision Transformer (ViT) kullanılarak öznetelik çıkarımı ve eğitim süreçlerini içeren Kuantum Transfer Öğrenme ve Kuantum Hibrit Öğrenme modellerini incelemektedir. Çalışma, kuantum derin öğrenme tekniklerinin potansiyel avantajlarını ve farklılıklarını araştırmayı amaçlamaktadır. Kuantum hesaplamaların, özellikle karmaşık ve büyük ölçekli veri setlerinde hesaplama hızı ve verimlilik açısından önemli avantajlar sağlayabileceği öngörülmektedir. Dolayısıyla, bu çalışma, kuantum derin öğrenme tekniklerinin pratik uygulamalarının ve potansiyel etkilerinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacaktır. Bu çalışmada, iki farklı veri seti kullanılarak dört farklı kuantum derin öğrenme mimarisinin performansı değerlendirilmiştir. Kullanılan sınıflandırıcılar, önceden eğitilmiş 5x5 çekirdek boyutuna sahip ResNet-50 ve son teknoloji ürünü CaiT-24-XXS-224 (CaiT) dönüştürücüleridir. Optimizasyon, Adam optimizyer ile çapraz entropi kayıp fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her biri on tekrarlı olmak üzere toplam sekiz model eğitimi yapılmıştır. Performans ölçütleri olarak doğruluk (Acc), dengeli doğruluk (BA), genel $F\beta$ makro skorundan F1 ve F2, Matthew's Korelasyon Katsayısı (MCC), duyarlılık (Sens) ve özgüllük (Spec) kullanılmıştır.

Alıntı / Cite

Kati, B. E., Küçüksille, E. U., Sarıman G., (2025). Comparison of Quantum Deep Learning Methods for Image Classification, Journal of Engineering Science and Design, 13(1), 90-106

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. E. Kati, 0000-0002-1736-7568
E. U. Küçüksille, 0000-0002-3293-9878
G. Sarıman, 0000-0003-3188-8869

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	20.09.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	20.11.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: eraykati@sdu.edu.tr, +90-537-571-5271

COMPARISON OF QUANTUM DEEP LEARNING METHODS FOR IMAGE CLASSIFICATION

Bekir Eray KATİ^{1†}, Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE¹, Güncel SARIMAN²

¹Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Isparta, Türkiye.

²Muğla Sıtkı Kocaman University, Faculty of Technology, Department of Information Systems Engineering, Muğla, Türkiye.

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- Quantum computing offers significant advantages in processing complex and large-scale datasets, making it a powerful tool for accelerating deep learning models.
- Quantum Transfer Learning combined with Vision Transformers (ViT) enhances the extraction of both local and global features, leading to higher accuracy in image classification tasks.
- The hybrid quantum-classical models demonstrate strong performance, particularly on simpler datasets, by integrating quantum gates within classical deep learning architectures.

Purpose and Scope

The paper aims to explore the development and application of quantum-based deep learning models, specifically focusing on Quantum Transfer Learning and Quantum Hybrid Learning techniques. By leveraging Convolutional Neural Networks (CNN) and Vision Transformer (ViT) architectures, the study investigates the potential advantages of quantum deep learning, particularly in terms of computational speed and efficiency when applied to large and complex datasets.

Design/methodology/approach

The study evaluates four different quantum deep learning architectures using two distinct datasets. Feature extraction is performed with pre-trained ResNet-50 and CaiT models. Optimization is carried out using the Adam optimizer and cross-entropy loss function. Eight models are trained, each for ten iterations, with performance measured by metrics like accuracy, balanced accuracy, F1 and F2 scores, Matthew's Correlation Coefficient (MCC), sensitivity, and specificity.

Findings

The study reveals that quantum deep learning models, especially Quantum Transfer Learning, exhibit significant advantages in classification tasks. Models utilizing pre-trained ResNet-50 outperform those with CaiT, particularly on complex datasets like "Dogs & Cats." Hybrid quantum models show high accuracy for simpler datasets (Medical MNIST), demonstrating the potential of quantum models for enhanced image classification.

Research limitations/implications

The research is limited by the current state of quantum computing hardware, particularly the challenges posed by noisy intermediate-scale quantum (NISQ) devices. Future research could explore improving the quantum-classical hybrid models' scalability and performance on larger datasets. More comprehensive experimentation is needed to optimize hyperparameters and training time for complex quantum architectures.

Practical implications

The findings suggest practical applications of quantum deep learning in fields requiring fast and efficient data processing, such as medical imaging and large-scale visual recognition tasks. Quantum Transfer Learning could be further developed for use in industries where quick decision-making and high accuracy are critical.

Social Implications

The impact of this research on society could be profound, especially in improving computational tools in healthcare, AI-driven diagnostics, and other data-intensive fields. By accelerating image classification processes, quantum computing has the potential to reduce computational costs and enhance the quality of life through better AI-powered solutions.

Originality

This paper contributes to the existing knowledge on quantum machine learning by carrying out a cross-comparison of quantum transfer learning and quantum hybrid learning models for image classification purposes. This paper makes an important observation on how effective these models are, highlighting their usefulness beyond mere conceptualization especially in processes that require handling large and complex datasets.

[†] Corresponding author: eraykati@sdu.edu.tr, +90-537-571-5271

1. Introduction

There has been a drastic change in the field of computer science and its corresponding applications with the emergence of quantum science, which has the ability to exist over and above conventional computers. Unlike classical charged devices which store information in bits represented by either 0 or 1; quantum computers store information in qubits that can be both 0 and 1 at the same time due to superposition principles of qubits. This offers a real possibility that speed would be improved in the solution of some problem systems if this method is compared with normal computer systems. Due to the complexities in computations associated with quantum computing, there have been growing interests in artificial intelligence and machine learning regarding these technologies (Shor 2002).

Quantum transfer learning and hybrid classical-quantum learning represent methodologies through which researchers endeavor to integrate quantum computing into machine learning. It aims to make use of acquired information from the source task to achieve better results on the target task. Classical and quantum methods are used to solve a complex problem in hybrid classical-quantum learning. Both the above forms have their likely advantages but further studies are needed to understand how they differ and when each of the forms would be more appropriate (Dhara et al. 2024).

The two methods, quantum transfer learning, and hybrid classical-quantum learning mostly differ in respect to being algorithmically complex and in data handling (Liu et al. 2021). Quantum transfer learning usually involves the movement of data and involves the methodologies of choosing the right quantum features. Encoding data and correlating it to the asked question in the case of quantum transfer learning is very essential. However, hybrid classical-quantum learning is a considerable amount of effort to coordinate the classical component, quantum component, and how they work together effectively (Datta et al. 2005).

The fast trends with regards to the machine learning mean that quantum transfer learning and hybrid classical-quantum learning are just beginning points (Yang et al. 2023) Both approaches currently are at a rudimentary stage in terms of relevance and too much is required for them to be translated into solving real problems. It is worth mentioning also the necessity of such approaches but with the emphasis on their merits and demerits in more pragmatic and broader context (Arthur et al. 2022). In their opinion, these methods will become even more effective and widespread with the evolution of powerful and more advanced quantum computers in the near future (Liu et al. 2021).

This research has focused on the principles of quantum transfer learning and hybrid quantum learning using Convolutional Neural Networks (CNN) and Vision Transformers (ViT) as an experimental investigation. The four variations of the quantum deep learning architecture were assessed using two datasets. The other methods discussed were evaluated using parameters of accuracy, balanced accuracy, and Matthew's correlation coefficient. This research seeks to investigate possible benefits and inherent differences of quantum deep learning methods.

2. Literature Survey

The literature includes different types of researches that deal with quantum machine learning and hybrid approaches including the vacuum of well into a variety of disciplines. In particular, the progress of the quantum measurement science contributes a lot to the appreciation of the practical application of quantum transfer learning as well as the hybrid of classical and quantum learning. Consideration of some recent contributions from the literature makes it clear that Yang J. et al. (2023) focused on integrating tunable control parameters in the encoding process to enhance the quantum measurement science and their auto-optimization in the process using a hybrid quantum-classical technique. Usually, the above method leads to an experimental guided optimization of the optimal protocol in order to improve the accuracy of measurement. Young-woo Han (2022) presented the significance of a hybrid quantum-classical neural network architecture, where each of the neuron structures consist of a variational quantum circuit. The constructed hybrid neural network was tested in a series of experiments on binary classification tasks of both computer simulations and real quantum computers and their hybrid versions.

J. Liu et al, (2021) a hybrid quantum-classical convolutional neural network inspired by the classical convolutional neural networks, or QCCNN, was developed earlier in 2021. QCCNN is designed such that it can fit within the available thresholds for the number of qubits and circuit depth when it comes to today's noisy intermediate-scale quantum computers NISQ. QCCNN is able to retain the main concepts of the classical CNN even while facilitating the process of gradient backpropagation for hybrid quantum-classical loss functions design. The authors

illustrated the prospects of this architecture on Tetris and demonstrated that QCCNN was superior in classification tasks than classical CNN.

Mari A. et al. (2020) touched on the matter of transfer learning, a notion often used in contemporary machine learning algorithms, particularly in the class of hybrid neural networks, combining classical and quantum parts. They suggested different usage scenarios of such hybrid transfer learning, especially constraining on the scenario when the last layers of standard trained classical network are substituted by a quantum circuit. This way, it is possible to efficiently normalize a high-dimensional space and extract and transfer a chosen informative volume to the quantum processor. The authors presented some functioning prototypes of the system for works with image recognition and quantum state classification.

Toğoçar M. (2021) examined application of a Quantum Transfer Learning model for the recognition of respiratory diseases. Respiration-related disease was detected using Quantum Transfer Learning model. A different learning paradigm was suggested by integrating quantum and deep learning models. In respect of the application analysis, the dataset was trained with the proposed model, and the accuracy of the training reached 92.50% based on the analysis results.

Mogalapalli A. and others (2022) studied the topic of classical-quantum transfer learning, more specifically the question on if it is possible to substitute the last classical layer of a network with variational quantum circuit. They proposed quantum transfer learning in order to detect tuberculosis from chest X-ray images as well as to identify the disease in X-ray images of affected patients.

Yan J. and others (2023) investigated the use of a hybrid model in remote sensing image classification. US model combined ResNet based classical CNN's and quantum circuits with the objective of achieving high level of accuracy when only few samples were used. The hybrid CNN approach not only enhanced the accuracy of classification tasks but reduced the amount of training data required for training the model.

Cherrat A. and others (2024) set out to achieve more complicated tasks in their investigations by integrating Vision Transformers classical variants and quantum components within the framework of this study. They applied attention with a quantum cavity and obtained impressive results, particularly in the image classification task. Due to this hybrid model, the accuracy improvement rate was significantly increased while the parameters used were relatively lower than those employed in the classical vision transformer models.

Sarkar S. et al. (2024) ingeniously presented a model of quantum transfer learning that elicits both the classical and quantum modes of information processing and explored it on the MNIST database. In this case, data was processed using quantum circuits and the classification was performed therefore using classical neural networks. Nevertheless, the authors highlighted that due to the present-day constraints of quantum devices, the improvement of the model was inferior to the best classical models.

Quantum Convolutional Neural Networks represent a quantum leap in quantum machine learning by the use of quantum properties, such as entanglement and superposition, in the hierarchical processing of complex information. Cong et al. constructed the framework for a QCNN, with a specific view aimed at solution ground states of quantum many-body physics. This has shown that QCNN can carry out dimensionality reduction and hierarchical learning with great scalability and efficiency while dealing with quantum data. Furthermore, the proposed architecture is coherent with the use of QCNNs for a wide range of other quantum computing tasks that are far from physics.

3. Material and Method

In this section, the foundations of quantum machine learning and deep learning models using these foundations will be examined.

3.1. Quantum Entanglement and Quantum Gates

Quantum entanglement is the state in which two or more qubits are in the same state even if their spin is in a different physical location. This statement highlights the extent of the correlation since if the direction of one qubit is measured, the directions of the other qubits are instantly known regardless of distance. When working with qubits within quantum computers & quantum supervised learning systems, statistics of qubits are made computationally powerful with the use of entanglement. Usually, qubits are optimally entangled utilizing a CNOT gate and a Hadamard gate. The Hadamard gate transforms the qubit into a superposition while the CNOT gate links this qubit to another spin. Lastly, these gates combined produce a powerful quantum entanglement in states which leads to improvements in these models' quantum computing power (Wang and Yang, 2020).

The Hadamard gate is one of the key components of quantum computers since it converts classical bits having values of either zero or one into quantum bits in superposition. It works on a single qubit where it takes a yes/might state and places it into an even weighted distribution of both $|0\rangle$ and $|1\rangle$. As a result, in measurement, there is a 50% probability that the qubit is in either state. This gate is the building block of many quantum gates furthering the efficiency of various quantum algorithms and more so making superpositions. For instance, its use is key in the quantum Fourier transform and the Deutsch-Jozsa algorithm. The Hadamard gate is instrumental in enhancing the parallel processing capabilities of quantum transfer learning models by placing each qubit into superposition (Smith & Doe, 2019).

The RY gate, as its name indicates, performs a rotation of the qubits around the y-axis of the Bloch sphere where in this case the angle can be set to any desired value. It has an angle of rotation whose value is adjustable, hence this allows continuum deformation in the model by having learnable parameters. The RY gate is critical in quantum transfer learning models as it enables the effective adjustment of qubit states and aids the convergence of the optimization process. It has similar functions to weight updates as seen in classical ML models. Rotating each qubit around the y-axis would help in searching for each individual state in order to enhance the learning capacity of the model (Lee & Kim, 2020).

The CNOT gate is one of the simplest quantum gates that helps to create an entanglement between the two qubits. In this gate one qubit's control modifies the other qubit's state. The dynamics are that if the control qubit is in the $|1\rangle$ state, the target qubit's state will be flipped and if the control qubit is in the $|0\rangle$ state, the target qubit will not be affected. Such mechanism allows for the engagement of the two qubits in quantum entanglement a crucial aspect of quantum computing where parallel computation that is impossible with classical computers can be performed. This feature of quantum systems is very useful for increasing the effectiveness of quantum transfer learning models. This increases the processing efficiency of the qubits' connectivity in multi-qubit systems (Patel & Sharma, 2021).

3.2. Quantum Machine Learning

Quantum machine learning is a relatively new field of research which gives considerable hope to overcome the weaknesses of classical machine learning systems and to address more computationally intensive tasks. Apart from these, quantum support vector machines (QSVM) fall into one of the important applications of quantum machine learning. QSVM is the version of the classical Support Vector Machines (SVM) algorithm that has been modified for use with quantum computers. In other words, it is an implementation of SVM with the help of quantum approaches such as quantum superposition and quantum parallelism. Examples of these datasets include those utilized in our earlier work in SVM applications and QSVM outperformed predictions. So working QSVM advances research in the field of quantum machine learning which aims at improving classification methods (Cross, 2018).

3.3. Quantum Support Vector Machines

Support Vector Machines (SVM), in short SVM, is a machine learning method that is supervised in nature and is used mostly to address the machine learning problems which can be separated linearly. The purpose of the SVM 's is to find a hyperplane that segregates multiple category feature vectors. This hyperplane is the decision border that distinguishes the classes with respect to given data. SVM aims towards pushing the boundary to the maximum supporting margin where the support vectors are the nearest points to the hyperplane. Based on the kernel used by SVM algorithm the objective function is sometimes convex and at times non-convex. In real applications, non-convex functions lead to dropping down to local solutions where these limits the traditional SVMs optimization efficiency, accuracy, and speed. Quantum Support Vector Machines (QSVM) makes use of grovers algorithm as a subroutine to make sure that the non-convex cost functions are optimized globally. The quantum SVM algorithm can be described as follows (DiVincenzo, 1998):

$$\theta^T x - c = \pm 1.$$

Here c is constant, x and θ are vectors. It has been anticipated that if θ is optimized, one could rely on the margin value whence a correct classification of the data is achieved. This intention is formalised by the following optimization problem (Noble, 2006) and constraint (Romero et al., 2017):

$$\min_{\theta, c} \frac{1}{2} \|\theta\|^2$$

$$y^i(\theta^T x^{(i)} - c) \geq 1$$

For the training data where $i = \{1, \dots, M\}$ and $y(i) = \{-1, 1\}$ the constraint can be incorporated into the objective function using Lagrange multipliers $\alpha(i)$ and the optimization problem can be redefined as follows (Khoshaman et al., 2018):

$$\min_{\theta, c} \max_{\alpha^{(i)} \geq 0} \left(\frac{1}{2} \|\theta\|^2 - \sum_{i=1}^M [\alpha^{(i)}(\theta^T x^{(i)} - c - 1)] \right)$$

An important point is that non-zero values of $\alpha(i)$ correspond to the sum of the support vectors $x(i)$. The following derivatives are set to zero to maximize the objective function F with respect to $\alpha(i)$ (Cong vd. 2019)

$$\frac{\partial F}{\partial \theta^{(i)}} = \theta^{(i)} - \alpha^{(i)} y^{(i)} x^{(i)} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = \sum_{i=1}^M \alpha^{(i)} y^{(i)} = 0$$

Therefore, the weights are defined as (Kerenidis et al., 2019):

$$\theta = \sum_{i=1}^M \alpha^{(i)} y^{(i)} x^{(i)}$$

The dual problem is expressed as follows (Henderson et al., 2020):

$$\min_{\alpha^{(i)}} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha^{(i)} y^{(i)} y^{(j)} (x^{(i)})^T x^{(j)} - \sum_{i=1}^M \alpha^{(i)} \right\}$$

Under the assumption $\alpha(i) \geq 0$ the following equality holds for the training set where $i = 1, \dots, M$: (Farhi vd. 2014)

$$\sum_{i=1}^M \alpha^{(i)} y^{(i)} = 0$$

To introduce non-linear effects into the optimization problem, all kernel functions can be expanded with $K(x(i), x(j))$ replacing the dot product in the dual problem (Schumacher, 1995):

$$\min_{\alpha^{(i)}} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha^{(i)} \alpha^{(j)} y^{(i)} y^{(j)} K(x^{(i)}, x^{(j)}) - \sum_{i=1}^M \alpha^{(i)} \right\}$$

The Gaussian kernel function is defined as follows (Berenco et al., 1995):

$$K(x^{(i)}, x^{(j)}) = \exp(-\gamma \|x^{(i)} - x^{(j)}\|^2)$$

This requires additional Euclidean distance calculations. Each step of the algorithm is detailed as follows (Toffoli, 1980):

1. Assign initial values for each parameter used by the kernel function.
2. Select an appropriate kernel function for the problem and construct the kernel matrix accordingly.
3. Decompose the objective function and encode its components into qubits. Binary strings can be used to represent classical data (Fredkin & Toffoli, 1982):

$$x \rightarrow b = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$$

Where $i = 1, \dots, m$ for $b_i \in \{0, 1\}$ These binary strings can then be easily transformed into k-qubit quantum states (Kockum, 2014):

$$|b_1, b_2, \dots, b_m \rangle$$

This creates a 2^k -dimensional Hilbert space spanned by $\{|00\dots0\rangle, |10\dots0\rangle, \dots, |11\dots1\rangle\}$ (Rebentrost, 2014).

The quantum minimization program searches the space where the objective function is defined. Grover’s algorithm searches through the space of all possible objective function values to find the optimal $\alpha(i)$ values corresponding to the solution for θ and c . First, a quantum circuit representing the objective function, using a quantum operator denoted as "O," generates a superposition of all possible inputs. This process allows for the global minimum of the SVM optimization problem to be reached. Measuring this subroutine yields the correct answer with high probability. Grover’s approach reduces the temporal complexity of the classical algorithm, which is $O(N)$ to $O(\sqrt{N})$ where N is the number of training vectors, enabling the discovery of a global minimum. Calculating the kernel matrix is one of the most time-consuming steps in any SVM algorithm, with a computational complexity of $O(M^2N)$. Grover’s approach remains subject to the same constraints as the GroverOptim quantum subroutine. Due to quantum noise, ideal results may not always be achieved. It is assumed that the objective function of the SVM is represented by a quantum circuit as input to the algorithm (Zhu et al.).

3.4. Quantum Classification Models

In this work, a hybrid quantum model was built by interposing quantum gates from the Qiskit library among the deep learning layers in pytorch (Qiskit, 2022).

3.4.1. Hybrid Quantum-Classical Learning

The open-source PyTorch library contains numerous modules related to deep learning. In this study, a Hybrid Quantum Model is created by incorporating quantum gates from the Qiskit library into the deep learning layers within PyTorch.

Figure 1, circuit of hybrid quantum-classical learning model. It consists of ZZFeatureMap for the conversion of classical data points to quantum states, and RealAmplitudes as a parametric quantum circuit. While ZZFeatureMap provides the basis for quantum operations by encoding the data points into the quantum feature space, the RealAmplitudes circuit will optimize the learning process using entanglement and rotation gates. It allows both quantum and classical parts to cooperate and enhances performance through this means. This is one of the approaches of the hybrid model, where it tries to scale up data processing capabilities through the combined workability of classical and quantum methods. (Cerezo et al., 2021).

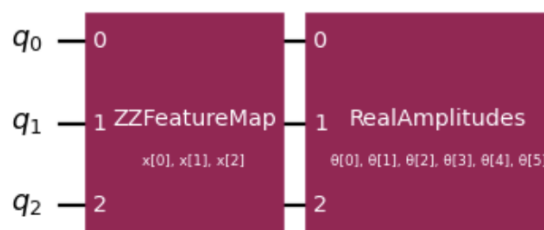


Figure 1. Hybrid quantum-classical learning quantum circuit

To construct a quantum-classical neural network, a hidden quantum layer can be formed within the neural network by utilizing a parameterized quantum circuit. As shown in Figure 2, the neural network begins with classical neural nodes, and the outputs from these layers are used as inputs for the parameterized quantum circuit. The measurement outputs of the quantum circuit are then connected to a classical neural network to form the overall neural network structure (Mari et al., 2020).

Here, σ represents a nonlinear activation function. The value of h_i represents the output of the i -th neuron in each hidden layer. $R(h_i)$ refers to the quantum rotational gate applied based on the value of h_i . The output produced by the hybrid neural network is denoted by y . In the backpropagation algorithm, the parameters of the quantum layer are calculated using the function shown in Figure 2 (Garg and Ramakrishnan, 2020).

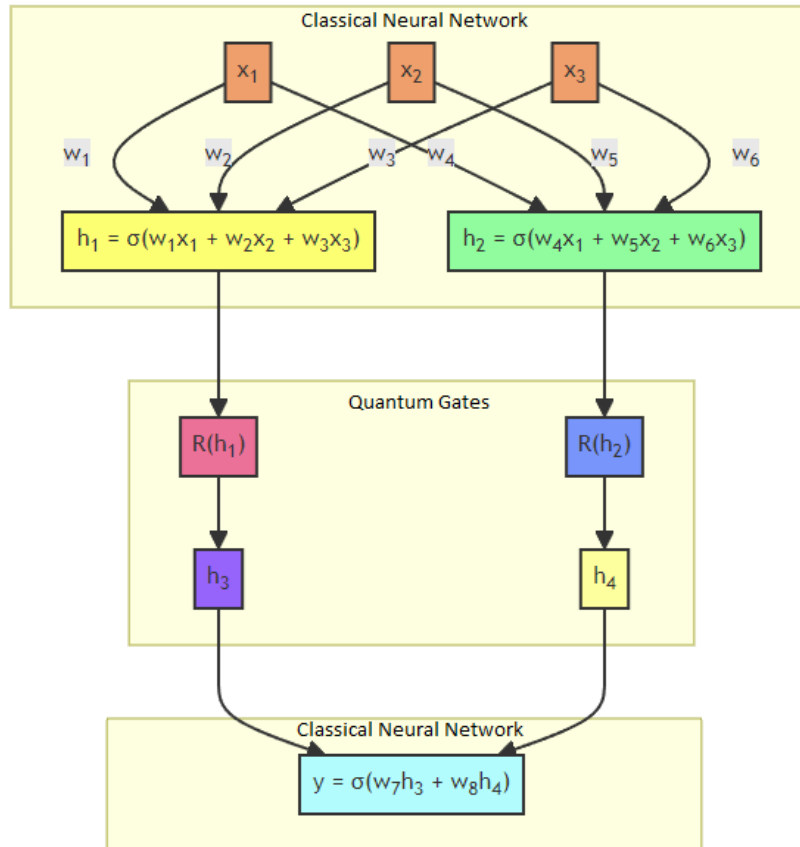


Figure 2. Garg and Ramakrishnan 2020

$$\nabla_{\theta} \text{Quantum Circuit}(\theta) = \text{Quantum Circuit}(\theta + s) - \text{Quantum Circuit}(\theta - s)$$

In quantum backpropagation, θ represents the parameters of the quantum circuit. The shifts in the backpropagation are represented by s . The gradient computation in the quantum circuit is simply calculated using the difference between $\theta + s$ and $\theta - s$. This function is also known as the parameter-shift rule (Banchi & Crooks, 2021). In the quantum function within the hidden layer, a simple approach uses a single qubit. To determine the θ angle at the output of the circuit, the $R_Y(\theta)$ function shown in Figure 3 is employed (Salinas et al.).

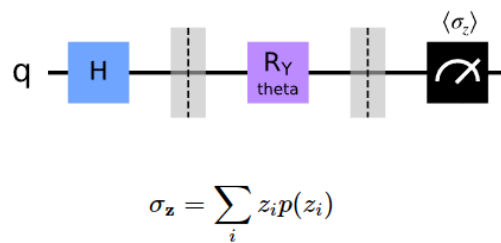


Figure 3. Quantum circuit and $R_Y(\theta)$ function (Shepherd 2006)

In the case of the presence of a quantum layer, the classical neural network should satisfy dimensionality requirements with the quantum layer. In the given example, since quantum layer comprises one single qubit, the connections between the classical neural networks and the quantum layer have to be limited to one dimension (Shepherd, 2006).

3.4.2. Quantum Transfer Learning

Quantum transfer learning involves the classical computer basing its computation on ones previously learnt by the quantum computer. This makes it possible for classical as well as quantum computers to quickly and accurately assimilate information already internalized by classical computers. (Mari et al. 2020) The significance and utilization of quantum machine learning algorithms necessitate quantum transfer learning. For instance, because

of computers' unique speed advancement when compared to classical computers, there is scope of improving the learning of quantum computers through the application of the learned features of classical computers. (Liu et al. 2021)

This quantum transfer learning technology extends the application of quantum algorithms in an effort to leverage classical algorithm's learned datasets. In this manner, the time associated with the algorithms of quantum science is curbed while its accuracy and success levels can burgeon. These aspects have led to the prospect of solving concrete problems with the help of quantum transfer learning technologies, for instance quantum computers can be used to train classical neural networks, so that it would be possible to build quantum neural networks in the future. (Mari et al. 2020)

Owing to the feature that quantum computer resources can be expanded, it would also be possible to do machine learning applications such as classification or regression on bigger and more complex data. Even classically captured images can be recognized with the help of quantum transfer learning together with the application of quantum algorithms enhancing classical algorithms towards achieving work such as image, speech, and language recognition. (Qi and Tejedor 2022)

Another potential area for utilizing quantum transfer learning is to enable quantum computation techniques, such as quantum control or quantum optimization, aided by computational models or data developed using classical computation techniques. This will enhance the performance of quantum computers since they will be aided by embedded classical computing knowledge. (Mari et al. 2020)

It helps quantum computers increase their learning speed and accuracy towards the models or datasets achieved by classical computing. This is the reason why it is possible to deploy quantum computers with great efficiency in practical applications even for the tasks that are certainly not permissible or would be extremely hard for conventional computers.

In the quantum transfer model, a quantum circuit is implemented on the solution of a general problem obtained with classical neural networks in order to address various subproblems of the same type. In most cases, instead of training a problem from scratch, a pre-trained network in a similar domain can be used. By replacing the last layers of the pre-trained network with quantum layers and optimising them, the solution of a different problem can be approached.

In general, the transfer learning process can be described as follows: A' network is obtained by removing the last few layers from a trained neural network called A. To this network, an untrained neural network called B is added. Using the new data set, the A'+B neural network is retrained and the training process is completed. Figure 4 shows four different approaches of the transfer learning process. (PennyLane 2022)

As shown in Figure 5, the Quantum Transfer Learning model has an input layer that starts with Hadamard (H) gates that bring quantum bits (qubits) into a superposition state. Then, using RY gates, each qubit is incorporated into the learning process with parameterized rotations. In the entanglement layer, CNOT gates increase the quantum computing capacity of the model by creating dependencies between qubits. This process is iterated throughout the depth of the model and finally, measurement operations are used to analyze the qubit states and obtain the results. This structure provides a powerful learning framework by effectively integrating both classical and quantum components.

There are four different transfer learning models. Among these, the classical-to-classical transfer method is already widely used with existing techniques. In the classical-to-quantum transfer method, features selected by leveraging the large-scale data processing advantage of classical models are captured and transferred to quantum circuits for faster processing. This study utilizes the classical-to-quantum transfer method. Another approach, the quantum-to-classical transfer model, involves feeding output data obtained from a pre-trained quantum network as additional input to a new classical neural network. This allows the data to be processed more comprehensively (Mishra and Samanta, 2022).

In the final method, the quantum-to-quantum transfer learning approach, the same technique is applied entirely within a quantum mechanical framework. In this case, a quantum network is pre-trained for a general task and dataset. The final quantum layers from the trained model are removed and replaced with a trainable quantum network optimized for a specific problem. Unlike the previous methods, this process is entirely quantum-based without intermediate measurements, ensuring that features are transferred in a coherent quantum state and that consistent superpositions are maintained. Compared to classical computers, current NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) devices are not only noisy and small but also relatively slow. Training a quantum circuit can take

a long time as each optimization step (e.g., calculating the gradient) requires numerous measurements (i.e., performing many real quantum experiments). Therefore, approaches like quantum-to-quantum transfer learning, which can reduce the overall training time, can be highly beneficial (Mishra and Samanta, 2022).

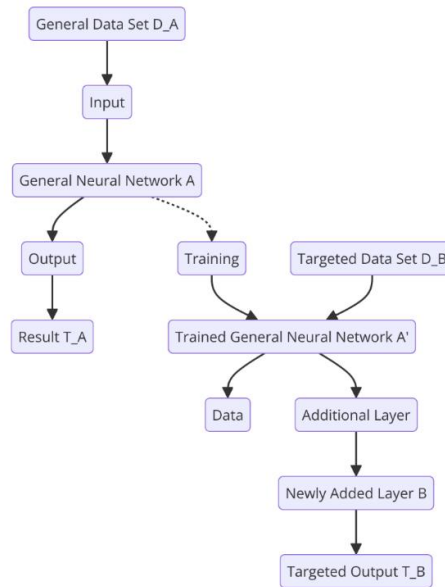


Figure 4. Quantum transfer learning steps (PennyLane 2022)

ResNet-50 is a convolutional neural network characterized by its multilayer structure and good performance in feature extraction. The Quantum Transfer Learning (QTL) model utilizes the pre-trained layers of ResNet-50 to efficiently extract complex features and incorporate them into the quantum learning process. ResNet-50 is a model with a high generalization capacity that yields very successful results, especially on simpler datasets such as Medical MNIST. Therefore, ResNet-50 was chosen as a core component for the QTL model. This choice also reflects the layered structure of ResNet-50 and the potential of the pre-trained network to work harmoniously with various quantum gates.

3.5. Vision Transformers

The Vision Transformer (ViT) is a Transformer model designed for computer vision. ViT divides an input image into a series of patches (similar to tokens in text), converts each patch into a vector, and maps them to a lower-dimensional representation using a single matrix multiplication. These vector representations are processed by a Transformer encoder, similar to token representations (Dosovitskiy et al., 2021). ViT has been used in various computer vision applications such as image recognition, image segmentation, and autonomous driving (Khan et al., 2022).

ViTs emerged from pioneering efforts to apply Transformer-like architectures in computer vision (CV), inspired by the success of Transformers in natural language processing (NLP). These models have proven effective across three key CV tasks (classification, object detection, and segmentation) and with various sensory data types (images, point clouds, and visual-linguistic data). Because of the robust modeling hands-on experience, ViTs have been able to significantly outbeat the performance metrics of several modern convolutional neural networks (Han et al., 2022)

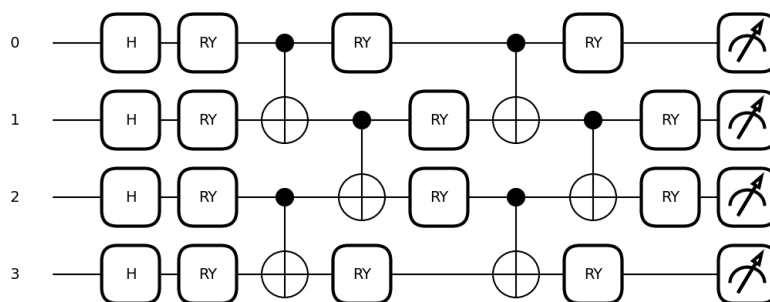


Figure 5. Quantum transfer learning entanglement circuit

3.5.1. Basic Operation Steps of Vision Transformers

The image is divided into patches of size $P \times P$ and descends towards enabling the image size to be $H \times W$ offering a total of $(HW) / (PP)$. Each $P \times P$ patch is flattened into a vector of size D . Each $P \times P \times C$ patch is linearized into D via a linear transformation i.e. fully connected layers. Each patch vector is then augmented with a D -dimensional encoding vector which represents the position of the respective patch thereby assisting the model on the ordering of the patches. The embedded vectors are progressively processed through layers of Transformer blocks, which consist of multi-head self-attention and feedforward networks. Inputting the output from the last Transformer block into the classification layer helps the system to predict the class of the image i.e. (Steiner et al. 2021). Figure 6 shows a simple vision transformer model graph. This is due to the fact that Vision Transformers (ViT) possess highly efficient abilities in visual feature extraction. The absence of local bias in the image helps to Mnes on Peters architecture as it is imaging image thermal management systems imaging heat processes more efficiently within the framework of ViTs. medial cortical The broader context imagery comprehension processes and performance degradation in the more complex visual tasks.

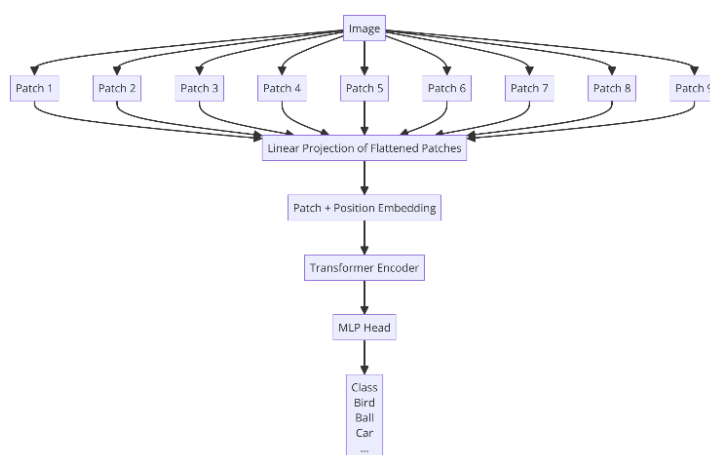


Figure 6. Vision transformer model (Dosovitskiy 2020)

3.5.2. Using Vision Transformers with Different Models

Vision Transformers (ViT) shows great means of handling image feature extraction. The way images are presented is changing as ViTs improve the way of extracting global features of the images by employing a Transformer structure which, and replaces conventional convolutional neural networks (CNNs). This is vital in the comprehension of the larger aspects of images and helps in performing more difficult image-related activities. ViTs split an image into several fixed-size patches and assign a vector to each patch. These vectors are fed into Transformer blocks and thus the model is able to learn the local and the global features. This way, ViTs possess the ability to retrieve high-level targeted features from the visual images. These features are applicable for the performance of different visual tasks like image classification, object detection, and segmentation which makes ViTs an effective component in Image analysis and computer vision Carion et al., 2020).

3.5.3. Combination of Vision Transformer and Quantum Models

In the case of working with images, where the ViTs are used to extract features, Quantum Transfer Learning can apply these features to construct quantum states and processes. Let this be the first step. ViT will take the image and cut it into smaller fixed-size images and Patches will be transformed into vectors. These vectors are then advanced forward through the Transformer blocks and the model now learns the local and global features. These features are then used to feed into the Quantum Transfer Learning model by Liu et al., 2021.Related Work and Technology.

In the Quantum Transfer Learning model, Hadamard gates are applied to every qubit with the H_{layer} function. After this, the function RY_{layer} is used for parameterized rotations on every qubit, which are dependent on the features extracted by ViT. The next step is a succession of trainable variational layers. In each layer, the function $entangling_{layer}$ is first used to implement CNOT gates, followed by the use of the function RY_{layer} , which totally changes the picture, depending on model parameters.

The last step is the calculation of the expected values for a Z-Basis for every qubit of which qubits are the output. These are the final outputs of the Quantum Transfer Learning model, which are passed through a classification layer, where the class of the image is determined based on the outputs (Liu et al, 2021).

This method enables the involvement of the efficient feature extraction provided by ViT in the modelling of complex quantum features with the aid of quantum transfer learning. It can be beneficial in the performance of more advanced quantum tasks. Nonetheless, more work is needed since many questions still remain unsolved in this scope.

The CaiT model, with its Transformer-based architecture, is a particularly prominent approach for effectively extracting both local and global features. When combined with QTL, CaiT increases the capacity to extract meaningful information from multidimensional and complex visual datasets. This model has been particularly favored for more complex datasets such as Dogs & Cats. CaiT's ability to operate with low local bias is an important contribution to quantum transfer learning models. This choice is based on the potential of CaiT's feature extraction capabilities to create ideal inputs for quantum computations.

In this respect, therefore, the current state-of-the-art in quantum machine learning is beset by several major challenges, not least of which concern NISQ devices. Such devices are characterized by small numbers of qubits, high levels of noise, and shallow circuit depths—all factors that severely limit their complex computational capability. Equally, many quantum models prove incapable of outperforming their classical versions due to hardware constraints; that limits any effort to isolate what is peculiarly advantageous in the quantum processing. These constraints notwithstanding, hybrid quantum-classical approaches have already become an auspicious avenue through which one can try to exploit the strengths of the two paradigms while mitigating their respective individual limitations. (Benedetti et al., 2019).

Given these challenges, this work leverages a hybrid quantum-classical framework wherein the classical part does the heavy lifting, including most of the computations that are required in feature extraction and early processing. The models of ResNet-50 and CaiT can be used because they have great strength in the derivation of meaningful features, especially from simpler datasets such as Dogs & Cats and Medical MNIST. These datasets provide an accessible starting point to evaluate hybrid quantum-classical models under manageable conditions (LeCun et al., 1998).

However, the quantum part is not strong enough to replace the classical one. Instead, it can only act like a complementary feature that introduces special operations native to quantum systems, such as entanglement and superposition, which help improve the learning process by projecting classical features into higher-dimensional feature spaces. This enables the hybrid model to learn nonlinear relationships present in the data that might not have been captured by purely classical models. These various performance improvements illustrate that even for NISQ devices—small number of qubits, high levels of noise, shallow circuit depths—quantum processing adds value to a classical learning framework (Cerezo et al., 2021).

Also, the comparative results suggested that the hybrid model outperforms the classical pure systems, thus suggesting that the contribution coming from the quantum part is supplementary but brings meaningful advantages regarding image classification tasks. To conclude, these constitute a potential number of quantum processing as an enhancement, especially in hybrid systems where the foundation is in classical processing and quantum operations open up new dimensions for feature learning. (Schuld et al., 2019)

3.6. Limitations of NISQ Devices and Their Impact on Experimental Results

Operations of NISQ devices consist of quantum rounds, and owing to the finite qubit capacity of these devices available, there will be errors in the computation steps. The levels of noise and numerical error rates can also hinder the effective functioning of quantum circuits and as a result, the performance of the model erodes over time. This problem aggravates in the models who are basing their working with deep quantum circuits, narrowing down the generalization ability of the model. (Preskill 2018)

Scaling complex models becomes difficult on such devices due to the limited number of qubits. Execution of quantum algorithms that necessitate a deeper circuit, or rely on an adequate number of qubits are put on halt and also numerous errors gets accumulated on this systems. Therefore these hybrid classical-quantum models should be built for less complicated problems. (Bharti et al. 2022)

When it comes to the processes of optimization of quantum algorithms, it is more difficult than classical algorithms. In particular for hybrid models, there exist progressive associated with time, noiseless computations of the quantum circuits optimization parameters. This happens and makes the quantum modeling for tough tasks developed a bit unreasonable and makes them operational without the NISQ device's restrictions. (Cerezo et al. 2021)

Performing quantum circuits on these systems requires a lot of time. This is because of the requirement to take several measurements as a single step, which makes the optimization processes to take longer in duration thus elongating the training period and adversely affecting the reproducibility and precision in conducting the experiments. (McClellan et al. 2020)

NISQ devices presently have some considerable drawbacks, even as they promise a great deal for quantum computing. Whereas they are good at demonstrating exponential computational capabilities because of quantum properties such as entanglement and superposition, they do this at low precision because of the high noise figure and lack of error correction mechanisms on their circuits. Current NISQ devices are usually limited by small numbers of qubits, which in turn reduce the possibility for more complex and deep circuits. This typically comes in the form of cloud access, and users also have access for fixed numbers of hours. The multiple limitations of NISQ because the testing of hybrid quantum models by Buscemi et al. are done in a simulated environment. The good agreements found in the results clearly show that at lower noise levels with more qubits, real NISQ devices hold better potential in the long term.

3.7. Dataset

The classification datasets were obtained from Kaggle site and were further explored. The first one, Medical MNIST, is made up of 64x64 pixel images depicting X-ray abdominal, hand, chest, head and spine images. This consists of 10,000 images for each class making a total of 50,000 images in all. The medical MNIST data set includes imaging information from the patient's medical records and the hospital's reports (Kaggle, 2017). The second dataset is the one titled 'Dogs & Cats' which consists of around 30000 of cat and dog images with resolution 512 x 512 pixels (Kaggle 2018).

4. Findings

In this section, the results of three different models are compared and explained.

4.1. Training and Test Accuracy Rates

In all the models in this work, the Adam optimization algorithm is employed due to its power of achieving fast convergence by adaptively changing the learning rate. Cross-entropy loss is used herein since it minimizes classification errors and is one of the most used losses in any machine learning task. ResNet-50 and CaiT were fine-tuned using their default parameters. While the pre-trained features were utilized in the quantum framework of the hybrid quantum model, the full development of quantum-specific operations such as entanglement and superposition were further used in this model to enhance its learning process. The best performance, when QTL with ResNet-50 is applied to the Dogs & Cats dataset, can hence be attributed to contributions from classical pre-training and quantum processing. Importantly, the quantum part introduces special types of transformations in the feature space that are altogether beyond the reach of classical methods of optimization.

The accuracy values corresponding to the model and application for the training and test sets are presented in Table 1. In the Quantum Transfer Learning (QTL) model, it was observed that the highest accuracy was achieved by the ResNet-50 pre-trained model during the validation and testing phases. Models pre-trained with CaiT demonstrated optimal performance in the first or second epoch, whereas the ResNet-50 pre-trained model exhibited superior performance in the ninth or tenth epoch. The Qiskit Hybrid Model, given its status as a quantum machine learning model, demonstrated superior performance on relatively simple datasets such as MNIST. The QTL model demonstrated superior performance on the "Dogs & Cats" dataset relative to the MNIST dataset, reflecting its capacity to utilise more sophisticated quantum gates. In contrast, the models based on CaiT exhibited the poorest validation and testing efficiency.

Results of 94.45% training and 95.5% testing accuracy were achieved on the Qiskit Hybrid Model when combined with CNN feature extraction and Dogs & Cats dataset. The Medical MNIST dataset however saw the training and testing accuracy rise to 99.79% and 99.97% respectively. This sheds light on an additional factor regarding the Medical MNIST being an easier dataset, since the model obtains 99.97% test accuracy, at the 8th epoch. With respect to the "Dogs & Cats" dataset, the accuracy of the model was 68.78% at the 10th epoch after which further

improvement was expected to be achieved. This means that, possibly, the model can produce better outcomes given the opportunity to extensively train on that dataset.

Table 1. Accuracy values of Qiskit hybrid and QTL models

Model	Feature Extraction	Data Set	Train Acc %	Test Acc %
Qiskit Hybrid	CNN	Cats & Dogs	94.45	95.5
Qiskit Hybrid	CNN	Medical Mnist	99.79	99.97
Qiskit Hybrid	CaiT	Cats & Dogs	69.6	68.79
Qiskit Hybrid	CaiT	Medical Mnist	99.68	99.75
QTL	ResNet (Pre-Trained)	Cats & Dogs	97.38	98.62
QTL	ResNet (Pre-Trained)	Medical Mnist	99.68	99.97
QTL	CaiT (Pre-Trained)	Cats & Dogs	97.75	98.98
QTL	CaiT (Pre-Trained)	Medical Mnist	97.13	98.05

Similarly, the QTL model yielded satisfactory accuracy scores when feature extraction techniques were employed with ResNet and CaiT models. This explains the improvement in performance of the models since they were used in pre-trained models. Even so, it was noted that the feature extraction technique of the ResNet(pre trained) gave better results than that of the CaiT (pre trained). This is likely since the ResNet model has a more elaborate general structure leading to more features being recognized.

4.2. Test Metric Values

In this work, accuracy, F1 and F2 scores, Matthews Correlation Coefficient, and sensitivity/specificity metrics were chosen. These metrics here have been selected as giving a comparison that is complete on the performances of both the classical and quantum models. For example, F1 and F2 scores give sensitivity about models in cases where data are imbalanced. Similarly, the Matthews correlation coefficient gives a balanced measure that takes into account correct and incorrect classifications equally. Sensitivity and specificity are useful for comparing performances across the positive class and the negative class. The fact that it may be so informative, may be because entanglement and superposition-easily seen as unique properties of quantum models-are effective in data classification tasks.

Tables 2 and 3 present the summary of the various metrics that are used to evaluate the different implemented models of artificial intelligence and the performance of the models in the assessment of various features and performance aspects. These metrics serve the purpose of measuring the efficiency of a model, however, bridging the gap of why a model is able to perform well or poorly in most cases is attributed to elements like the type of model, its training, and the type of data used. On the other hand, when CaiT feature extraction was performed and training done on "Dogs & Cats" dataset, the F1, F2, and F_β scores for Qiskit Hybrid Model were 0.684. While it looks at this point that performance appears to be poor, the situation is more intricate. Again this may be attributed to the fact that no pre-training was done thus it is likely that the CaiT model requires more epochs for training to acquire the relevant features so as to mask the results.

Table 2. Metric values of the Qiskit hybrid model

Model	Qiskit Hybrid	Qiskit Hybrid	Qiskit Hybrid	Qiskit Hybrid
Feature Extraction	CNN	CNN	CaiT	Cait
Data Set	Cats & Dogs	Medical Mnist	Cats & Dogs	Medical Mnist
F ₁ Score	0.955	0.988875	0.684	0.999
F ₂ Score	0.955	0.988875	0.684	0.999
F _β Score	0.91	0.9775	0.385	0.998
Accuracy	0.95	0.99	0.68	1.0
Specificity	0.955	0.99	0.69	1.0
Matthew's Sensivity	0.955	0.993	0.7992	0.9985
Macro Avg	0.95	0.99	0.68	1.0
Weighted Avg	0.95	0.99	0.68	1.0

Table 3. Metric values of the QTL model

Model	QTL	QTL	QTL	QTL
Feature Extraction	ResNet Pre-Trained	ResNet Pre-Trained	CaiT Pre-Trained	CaiT Pre-Trained
Data Set	Cats & Dogs	Medical Mnist	Cats & Dogs	Medical Mnist
F₁ Score	0.986	0.9997	0.9898	0.9997
F₂ Score	0.986	0.9997	0.9898	0.9997
F_β Score	0.972	0.9995	0.9796	0.9995
Accuracy	0.99	1.0	0.99	1.0
Specifity	0.99	1.0	0.99	1.0
Matthew's Sensivity	0.9828	0.99975	0.9912	0.9995
Macro Avg	0.99	1.0	0.99	1.0
Weighted Avg	0.99	1.0	0.99	1.0

The same parameters as for the above experiment for F₁, F₂ and F_β scores were conducted using Qiskit Hybrid Model with CNN feature extraction and "Dogs & Cats" dataset and scores of 0.955 were found. This implies that this model was able to perform very well for the task in hand. But then when the same model was employed with CaiT feature extraction and tested on the same "Dogs & Cats" dataset, the F₁, F₂ and F_β values obtained were 0.684 which indicated a drop in performance.

This performance difference may arise from the difference in the feature extraction techniques applied. CNNs are more effective in image classification, however, in this case, CaiT may not be the best approach for the task. This could be cleavage that CaiT has a greater structural complexity and therefore likely to give better results on more complicated datasets.

Nonetheless, when the QTL model was integrated with ResNet-50 (pretrained) feature extraction and employed on the 'Dogs & Cats' dataset, the F₁, F₂, and F_β scores were all 0.986 conveying that good performance was quality gained. It is likely that the good performance of this model can be attributed to the use of the pre-trained ResNet-50 model and the QTL model which is appropriate for this sort of task.

5. Result and Discussion

It is apparent from the above sentence that model performance is related to a number of aspects such as the method used for feature extraction, the structure of the model utilized as well as the dataset adopted for model training. Each of these factors can affect the outcomes of the model in a substantial way. It therefore follows that any of these factors has to be analyzed to understand why a particular model works smoothly while another model does not. This may help pinpoint what should be made better in order to improve the efficiency of the model. For example, after extending the training time or changing hyperparameters such a model could demonstrate better performance and therefore promote achieving more precise and better results.

Table 4 contains the best four model results, which embody the outcome from different models and feature extraction techniques on particular datasets. It should be noted that CaiT and QTL models scored very high marks, in line with expectations. ResNet Pre-Trained, CaiT Pre-Trained feature extraction methods reached nearly perfect F₁ and F₂ scores of 0.9997 and 0.9997 respectively with the QTL model. Similar to the above, Qiskit Hybrid model reached very high F₁ and F₂ scores of 0.999 with CaiT feature extraction. The QTL model granted nearly the same F₁ and F₂ scores of 0.9898, but this time on the Cats & Dogs dataset, and used CaiT for feature extraction.

The performance of the models, particularly the CaiT and QTL models, is worth mentioning since they seem to maintain high levels of performance irrespective of datasets used. There is synergy in combining the ability of CaiT to extract features and the QTL model which learns. The QTL model consistently succeeding on a variety of feature extraction methods signifies the best model generalization power. Increasing the dimensions of the simplistically represented data using the convolution based feature extraction improves the performance of the QTL model. The above results demonstrate the feasibility of applying the two approaches in different applications.

The ResNet-50 and CaiT models used in this study exhibited unique capabilities in terms of feature extraction and contributed significantly to the success of the hybrid quantum model. While ResNet-50 provides effective extraction of local and global features with its convolution-based architecture, the CaiT model takes a broader

view of the data with its attention-based structure. The performance of the hybrid quantum models was evaluated in a high RAM simulation environment on Google Colab. The simulator used in this study mimics the functionality of NISQ devices. The successful results obtained in the simulation environment indicate that real NISQ devices can perform much better. Therefore, this study highlights the potential of hybrid quantum models and demonstrates that NISQ devices can take this potential to even higher levels.

Taking all things into account it can be observed that there can be great benefits if both CaiT and QTL models are used together, especially in cases which require high precision. Future work could focus on improving this synergy through hyperparameter optimization and training duration. Also, over wider experiments, an attempt may be made to figure out whether the same progress can be made with other datasets.

Table 4. Four best performing models

Model	QTL	QTL	Qiskit Hybrid	QTL
Feature Extraction	ResNet Pre-Trained	CaiT Pre-Trained	CaiT	CaiT
Data Set	Medical Mnist	Medical Mnist	Medical Mnist	Cats & Dogs
F₁ Score	0.9997	0.9997	0.999	0.9898
F₂ Score	0.9997	0.9997	0.999	0.9898
F_B Score	0.9995	0.9995	0.998	0.9796
Accuracy	1.0	1.0	1.0	0.99
Specifity	1.0	1.0	1.0	0.99
Matthew's Sensivity	0.9997	0.9995	0.9985	0.9912
Macro Avg	1.0	1.0	1.0	0.99
Weighted Avg	1.0	1.0	1.0	0.99

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interests.

References

- Amine Cherrat, I., Kerenidis, I., Mathur, N., et al. "Hybrid Quantum Vision Transformers for Event Classification in High Energy Physics." *Quantum Journal*, 2024.
- Arthur, D., vd., 2022. A hybrid quantum-classical neural network architecture for binary classification. arXiv preprint arXiv:2201.01820.
- Bağcı, S.A., Ekiz, H. ve Yılmaz, A., 2003. Determination of the salt tolerance of some barley genotypes and the characteristics affecting tolerance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27, 253-260. <https://doi.org/xxx.xx./zzz.12345>
- Banchi, L., ve Crooks, G. E., 2021. Measuring analytic gradients of general quantum evolution with the stochastic parameter shift rule. *Quantum*, 5, 356.
- Barenco, A., vd., 1995. Elementary gates for quantum computation. *Physical Review A*, 52(5), 3457–3467.
- Benedetti, M., Lloyd, E., Sack, S., and Fiorentini, M. Parameterized quantum circuits as machine learning models. *Quantum Science and Technology*. 2019, vol. 4, no. 4, p. 043001. DOI: 10.1088/2058-9565/ab4eb5
- Bharti, K., et al. "Noisy intermediate-scale quantum algorithms." *Reviews of Modern Physics*, vol. 94, no. 1, 2022, p. 015004.
- Cerezo, M., et al. "Variational quantum algorithms." *Nature Reviews Physics*, vol. 3, no. 9, 2021, pp. 625-644.
- Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Girshick, R., ve Guizilini, V., 2020. End-to-end object detection with transformers. In *European Conference on Computer Vision*, 213-229. Springer, Cham.
- Cong, I., Choi, S., ve Lukin, M. D., 2019. Quantum convolutional neural networks. *Nature Physics*, 15, 1273-1278.
- Cross, A., 2018. The IBM Q experience and QISKit open-source quantum computing software. *APS March Meeting Abstracts*, L58.003.
- Datta, A., Flammia, S. T., ve Caves, C. M., 2005. Entanglement and the power of one qubit. *Physical Review A*, 72(4), 042316.
- Dhara, B., Agrawal, M., ve Roy, S. D., 2024. Multi-class classification using quantum transfer learning. *Quantum Information Processing*, 23, 34.
- DiVincenzo, D. P., 1998. Quantum gates and circuits. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1969), 261-276.
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zisserman, A., ve Houlsby, N., 2021. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *ICLR*.
- Farhi, E., Goldstone, J., ve Gutmann, S., 2014. A quantum approximate optimization algorithm. arXiv preprint arXiv:1411.4028.
- Fredkin, E., ve Toffoli, T., 1982. Conservative logic. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(3-4), 219–253.
- Garg, S., ve Ramakrishnan, G., 2020. Advances in quantum deep learning: An overview. arXiv preprint arXiv:2005.04316.

- Han, K., Xiao, A., Wu, E., Guo, J., Wang, C., ve Dai, J., 2022. Survey: Transformer based image segmentation using self-attention mechanism. *Expert Systems with Applications*, 195, 116580.
- Henderson, M., Shakya, S., Pradhan, S., ve Cook, T., 2020. Quantum convolutional neural networks: Powering image recognition with quantum circuits. *Quantum Machine Intelligence*, 2(2).
- Kaggle, 2017. Medical MNIST. <https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/medical-mnist>
- Kaggle, 2018. Dogs vs Cats. <https://www.kaggle.com/datasets/salader/dogs-vs-cats>
- Kerenidis, I., Landman, J., ve Prakash, A., 2019. Quantum algorithms for deep convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1911.01117.
- Khan, S., Naseer, M., Hayat, M., Zamir, S. W., Khan, F. S., ve Shah, M., 2022. Transformers in vision: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 55(1), 1-41.
- Khoshaman, A., vd., 2018. Quantum variational autoencoder. *Quantum Science and Technology*, 4(1), 014001.
- Kockum, A. K., 2014. Quantum optics with artificial atoms. Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., and Haffner, P. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*. 1998, vol. 86, no. 11, pp. 2278-2324. DOI: 10.1109/5.726791.
- LEE, Albert; KIM, Sun. *Quantum gates and rotational operations in machine learning*. *Quantum Information Processing*, 2020, 12(7): 98-104.
- Liu, J., vd., 2021. Hybrid quantum-classical convolutional neural networks. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 64(9), 290311.
- McClellan, J. R., et al. "OpenFermion: The electronic structure package for quantum computers." *Quantum Science and Technology*, vol. 5, no. 3, 2020, p. 034014.
- Mari, A., vd., 2020. Transfer learning in hybrid classical-quantum neural networks. *Quantum*, 4, 340.
- Mishra, B., ve Samanta, A., 2022. Quantum Transfer Learning Approach for Deepfake Detection. *Sparklinglight Transactions on Artificial Intelligence and Quantum Computing (STAIQC)*, 2(1), 17-27.
- Mogalapalli, H., vd., 2022. Classical-quantum transfer learning for image classification. *SN Computer Science*, 3(1), 20.
- Noble, W. S., 2006. What is a support vector machine? *Nature Biotechnology*, 24(12), 1565-1567.
- Panda, S.K. ve Choudhury, S., 2005. Chromium stress in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 95-102. <https://doi.org/xxx.xx/zzz.12345>
- PATEL, Raj; SHARMA, Meena. *Entanglement in quantum networks: Applications and gate constructions*. *Quantum Engineering*, 2021, 9(1): 34-42.
- PennyLane, Kasım 2022. Quantum transfer learning. https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_quantum_transfer_learning.html
- Preskill, John. "Quantum computing in the NISQ era and beyond." *Quantum*, vol. 2, 2018, p. 79.
- Qi, J., ve Tejedor, J., 2022. Classical-to-quantum transfer learning for spoken command recognition based on quantum neural networks. In *ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 8627-8631. IEEE.
- Qiskit, Ekim 2022. Machine Learning with Qiskit. <https://qiskit.org/textbook/ch-machine-learning/machine-learning-qiskit-pytorch.html>
- Rebentrost, P., Mohseni, M., ve Lloyd, S., 2014. Quantum support vector machine for big data classification. *Physical Review Letters*, 113(13), 130503.
- Romero, J., Olson, J. P., ve Aspuru-Guzik, A., 2017. Quantum autoencoders for efficient compression of quantum data. *Quantum Science and Technology*, 2(4), 045001.
- Samantaray, S., 2002. Biochemical responses of Cr-tolerant and Cr-sensitive mung bean cultivars grown on varying levels of chromium. *Chemosphere*, 47, 1065-1072. <https://doi.org/xxx.xx/zzz.12345>
- Sarkar, S. "Quantum Transfer Learning for MNIST Classification Using a Hybrid Quantum-Classical Approach." *arXiv*, 2024.
- Schuld, M., Sinayskiy, I., and Petruccione, F. Quantum machine learning: A classical perspective. *Contemporary Physics*. 2019, vol. 60, no. 2, pp. 172-185. DOI: 10.1080/00107514.2018.1457518.
- Schumacher, B., 1995. Quantum coding. *Physical Review A*, 51(4), 2738.
- Shor, P. W., 2002. Introduction to quantum algorithms. *Proceedings of Symposia in Applied Mathematics*, 143-160.
- Shepherd, D. J., 2006. On the Role of Hadamard Gates in Quantum Circuits. *Quantum Information Processing*, 5, 161-177.
- SMITH, John; DOE, Jane. *Hadamard gates and quantum computing algorithms*. *Journal of Quantum Computing*, 2019, 15(3): 245-250.
- Steiner, A., Kolesnikov, A., Zhai, X., Wightman, R., Uszkoreit, J., ve Beyer, L., 2021. How to train your ViT? Data, augmentation, and regularization in vision transformers. arXiv preprint arXiv:2106.10270.
- Taylor, R. D. Quantum Technology Development, Policy and Governance in the US.
- Toffoli, T., 1980. Reversible computing. In *International Colloquium on Automata, Languages, and Programming*, 632-644. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany.
- Toğaçar, M., 2021. X-ışınlı Göğüs İmgelerini Kullanarak Solunum Yolu Hastalıklarının Tespitinde Kuantum Transfer Öğrenme Modelinin Rolü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(5), 1754-1765.
- WANG, Li; YANG, Wei. *Quantum entanglement and its role in machine learning models*. *International Journal of Quantum Information*, 2020, 18(6): 150-162.
- Yan, J., Liu, P., Gu, X., et al. "Remote Sensing Image Scene Classification in Hybrid Classical-Quantum Transfer Learning CNN with Small Samples." *Sensors*, 23(18), 2023.
- Yang, J., vd., 2023. MedMNIST v2-A large-scale lightweight benchmark for 2D and 3D biomedical image classification. *Scientific Data*, 10(1), 41.
- ZHU, Jing; HUANG, Zhen; KAIS, Sabre. 2009. Simulated quantum computation of global minima. *Molecular Physics*, 107(19), 2015-2023.



POLYESTER LİF UZUNLUĞU VE KATKI ORANININ BETONUN MEKANİK VE ISI YALITIM ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Gülşah SUSURLUK^{1*}, Hakan SARIKAYA²

¹ İstanbul Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tekstil Teknolojisi Programı, İstanbul

² Uşak Üniversitesi, Banaz Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Uşak

Anahtar Kelimeler

*Polyester Lifi,
Basınç Dayanımı,
Eğilme Dayanımı,
Isı yalıtım.*

Öz

İnşaat mühendisliği yapı malzemelerinde üstün yalıtım ve performans özellikleri sağlamak için, tekstil sektöründe özellikle 2000'li yıllardan itibaren en çok kullanılan ve tüketilen sentetik lif olarak tanımlanan polyester (PES) lifi çok önemli bir hammadde kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple, bu çalışma, farklı PES lif uzunlukları (3, 4.5 ve 6 cm) ve farklı lif katkı oranlarında tasarlanan PES lif katkılı betonlarda basınç, eğilme dayanımı ve ısı yalıtım özellikleri arasındaki ilişkilere odaklanmıştır. Bu amaçla çimento ağırlığınca göre %0, %0,5, %1 ve %1.5 PES lifi içeren rastgele dağıtılmış lif katkılı beton karışımları hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlar, PES lif katkısının betonun mekanik özelliklerini artırabileceğini, özellikle eğilme dayanımında olumlu etki sağladığını ortaya koymaktadır. Eğilme kazancına yönelik %1.5 lif katkı oranında %32.4'lük bir kazanç elde edilmiştir. Lif uzunluğunun artması ve karışım oranlarının artması ile yalıtkanlık değerlerinde dikkate değer bir artış görülmektedir. Dolayısıyla lif uzunlukları ve lif içerik oranları ile mekanik ve yalıtım özellikleri arasındaki ilişkilere yönelik R² 0.98 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, inşaat sektöründe sentetik liflerin içeriğinin beton karışımlarına entegrasyonu etkili bir tasarım yaklaşımı olarak görülmektedir.

THE EFFECT OF POLYESTER FIBER LENGTH AND MIX RATIO ON MECHANICAL AND THERMAL INSULATION PROPERTIES OF CONCRETE

Keywords

*Polyester Fiber,
Compressive Strength,
Flexural Strength,
Thermal Insulation.*

Abstract

Polyester (PES) fiber, recognized as the most widely used and consumed synthetic fiber in the textile industry, is a significant raw material source that provides superior insulation and performance characteristics in construction materials. Therefore, this study focuses on the relationships among compressive strength, flexural strength, and thermal insulation properties in PES fiber-incorporated concrete designed with different PES fiber lengths (3, 4.5 and 6 cm) and different content ratios. For this purpose, randomly distributed fiber-incorporated concrete mixtures containing 0%, 0.5%, 1% and 1.5% PES fiber by weight of cement were prepared. Experimental results indicate that PES fiber additive can enhance the mechanical properties of concrete, particularly providing a positive effect on flexural strength. A significant enhancement in thermal insulation values is observed with the increase of fiber length and fiber content ratios. Therefore, it is revealed that the relationships between fiber lengths and fiber content ratios and mechanical and insulation properties can be estimated with a correlation coefficient of R² of 0.98. This study demonstrates that the integration of synthetic fibers into concrete mixtures represents an effective design approach in the construction industry.

Alıntı / Cite

Susurluk, G., Sarıkaya, H., (2025). Polyester Lif Uzunluğu ve Katkı Oranının Betonun Mekanik ve Isı Yalıtım Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 107-119.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Susurluk, 0000-0003-3284-2248
H. Sarıkaya, 0000-0002-8043-3302

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	28.11.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	07.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: gulsahsusurluk@beykent.edu.tr, +90 507 593 1977

THE EFFECT OF POLYESTER FIBER LENGTH AND MIX RATIO ON MECHANICAL AND THERMAL INSULATION PROPERTIES OF CONCRETE

Gülşah SUSURLUK^{1†}, Hakan SARIKAYA²

¹Textile Technology Department, School of Advanced Vocational Studies, Istanbul Beykent University, Istanbul, Turkey

²Construction Technology Department, School of Advanced Vocational Studies, Usak University, Usak, Turkey

Highlights

- Utilization of synthetic fiber into cement mixtures.
 - Enhanced flexural strength and thermal insulation via polyester fiber.
 - Effect of fiber length on the strength-insulation mechanism.
-

Purpose and Scope

The focus of this research is to investigate the effects of different fiber lengths and content ratios of polyester fibers on the mechanical and insulation properties of concrete samples and to provide a new perspective on the use of synthetic-based significant raw material sources in the construction sector.

Design/methodology/approach

The methodology of this study involves preparing concrete mixes containing PES fibers of different lengths (3, 4.5 and 6 cm) and content ratios (0%, 0.5%, 1%, and 1.5% by weight of cement). Experiments were conducted to evaluate the compressive strength, flexural strength and thermal insulation properties, and then the correlations between the variables were analyzed. This approach will provide insights into the performance improvements achieved by incorporating PES fibers into concrete.

Findings

At both 7 and 28 days of curing, the increases in PES fiber length and fiber content ratio resulted in limited decreases in the compressive strength among the mechanical properties. A remarkable performance increase of 32.4% and 25.51% was achieved in flexural strength and thermal insulation values at maximum fiber length and fiber content ratio, respectively. In addition, our study reveals that the relationships observed among compressive strength-flexural strength-insulation properties can be estimated with high correlation coefficient.

Research limitations/implications (if applicable)

The homogeneity of the designed concrete mixtures and the uniform distribution of PES fiber particles in the cement matrix is an important factor in determining improved thermal insulation and mechanical properties. In order to provide remarkable insulation and performance properties in civil engineering building materials, synthetic-based fibers may be preferred in future studies to contribute to the development of concrete design with PES fiber content.

Originality

This study presents the effect of PES fiber-incorporated concrete mixtures designed with different fiber lengths and content ratios in improving mechanical and thermal conductivity properties. It provides a new perspective on the utilization of PES fiber, which is the most widely consumed and utilized synthetic fiber in the textile sector, especially for providing excellent insulation properties in the construction sector.

[†] Corresponding author: gulsahsusurluk@beykent.edu.tr, +90 507 593 1977

1. Giriş (Introduction)

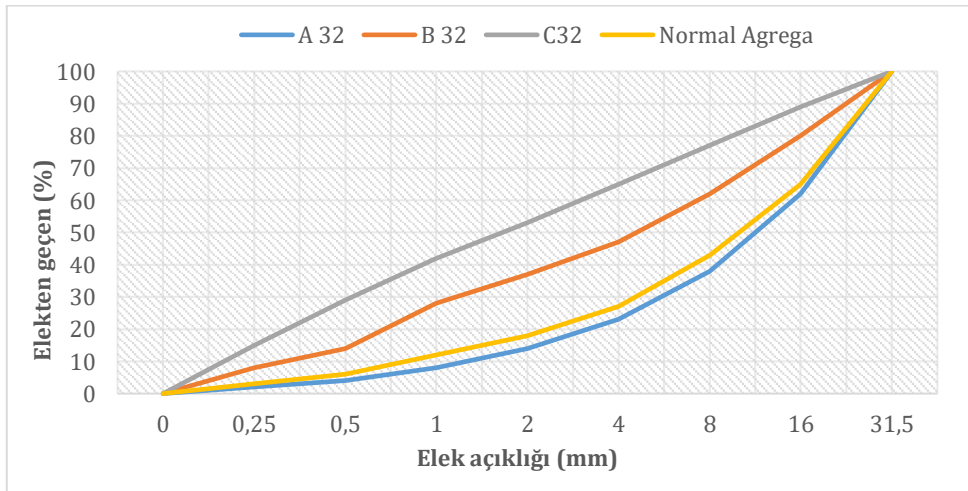
Dünya çapında en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olan betona olan talepte, özellikle 21. yüzyılın başlarından itibaren önemli bir artış yaşanmaktadır (Khan ve McNally, 2023; Althoey vd., 2023; Nassar vd., 2022). Beton; gerilme kapasitesi, enerji yutma ve darbe direnci açısından bazı sınırlı özelliklere sahip kırılğan bir malzemedir (Wang vd., 2000; AbdelAleem ve Hassan, 2019). Beton yapıların özellikle mekanik ve performans özellikleri açısından sünek davranış göstermeleri sınırlı özelliklerin giderilmesi açısından önem taşımaktadır. Betonun bu özelliklerini geliştirmek amacıyla beton içerisine tekstil sektörünün en küçük yapıtaşı (lif) olarak adlandırılan doğal veya sentetik esaslı lifler ilave edilmektedir. Sentetik esaslı lifler sünek karakterde malzeme yapısına sahip olmasından dolayı betona dahil edilmesi hem kırılğanlığı hafifletmeye yardımcı olmakta, hem de betonun sünekliliğini, enerji yutma ve darbe direncini artırmaya katkı sağlamaktadır (AbdelAleem ve Hassan, 2019; Zheng vd., 2008). Bu sebeple dünyada tekstil sektöründe en çok üretilen ve tüketilen sentetik lif olarak tanımlanan polyester (PES) lifi çok önemli bir hammadde kaynağı olarak öne çıkmakta ve özellikle inşaat sektöründe betonun gerilme kapasitesi, çatlak ve darbe direnci gibi üstün mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlamaktadır (Fode vd., 2024; Patti ve Cicala, 2021; Ba 2023, Kiruthika vd., 2020; Salhotra vd., 2023).

Mevcut çalışmaların çoğu, doğal veya sentetik liflerin yapı malzemelerine katkısının mekanik özelliklerinin etkisine odaklanılmıştır. Fakat lif takviyeli çimentolu malzemenin enerji yutma kapasitesinin ve sünekliliğinin artışı, lif ile çimentolu matris arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu etkileşimin bulunduğu alan, arayüz geçiş bölgesi (ITZ) olarak tanımlanmaktadır. Aslında lif takviyeli beton içerisinde, ITZ'deki elyaf ve matris arasındaki bağlanmayı etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler lif özelliklerinden lif türü, lif uzunluğu, lif geometrisi, lif çapı vb. özellikleriyle ilgili faktörlerdir. Bu faktörler nihayetinde yük altında betonun genel deformasyon davranışını etkilemektedir (Ranade vd., 2015; Babafemi ve Boshoff, 2017). Ayrıca hidrofil yani nemi ve suyu iyi çeken bir elyaf kullanıldığında, lif ile matris arasındaki yapı bozulduğu için sentetik esaslı lifler yapıyı etkilememektedir. Bu sebeple sentetik lif takviyeli beton tasarımları büyük ölçüde lifin türüne ve özelliklerine bağlı olduğu ifade edilmiştir (Babafemi ve Boshoff, 2017; Nanni vd. 1998). Son yıllarda farklı lif uzunlukları, farklı lif özelliklerinin kullanılmasıyla tasarlanan beton karışımlarının mekanik özelliklerini arttırdığı çalışmalara odaklanılırken (Al-Ameeri 2013; Anand vd., 2016; Khaloo vd., 2014; Eduardo vd., 2008; El-Dieb 2009) yalıtım özelliklerine odaklanılmamıştır. Bu nedenle, bu araştırmanın odak noktası, farklı lif uzunluklarında ve katkı oranlarında polyester lifi içeren beton numunelerinin mekanik ve yalıtım özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve inşaat sektöründe sentetik bazlı önemli hammadde kaynaklarının kullanımı için yeni bir bakış açısı sunmaktır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada TS EN 206+A2 standardına göre üretilen beton karışımlarına, sentetik liflerin en önemli hammadde kaynağı olan PES lifleri ilave edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan TS EN 196-1 standardına uygun ve beton kompozisyonlarında kullanılan CEM I 42,5 R tipi çimento, Afyon Çimentodan, agrega ve su ise Oktaş Beton tarafından tedarik edilmiştir. Bu malzemelerin fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir. Beton numunelerine ilave edilen PES liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri de Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca çalışmamızda kullanılan agreganın tane boyutu dağılımını gösteren granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Granülometri eğrisi

Tablo 1. Kullanılan çimento ve agreganın kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri
(Chemical compositions and physical properties of used cement and aggregate)

	Çimento	Agrega
Kimyasal bileşimler (wt/wt %)		
SiO ₂	19.1	20.9
Al ₂ O ₃	5.19	0.4
Fe ₂ O ₃	2.65	0.2
CaO	63.4	42.6
MgO	1.83	0.4
SO ₃	2.95	-
Na ₂ O	0.22	<0.1
K ₂ O	0.94	0.1
Cl ⁻	0.011	-
Fiziksel özellikler		
Yoğunluk (g/cm ³)	3.10	-
Etüv kurusu (g/cm ³)	-	2.55
Özgül yüzey alan (cm ² /g)	3680	-

Tablo 2. PES lifinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Physical and mechanical properties of PES fiber)

Polyester lifi	
Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	1.38
Nem (%)	0.4-0.8
Uzunluk (mm)	30-50
Çap (µm)	10-15
Mekanik özellikler	
Kopma mukavemeti (N/mm ²)	30-40
Başlangıç modülü (GPa)	2-3

2.2. Karışım Oranları (Mix Proportions)

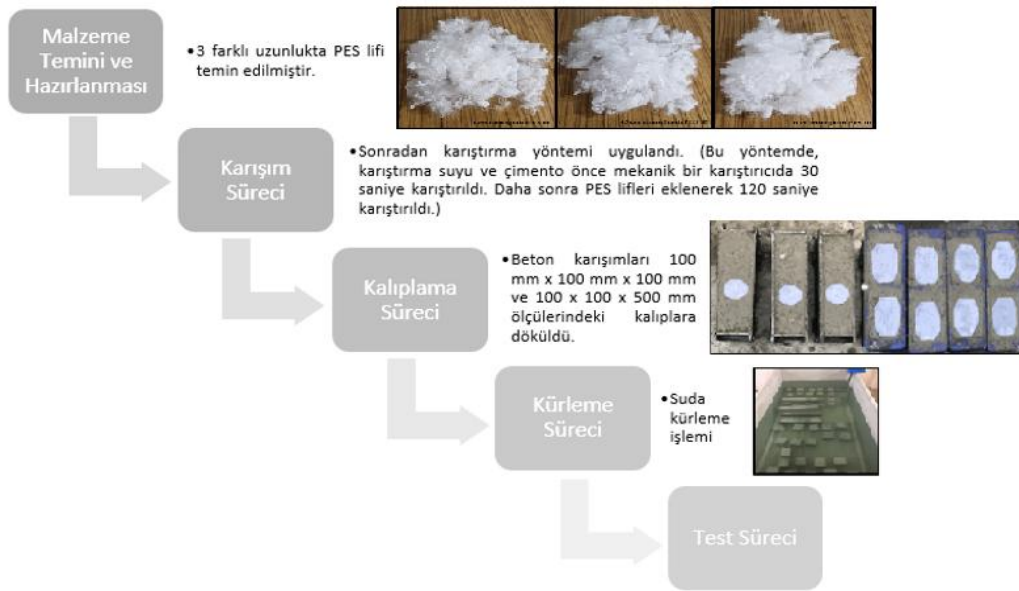
PES lif ilavesinin beton numunelerinin mekanik ve yalıtım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, bu deneysel çalışmamızda 9 farklı beton karışımı oluşturulmuştur. Bu amaçla, beton karışımlarında çimento miktarı sabit tutularak çimento ağırlığının %0.5, %1 ve %1.5'i oranında PES lifi kullanılmıştır. Tablo 3'te üretilen beton numunelerine ait karışım oranları görülmektedir. PES-0, PES-3-0.5, PES-3-1, PES-3-1.5, PES-4.5-0.5, PES-4.5-1, PES-4.5-1.5, PES-6-0.5, PES-6-1 ve PES-6-1.5 olarak etiketlenen toplam 9 karışım oluşturulmuştur. Numuneler herhangi bir lif içermeyen PES-0, lif uzunluğu 3, 4.5 ve 6 cm olanlar sırasıyla PES-3, PES-4.5 ve PES-6 olacak edecek şekilde etiketlenmiştir. Sondaki "0,5", "1" ve "1,5" etiketleri beton karışımına eklenen PES lif miktarını yüzde olarak göstermektedir.

Tablo 3. Karışım oranları (Mix proportions)

Karışım	Çimento (kg/m ³)	İnce Agregat (kg/m ³)	Kaba Agregat (kg/m ³)	PES lifi (g)	Su (kg/m ³)
PES-0	300	722	1111	-	160
PES-3-0.5	300	722	1111	15	160
PES-3-1	300	722	1111	30	160
PES-3-1	300	722	1111	45	160
PES-4.5-0.5	300	722	1111	15	160
PES-4.5-1	300	722	1111	30	160
PES-4.5-1.5	300	722	1111	45	160
PES-6-0.5	300	722	1111	15	160
PES-6-1	300	722	1111	30	160
PES-6-1.5	300	722	1111	45	160

2.3. Numune Hazırlanması, Kür Koşulları ve Uygulanan Testler (Sample Preparation, Curing Conditions and Testing Procedures)

Deneysel çalışmalar kapsamında karışımlar mekanik bir karıştırıcıda karıştırılmış ve karışımlar 100 x 100 x 100 mm ve 100 x 100 x 500 mm'lik kalıplara dökülmüştür. Karışımların oluşturulması esnasında dikey eksenli bir karıştırıcı yardımıyla karıştırma işlemi uygulanmıştır. Su kademeli olarak homojen bir matris elde edilene kadar karışımlara eklenmiştir. Karışım suyu olarak doğal kaynak suyu kullanılmıştır. Gao ve diğerlerinin çalışmasında önerilen sonradan karıştırma yöntemi uygulanmıştır (Gao vd., 2017). Daha sonra beton karışımları standart küp kalıplara dökülmüştür ve numunelerin homojenliğini artırmak amacıyla etkin bir vibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen beton numuneleri 22 ± 2 °C de ilk 24 saat etüvde bekletilmiştir. Ertesi gün etüvden çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün boyunca iki farklı periyotta suda kür işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin suda kür işlemi, oda sıcaklığı koşullarında kür havuzuna tamamıyla batırılmaları suretiyle gerçekleştirilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler, kür havuzundan çıkarılarak suda kürlenmiş beton numunelerine sırasıyla kuru birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve termal iletkenlik katsayısı testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm testler 22 ± 2 °C ve %65 bağıl nem içeren ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2 numune hazırlama akış diyagramı sürecini göstermektedir. Şekil 3, uygulanan test programını göstermektedir.



Şekil 2. Numune hazırlama akış diyagramı süreci (Sample preparation flow chart process)



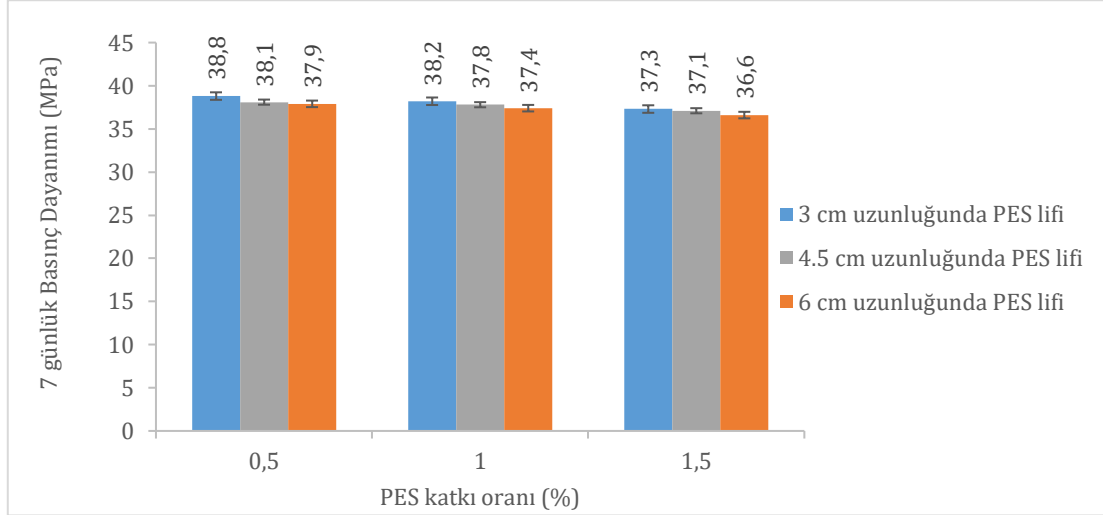
Şekil 3. Uygulanan test programı (Implemented test program)

Basınç dayanımı testi, 100 x 100 x 100 mm ölçülerinde üretilen beton numunelerine, eğilme dayanımı testi ise 100 x 100 x 500 mm ölçülerinde üretilen beton numunelerine uygulanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı tespitinde, her bir karışım için 3 farklı test sonucunun aritmetik ortalaması alınarak karışımın basınç ve eğilme dayanımı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı testi, TS EN 12390-4 standardı esaslarına göre, eğilme dayanımı testi ise TS EN 12390-5 standardı esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. PES lif katkıli beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayılarını belirlemek için 100 x 100 x 100 mm ölçülerinde üretilen numuneler kesilerek 100 x 50 x 20 mm boyutlarına getirilmiştir. Elde edilen numunelerin ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri ASTM C 1113-09 hot wire standardına uygun termal iletkenlik katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her numune için termal iletkenlik katsayısı numunenin farklı bölgeleri için beş kez ölçülmüş ve ortalama sonuç numunenin termal iletkenlik katsayısı olarak kabul edilmiştir. Analizler QTM-500 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

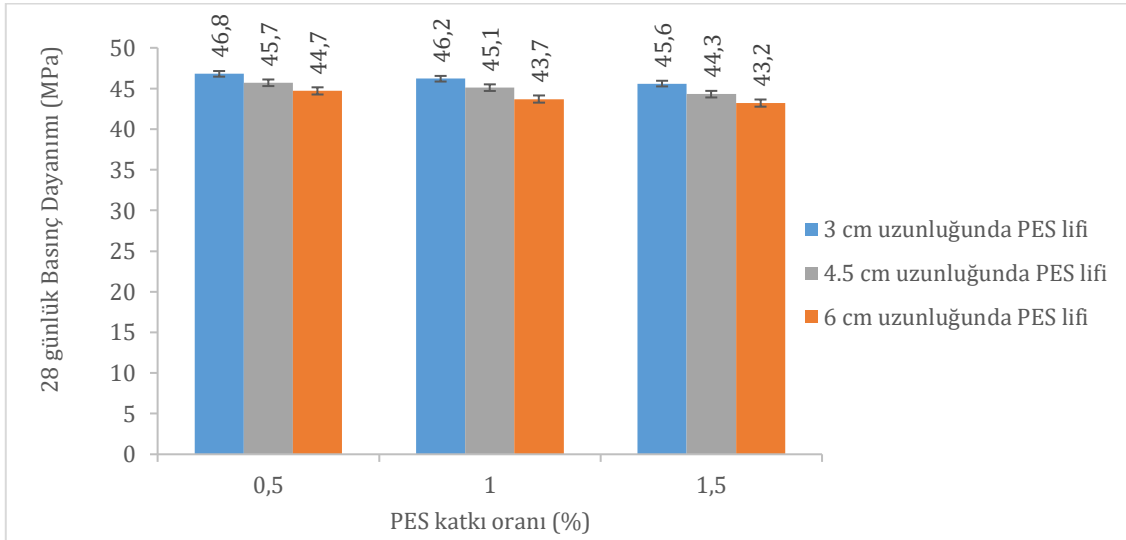
3. Bulgular ve Tartışma (Results And Discussions)

3.1. Basınç Dayanımı Test Sonuçları (Compressive Strength Test Results)

Şekil 4 ve 5'te, suda kürlenme koşulu altında farklı uzunluk ve içerikte PES lifi içeren beton numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları görülmektedir.



Şekil 4. Farklı uzunluk ve içerikte tasarlanan PES lif katkılı beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı test sonuçları (7-day compressive strength test results of PES fiber-incorporated concrete samples designed with different lengths and content ratios)



Şekil 5. Farklı uzunluk ve içerikte tasarlanan PES lif katkılı beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı test sonuçları (28-day compressive strength test results of PES fiber-incorporated concrete samples designed with different lengths and content ratios)

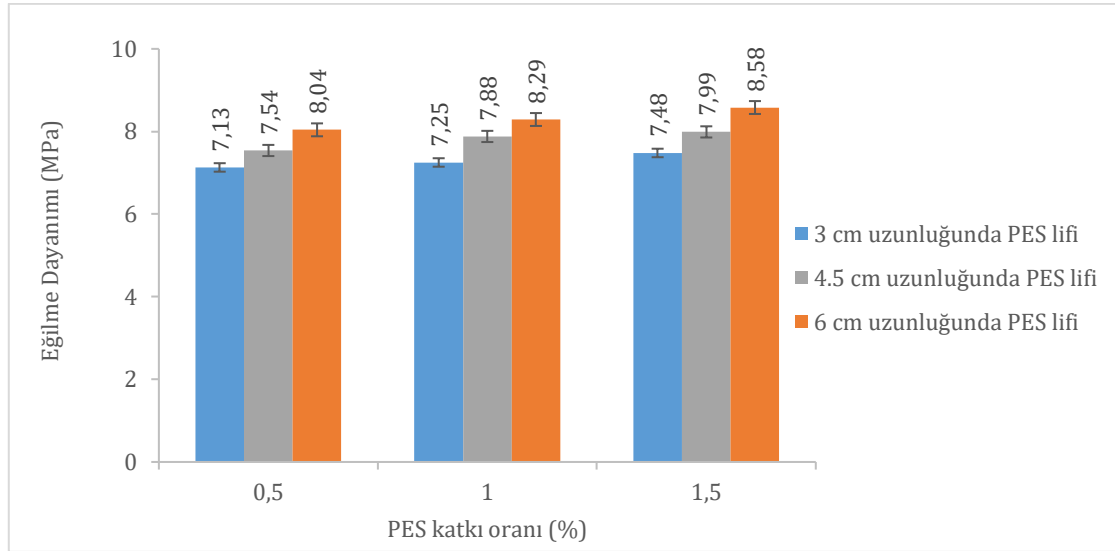
Katkısız numune 7 günlük kürlenme süresi sonunda 41.6 MPa dayanıma ulaşmıştır. 3 cm uzunluğunda PES lif katkısı ile oluşturulan beton karışımlarına %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında PES lifi eklenmesi basınç dayanımında sırasıyla %6.73, %8.17 ve %10.33 oranında azalmaya neden olmuştur. 4.5 cm uzunluğunda PES lif katkısı ile oluşturulan beton karışımlarına %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında PES lifi eklenmesi basınç dayanımında sırasıyla %8.41, %9.13 ve %10.81 oranında azalmaya neden olmuştur. 6 cm uzunluğunda PES lif katkısı ile oluşturulan beton karışımlarına %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında PES lifi eklenmesi basınç dayanımında sırasıyla %8.89, %10.09 ve %12.01 oranında azalmaya neden olmuştur.

Katkısız numune 28 günlük kürlenme süresi sonunda 49.6 MPa dayanıma ulaşmıştır. %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında 3 cm uzunluğunda PES lifi eklenmesiyle oluşturulan karışımlar için basınç dayanımında sırasıyla %5.64, %6.85 ve %8.06 oranında azalmaya neden olmuştur. %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında 4.5 cm uzunluğunda PES lifi eklenmesiyle oluşturulan karışımlar için basınç dayanımında sırasıyla %7.86, %9.07 ve

%10.68 oranında azalmaya neden olmuştur. %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında 6 cm uzunluğunda PES lifi eklenmesiyle oluşturulan karışımlar için basınç dayanımında sırasıyla %9.87, %11.89 ve %12.9 oranında azalmaya neden olmuştur. 7 ve 28 günlük kürlenme sonunda betonun basınç dayanımı, PES lif uzunluğu ve lif içerik oranı ne kadar yüksek ise basınç dayanımının o kadar düşük olduğu yönünde bir eğilim göstermektedir. Lif katkısının beton karışımlarına minimum içerikte bile dahil edilmesi, matrisin daha zayıf olmasına neden olduğu ve lifin ara yüzey bölgesi ile çimento matrisi arasındaki bağlanma mekanizmasını azalttığından dolayı lif içeriği oranının betonun basınç dayanımı üzerindeki kritik etkisinin altını çizmektedir (Michalik vd., 2023).

3.2. Eğilme Dayanımı Test Sonuçları (Flexural Strength Test Results)

Şekil 6, suda kürlenme koşulu altında farklı uzunluk ve içerikte PES lifi içeren beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı testinin sonuçlarını göstermektedir.

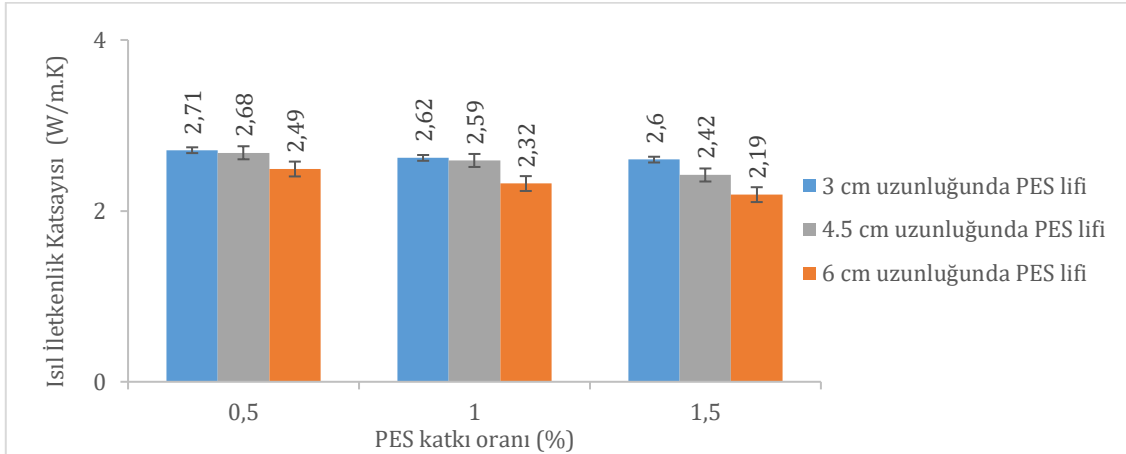


Şekil 6. Farklı uzunluk ve içerikte tasarlanan PES lif katkıli beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı test sonuçları (28-day flexural strength test results of PES fiber-incorporated concrete samples designed with different lengths and content ratios)

Lif içermeyen kontrol numunesinin 28 günlük kürlenme işlemi sonrasında 6.48 MPa eğilme mukavemeti değerine ulaşmıştır. %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında 3 cm uzunluğunda PES lifi eklenmesiyle oluşturulan karışımlar için eğilme dayanımında sırasıyla %10.03, %11.88 ve %15.43 oranında artışa neden olmuştur. %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında 4.5 cm uzunluğunda PES lifi eklenmesiyle oluşturulan karışımlar için eğilme dayanımında sırasıyla %16.35, %21.6 ve %23.3 oranında artışa neden olmuştur. %0.5, %1 ve %1.5 içerik oranlarında 6 cm uzunluğunda PES lifi eklenmesiyle oluşturulan karışımlar için eğilme dayanımında sırasıyla %24.07, %27.93 ve %32.4 oranında artışa neden olmuştur. 28 günlük kürlenme sonunda, PES lif uzunluğu ve lif içerik oranı ne kadar yüksek ise betonun eğilme mukavemeti değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Bu noktada, 28 günlük PES lif içeren numunelerde artan uzunluk ve içeriğinin, eğilme dayanımlarını önemli düzeyde geliştirdiği net olarak söylenebilir.

3.3. Isıl İletkenlik Katsayısı Test Sonuçları (Thermal Conductivity Coefficient Test Results)

28 günlük suda kürlenme koşulu altında değerlendirilen PES katkılı beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları Şekil 7'de gösterilmiştir.

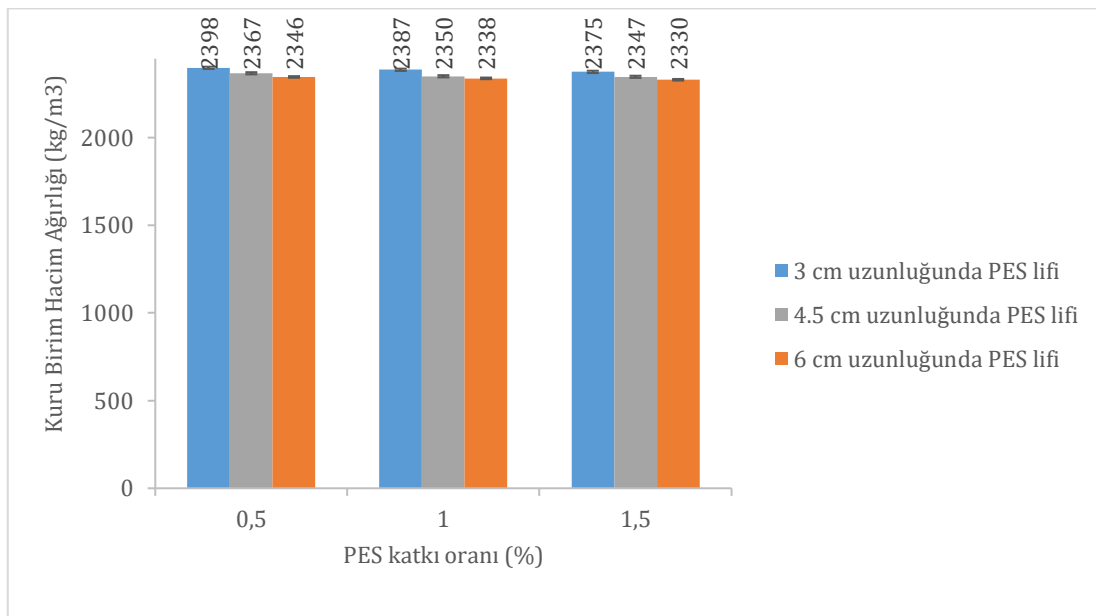


Şekil 7. Farklı uzunluk ve içerikte tasarlanan PES lif katkılı beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı test sonuçları (Thermal conductivity coefficient test results of PES fiber-incorporated concrete samples designed with different lengths and content ratios)

Lif içermeyen kontrol numunesinin 28 günlük kürlenme işlemi sonrasında ısı iletkenlik değeri 2.94 W/mK'dir. 3 cm uzunluğunda PES lif katkısı içeren numunelerde, ısı iletkenlik katsayısı azalmaları %0.5, %1 ve %1.5 PES lif içerikleri için sırasıyla %7.82, %10.88 ve %11.56 olarak bulunmuştur. 4.5 cm uzunluğunda PES katkısı içeren numunelerde, ısı iletkenlik katsayısı azalmaları %0.5, %1 ve %1.5 PES lif içerikleri için sırasıyla %8.84, %11.9 ve %17.68 olarak bulunmuştur. 6 cm uzunluğunda PES lif katkısı içeren numunelerde, ısı iletkenlik katsayısı azalmaları %0.5, %1 ve %1.5 PES lif içerikleri için sırasıyla %15.3, %21.08 ve %25.51 olarak bulunmuştur. 28 günlük kürlenme işlemi sonunda betonun ısı iletkenlik katsayısı, hem PES lif uzunluğu hem de PES lif katkı oranı ne kadar yüksekse, ısı iletkenlik katsayısının o kadar düşük olması eğilimini göstermiştir. Beton karışımlarına minimum uzunluk ve içerikte bile PES lifi eklenmesi, yalıtım performansı açısından olumlu etki göstermektedir.

3.4. Kuru Birim Hacim Ağırlığı Test Sonuçları

28 günlük suda kürlenme koşulu altında değerlendirilen PES katkılı beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı testinin sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir.

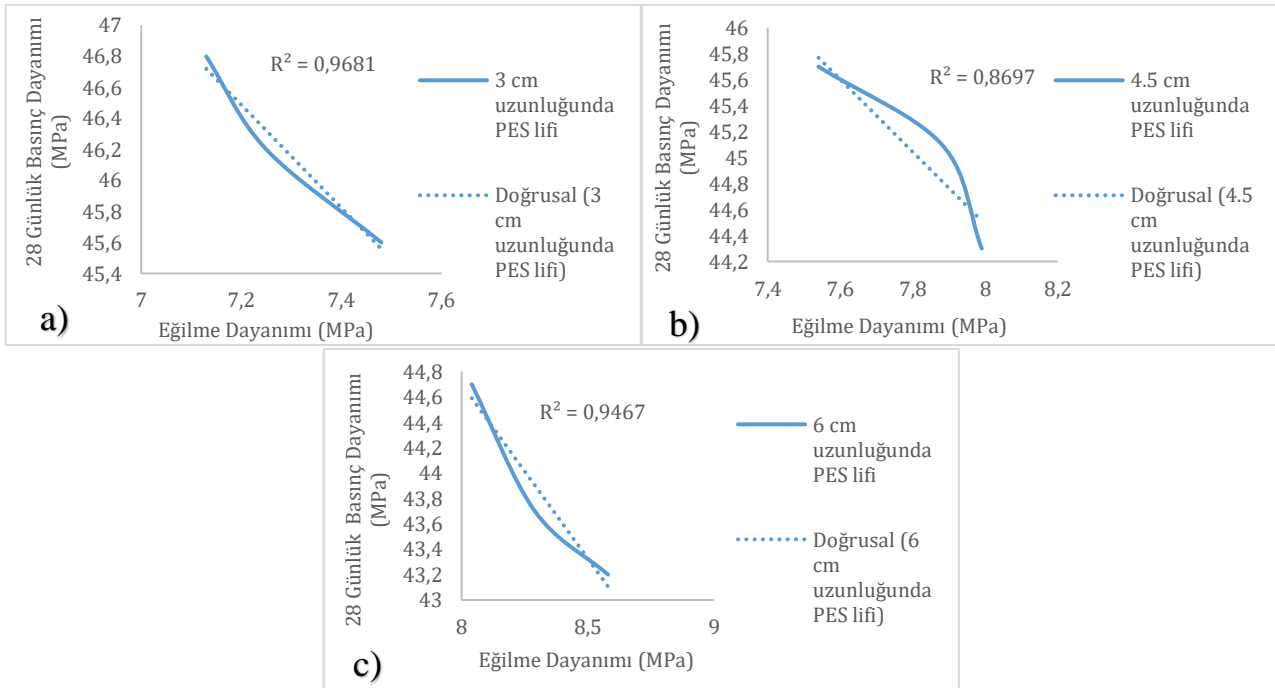


Şekil 8. Farklı uzunluk ve içerikte tasarlanan PES lif katkılı beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı test sonuçları (Dry unit volume weight test results of PES fiber-incorporated concrete samples designed with different lengths and content ratios)

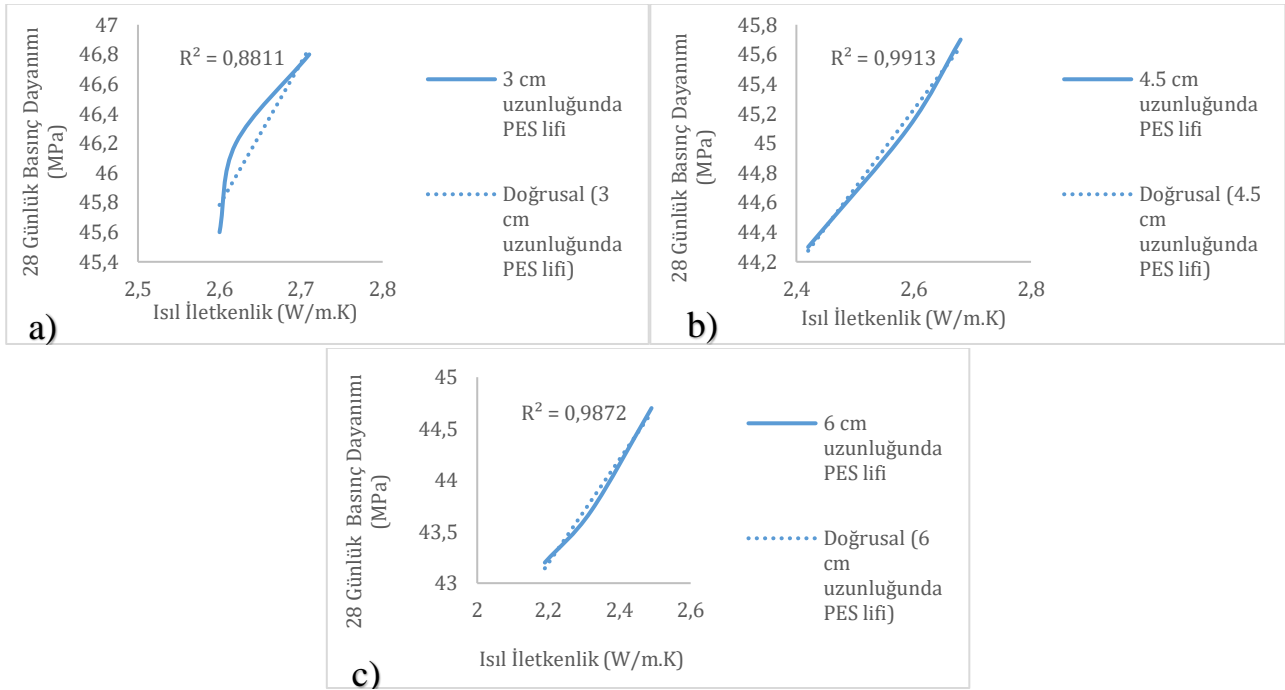
Lif içermeyen kontrol numunesinin 28 günlük kütleme işlemi sonrasında kuru birim hacim ağırlığı 2404 kg/m^3 'tür. 3 cm uzunluğunda PES lif katkısı içeren numunelerde, kuru birim hacim ağırlığı %0.5, %1 ve %1.5 PES lif içerikleri için sırasıyla %0.24, %0.70 ve %1.2 olarak bulunmuştur. 4.5 cm uzunluğunda PES katkısı içeren numunelerde, ısıl iletkenlik katsayısı azalmaları %0.5, %1 ve %1.5 PES lif içerikleri için sırasıyla %1.53, %2.24 ve %2.37 olarak bulunmuştur. 6 cm uzunluğunda PES lif katkısı içeren numunelerde, ısıl iletkenlik katsayısı azalmaları %0.5, %1 ve %1.5 PES lif içerikleri için sırasıyla %2.41, %2.74 ve %3.07 olarak bulunmuştur. 28 günlük kütleme işlemi sonunda betonun kuru birim hacim ağırlığı, hem PES lif uzunluğu hem de PES lif katkı oranı ne kadar yüksekse, kuru birim hacim ağırlığı değerlerinin o kadar düşük olması yönünde eğilim göstermiştir.

3.5. Mekanik Özellikler-Yalıtım Özellikler İlişkisi (Mechanical Properties-Insulation Properties Relationship)

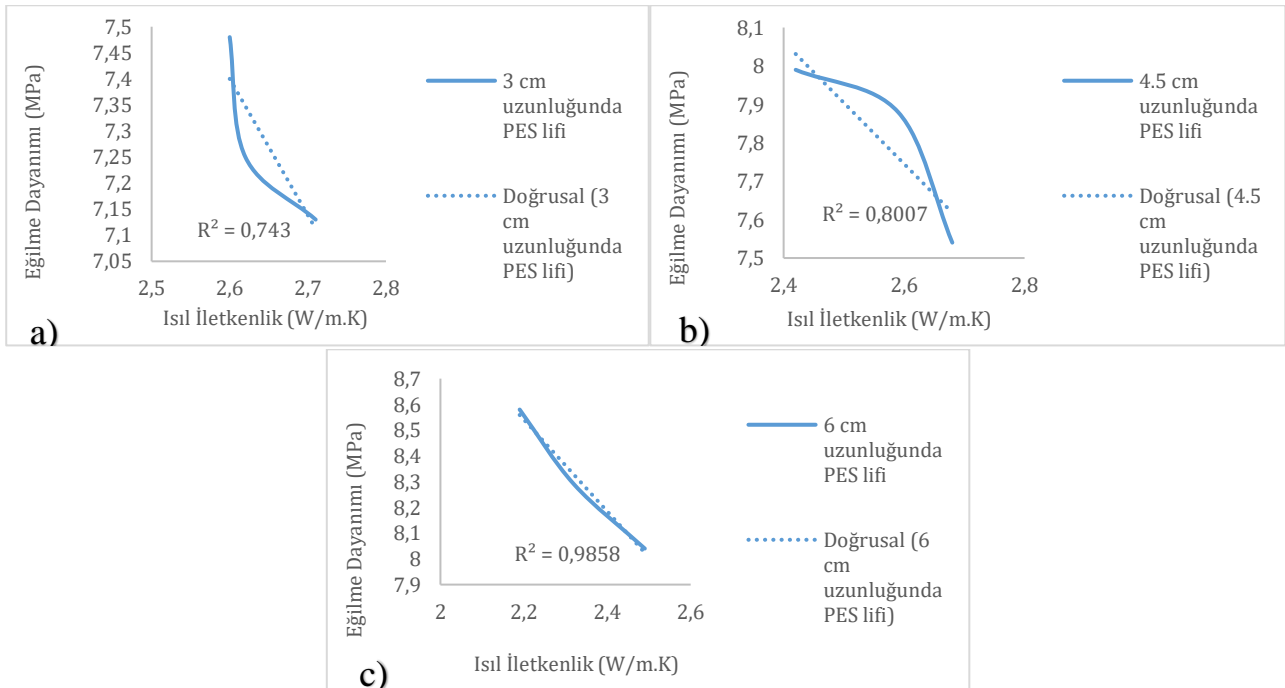
Şekil 9, PES lif katkılı beton numunelerinin basınç-eğilme dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 9.a, 9.b ve 9.c, 3, 4.5 ve 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç-eğilme dayanımı arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. Şekil 10, PES lif katkılı beton numunelerinin basınç dayanımı-ısıl iletkenlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 10.a, 10.b ve 10.c, 3, 4.5 ve 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç dayanımı-ısıl iletkenlik arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. Şekil 11. PES lif katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımı-ısıl iletkenlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 11.a, 11.b ve 11.c, 3, 4.5 ve 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin eğilme dayanımı-ısıl iletkenlik arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. Şekil 12.a, 12.b ve 12.c 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin birim hacim ağırlığının basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ısıl iletkenlik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirtmektedir.



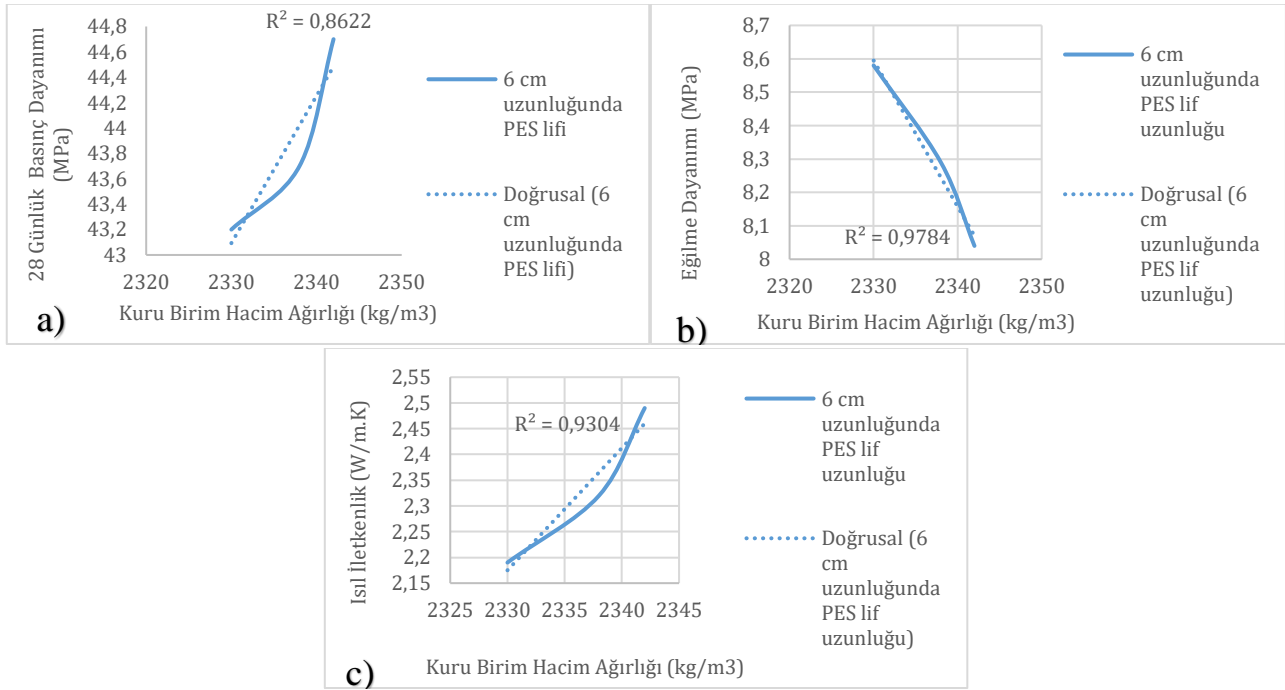
Şekil 9. PES lif katkılı beton numunelerinin basınç-eğilme dayanımı arasındaki ilişki **a)** 3 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç-eğilme dayanımı arasındaki ilişki **b)** 4.5 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç-eğilme dayanımı arasındaki ilişki **c)** 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç-eğilme dayanımı arasındaki ilişki (Relationship between the compressive and flexural strength of PES fiber-incorporated concrete samples **a)** Relationship between the compressive-flexural strength of concrete samples designed using 3 cm length PES fiber **b)** Relationship between the compressive-flexural strength of concrete samples designed using 4.5 cm length PES fiber **c)** Relationship between the compressive-flexural strength of concrete samples designed using 6 cm length PES fiber)



Şekil 10. PES lif katkılı beton numunelerinin basınç dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **a)** 3 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **b)** 4.5 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **c)** 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin basınç dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki (Relationship between the compressive strength-thermal conductivity of PES fiber-incorporated concrete samples **a)** Relationship between the compressive strength-thermal conductivity of concrete samples designed using 3 cm length PES fiber **b)** Relationship between the compressive strength-thermal conductivity of concrete samples designed using 4.5 cm length PES fiber **c)** Relationship between the compressive strength-thermal conductivity of concrete samples designed using 6 cm length PES fiber)



Şekil 11. PES lif katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **a)** 3 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin eğilme dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **b)** 4.5 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin eğilme dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **c)** 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin eğilme dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki (Relationship between the flexural strength-thermal conductivity of of PES fiber-incorporated concrete samples **a)** Relationship between the flexural strength-thermal conductivity of concrete samples designed using 3 cm length PES fiber **b)** Relationship between the flexural strength-thermal conductivity of concrete samples designed using 4.5 cm length PES fiber **c)** Relationship between the flexural strength-thermal conductivity of concrete samples designed using 6 cm length PES fiber)



Şekil 12. PES lif katkılı beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığının basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki **a)** 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı-basınç dayanımı arasındaki ilişki **b)** 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı-eğilme dayanımı arasındaki ilişki **c)** 6 cm uzunluğunda PES lifi kullanılarak tasarlanan beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı-ısı iletkenlik arasındaki ilişki (Relationship between compressive strength-flexural strength-thermal conductivity of dry unit weight of PES fiber-incorporated concrete samples) **a)** Relationship between the dry unit weight-compressive strength of concrete samples designed using 6 cm length PES fiber **b)** Relationship between the dry unit weight-flexural strength of concrete samples designed using 6 cm length PES fiber **c)** Relationship between the dry unit weight-thermal conductivity of concrete samples designed using 6 cm length PES fiber)

Şekil 9'da, farklı lif uzunluğu ve içerik oranlarının artışına göre, basınç-eğilme dayanımı özellikleri arasında saptanan ilişkilerin sırasıyla R² 0.96, 0.86 ve 0.94 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 10'da, farklı lif uzunluğu ve içerik oranlarının artışına göre, basınç dayanımı-ısı iletkenlik özellikleri arasında saptanan ilişkilerin sırasıyla R² 0.88, 0.99 ve 0.98 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 11'de, farklı lif uzunluğu ve içerik oranlarının artışına göre, eğilme dayanımı-ısı iletkenlik özellikleri arasında saptanan ilişkilerin sırasıyla R² 0.74, 0.80 ve 0.98 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Lif uzunluğu artışı, lif katkılı numunelerin kuru birim hacim ağırlığında korelasyon katsayılarını düşürmektedir. Şekil 12'de, max lif uzunluğu ve içerik oranlarına göre kuru birim hacim ağırlığının basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ısı iletkenlik özellikleri arasında saptanan ilişkilerin sırasıyla R² 0.86, 0.97 ve 0.93 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Tespit edilen yüksek korelasyonlar, beton tasarımı için kuru birim hacim ağırlığı-basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ısı iletkenlik özelliklerinin esas alınmasını teşvik edici ölçektir. Özellikle çalışmamızda kullanılan maximum lif uzunluğunda basınç dayanımı-ısı iletkenlik ile eğilme dayanımı-ısı iletkenlik mekanizmaları arasındaki ilişkilerde R² 0.98 değerleri ile anlaşılabilirliği üzere güçlü bir etkileşim bulunmaktadır. Bu durumda artan lif uzunluğu ve lif içerik oranının tasarlanan beton numunelerinde, eğilme dayanımı-yalıtım kazancı performansını desteklemektedir. Fakat artan lif uzunluğu hem mekanik hem de yalıtım özelliklerinin kuru birim hacim ağırlığı değerleri arasında korelasyon değerlerini düşürmektedir.

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, farklı uzunluk ve içerikte tasarlanan PES lif katkılı beton numunelerinin mekanik ve termal yalıtım özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmış ve deneysel çalışmadan aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir.

- 7 ve 28 günlük kürlenme sonunda, PES lif uzunluğu ve lif içerik oranı ne kadar yüksek ise mekanik özelliklerden basınç dayanımındaki düşüşler sınırlı gerçekleşmiştir.
- Tasarlanan beton karışımlarına çimento ağırlığına farklı uzunluk ve katkı oranlarında ilave edilen PES lif içeren numunelerin eğilme mukavemeti performansı üzerinde oldukça etkilidir. Eğilme mukavemeti

değerlerinde max lif uzunluğu ve lif içerik oranında %32.4 seviyesinde yüksek bir performans artışı gerçekleşmiştir.

- Tasarlanan beton karışımlarına çimento ağırlığınca farklı uzunluk ve katkı oranlarında ilave edilen PES lif içeren numunelerin yalıtkanlık performansı üzerinde de oldukça yeterli seviyededir. 6 cm lif uzunluğu ve % 1.5 lif katkısı ile tasarlanan beton numunelerinde termal yalıtkanlık performansı %25.51 seviyesine kadar gelişebilmektedir.
- Ayrıca çalışmamız, basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ısı iletkenlik özellikleri arasında saptanan ilişkilerin yüksek korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle max lif uzunluğunda basınç dayanımı-ısı iletkenlik ile eğilme dayanımı-ısı iletkenlik özellikleri arasındaki ilişkilerde R^2 0.98 değerleri ile anlaşılabilirliği üzere güçlü bir etkileşim bulunmaktadır.

Özetle bu çalışma, farklı lif uzunlukları ve lif içerik oranları kullanılarak tasarlanan beton karışımlarının mekanik ve termal iletkenlik özellikleri üzerindeki etkisini detaylı olarak göstermiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, beton numunelerinin mekanik özelliklerinden basınç mukavemetindeki sınırlı düzeydeki düşüşlere karşın numunelerin mekanik özelliklerinden eğilme performansı ve termal yalıtkanlığında dikkate değer bir artışın mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır. Tasarlanan beton karışımlarının homojenliği ve PES lif partiküllerinin çimento matrisindeki iyi dağılımı, gelişmiş ısı yalıtımı ile mekanik özelliklerin saptanmasında önemli bir faktör görünmektedir. İnşaat mühendisliği yapı malzemelerinde üstün yalıtım ve performans özellikleri sağlamak için tekstil sektöründe en çok kullanılan ve tüketilen sentetik lif olarak belirtilen PES lif içerikli betonların tasarımı hakkında yeni bir perspektif açarak sentetik bazlı hammadde kaynakları ile uyumlu beton tasarımı gelişimine katkı sunmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- AbdelAleem, B.H., Hassan, A.A.A., 2019. Influence of Synthetic Fibers' Type, Length, And Volume on Enhancing The Structural Performance of Rubberized Concrete, *Construction and Building Materials*, 229, 116861.
- Al-Ameeri, A., 2013. The Effect of Steel Fiber on Some Mechanical Properties of Self Compacting Concrete, *American Journal of Civil Engineering*, 1, 102-110.
- Althoey, F., Ansari, W.S., Sufian, M., Deifalla, A.F., 2023. Advancements in Low-Carbon Concrete As A Construction Material for The Sustainable Built Environment. *Developments in the Built Environment*, 16, 100284.
- Anand, S., Khan, M.A., Kumar, A., 2016. Effect of Steel Fiber on Self Compacting Concrete: A Review, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3, 507-510.
- ASTM C1113/C1113-09, 2009. Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories By Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Ba, J., 2023. On The Feasibility of Using Polyester (PE) Waste Particles From Metal Coating Industry As A Secondary Raw Materials in Concrete, *Clean. Mater.* 9, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100193>.
- Babafemi, A.J., Boshoff, W.P., 2017. Pull-Out Response of Macro Synthetic Fibre From Concrete Matrix: Effect of Loading Rate and Embedment Length. *Construction and Building Materials*, 135, 590-599.
- Eduardo, N.B.P., Joaquim, A.O.B., Camoes, A., 2008. Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete: Experimental Research and Numerical Simulation, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 134, 1310-1315.
- El-Dieb, A.S., 2009. Mechanical, Durability and Microstructural Characteristics of Ultra High Strength Self Compacting Concrete Incorporating Steel Fiber, *Materials and Design*, 30, 4286-4292.
- Fode, T.A., Jande, Y.A.C., Kivevele, T., 2024. Physical, Mechanical, And Durability Properties of Concrete Containing Different Waste Synthetic Fibers for Green Environment – A critical review, *Heliyon*, 10, e32950.
- Gao, J., Wang, Z., Zhang, T., Zhou, L., 2017. Dispersion of Carbon Fibers in Cement-Based Composites with Different Mixing Methods, *Construction and Building Materials* 134, 220-227.
- Khaloo, A., Raisi, E.M., Hosseini, P., Tahsiri, H., 2014. Mechanical Performance of Self Compacting Concrete Reinforced with Steel Fibers, *Construction and Building Materials*, 51, 179-186.
- Khan, M., McNally, C., 2023. A Holistic Review on The Contribution of Civil Engineers for Driving Sustainable Concrete Construction in The Built Environment. *Developments in the Built Environment*, 16, 100273.
- Kiruthika, C., Prabha, S.L., Neelamegam, M., 2020. Different Aspects of Polyester Polymer Concrete for Sustainable Construction, *Materials Today Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.766>.
- Michalik, A., Chylinski, F., Piekarczyk, A., Pichor, W., 2023. Evaluation of Recycled Tyre Steel Fibres Adhesion to Cement matrix, *Journal of Building Engineering*, 68, 106146.
- Nanni, A., Bakis, C.E., Boothby, T.E., 1998. Test Methods for FRP-Concrete Systems Subjected to Mechanical Loads: State-Of-The-Art Review, *Plast. Compos.* 14, 524-558.
- Nassar, R.U.D., Saeed, D., Sufyan-Ud-Din, M., Nassar, S., 2022. Production of Eco-Friendly Concrete Masonry Units Using Powder Waste Glass, *Civil Engineering and Architecture*, 10 (2), 415-424

- Patti, A., Cicala, G., 2021. Eco-Sustainability of The Textile Production: Waste Recovery and Current Recycling in The Composites World, *Polymer*, 1-25.
- Ranade, R., Li, V.C., Heard, W.F., 2015. Tensile Rate Effects in High Strength-High Ductility Concrete, *Cement Concrete Research*, 68, 94-104.
- Salhotra, S., Khitoliya, R.K., Kumar, S., 2023. Comparative Study of Uncoated and Coated Waste PET Fiber for Sustainable Concrete, *Materials Today Proceedings*, 80, 2022–2026, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.060>.
- TS EN 12390-4, 2002. Testing Hardened Concrete - Part 4: Compressive Strength - Specification for Testing Machines, Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).
- TS EN 12390-5, 2019. Testing Hardened Concrete - Part 5: Flexural Strength of Test Specimens, Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).
- TS EN 196-1, 2009. Methods of Testing Cement: Part 1. Determination of Strength, Turkish Standard Institute, Ankara (In Turkish).
- TS EN 206+A2, 2021. Concrete - Specification, Performance, Production and Conformity. Turkish Standard Institute, Ankara (in Turkish).
- Wang, Y., Wu, H.C., Li, V.C., 2000. Concrete Reinforcement with Recycled Fibers, *J. Mater. Civ. Eng.* 12 (4), 314-319.
- Zheng, L., Huo, X.S., Yuan, Y., 2008. Experimental Investigation on Dynamic Properties of Rubberized Concrete, *Construction Building Materials*, 22 (5), 939-947.



DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER BASED DATA ACQUISITION SYSTEM TO INCREASE EFFICIENCY IN GALVANOTECHNICAL PLATING BATHS

Süleyman TOKMAK¹, Mohammad Ruhul Amin BHUIYAN², Hayati MAMUR^{3*}

¹ PilenPak Packaging Industry and Trade. Inc., Manisa, Türkiye

² Islamic University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Kushtia, 7003, Bangladesh

³ Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa, Türkiye

Keywords

*Electroplating,
Plating,
PLC,
Efficiency.*

Abstract

In industry, plating processes are used to improve the appearance of the material, to protect it against corrosion and to increase its durability. Different current pass through the brushes of the electrodes connected to the bars of the plating baths used in galvanotechnical plating, depending on the structure of the solution and other factors. This causes different amounts of wear on the brushes. As a result, the amount of current passing through the brushes changes and the quality of the plating decreases. In this study, a data acquisition system based on a programmable logic controller (PLC) was designed, and implemented to increase manufacturing efficiency on plating baths used in the flexible packaging industry and making galvanotechnical plating. The current passing through the busbars in the chrome plating bath were measured with the designed two shunt resistors, and the received electrical data was converted to 0-10 VDC value with an ENDA 242 signal converter and then transmitted to the Siemens brand S7-1200 PLC device. Through the program written on the PLC device, all the data was visualized with the Siemens brand KTP 400 PN device, which is a human machine interface (HMI), and audio and visual warnings were transmitted to the technicians for the necessary interventions. An ATmega328 microcontroller embedded system that measures pH, temperature, and level values, which are other variables of the plating bath, was added to the system and the variable data was transferred to the PLC. Thus, technicians were informed about the variables in the plating bath and system interventions were made by technicians, thus increasing the efficiency of the plating bath.

GALVANOTEKNİK KAPLAMA BANYOLARINDA VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI İÇİN PROGRAMLANABİLİR LOJİK DENETLEYİCİ TABANLI VERİ EDİNİM SİSTEMİNİN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Anahtar

Kelimeler

*Galvanoteknik,
Kaplama,
PLC,
Verimlilik.*

Öz

Endüstride kaplama işlemleri materyalin görüntüsünün iyileştirilmesi, korozyona karşı korunması ve dayanıklılığının artırılması için kullanılmaktadır. Galvanoteknik kaplamada kullanılan kaplama banyolarının baralarına bağlı elektrotların fırçalarından çözeltinin yapısına ve diğer etkenlere bağlı olarak farklı değerlerde akımlar geçmektedir. Bu durum fırçaların farklı miktarda aşınmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda fırçalardan geçen akım miktarları değişmekte ve kaplamanın kalitesi düşmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, esnek ambalaj sektöründe kullanılan ve galvanoteknik kaplama yapmakta olan kaplama banyolarının kalite ve verimliliğinin artırılması için programlanabilir lojik denetleyici (PLC) temelinde bir veri edinim sistemi tasarımı yapılmış, gerçekleştirilmiş ve sahada bir prototip cihaz ile uygulamaya konulmuştur. Krom kaplama banyosundaki baralardan geçen akımlar tasarlanan şönt dirençler ile ölçülmüş ve alınan elektriksel veriler ENDA 242 sinyal dönüştürücü ile 0-10 VDC değere çevrilip Siemens marka S7-1200 PLC cihazına iletilmiştir. PLC cihazına yazılan program vasıtası ile verilerin tamamı insan makine arayüzü (HMI) olan Siemens marka KTP 400 PN cihazı ile görselleştirilmiş ve gerekli müdahalelerin yapılması için sesli ve görsel uyarılar teknisyenlere iletilmiştir. Sisteme kaplama banyosunun diğer değişkenleri olan pH, sıcaklık ve seviye değerlerini ölçen bir ATmega328 mikrodenetleyicili gömülü sistem konularak değişken verileri PLC'ye transfer edilmiştir. Böylece kaplama banyosundaki değişkenlerden teknisyenlerin bilgi sahibi olması sağlanmış ve sistem müdahaleleri teknisyenler tarafından yapılarak kaplama banyosunun verimlilik artışı sağlanmıştır.

* İlgili yazar / Corresponding author: hayati.mamur@cbu.edu.tr, +90-236-201-2163

Alıntı / Cite

Tokmak, S., Bhuiyan, M. R. A., Mamur, H., (2025). Design and Development of a Programmable Logic Controller Based Data Acquisition System to Increase Efficiency in Galvanotechnical Plating Baths, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 13(1), 120-132.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Tokmak, 0000-0003-4382-6833
 M. R. A. Bhuiyan, 0000-0001-7335-4158
 H. Mamur, 0000-0001-7555-5826

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 12.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date 28.08.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date 13.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER BASED DATA ACQUISITION SYSTEM TO INCREASE EFFICIENCY IN GALVANOTECHNICAL PLATING BATHS

Süleyman TOKMAK¹, Mohammad Ruhul Amin BHUIYAN², Hayati MAMUR^{3†}

¹ PilenPak Packaging Industry and Trade. Inc., Manisa, Türkiye

² Islamic University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Kushtia , 7003, Bangladesh

³ Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa, Türkiye

Highlights

- Variables of the solution used in galvanotechnic baths were obtained in a data acquisition system.
- The quality of the plating is improved by continuous monitoring of the cathode electrode current.
- Thanks to the data acquisition system, productivity increase was achieved.

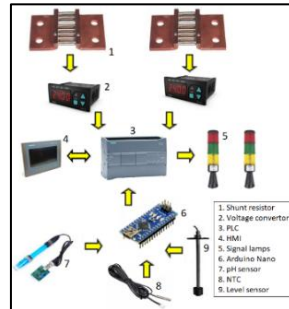
Graphical Abstract

Figure. Galvanotechnical Plating Bath Data Acquisition System Elements and Data Flow

Purpose and Scope

In galvanotechnical baths, the unbalanced current passing from both sides of the cathode electrode prevents the plating from being at the desired level. The reason why this current is different is that the coals at the ends of the brushes on both sides wear out at different rates. Therefore, this situation causes different resistance values. In addition, it is important to constantly monitor the temperature, pH and level values of the plating bath solution and keep them at the desired values. When these values are at the desired values, the desired plating can be achieved. In order to minimize these problems, a data tracking system was developed in this study.

Design/methodology/approach

The values of the solution variables in the galvanotechnic bath, namely temperature, pH and level, were detected using sensors and these were brought to the Arduino Nano board containing an Atmega328 microcontroller. By using two shunt resistors, the current value passing through the cathode electrode was first transferred to a converter and then to the programmable logic controller (PLC) device. These data were evaluated with the PLC, which is the main data acquisition device of the system. These data were displayed on the human machine interface (HMI) device and the values of the boundary variables were entered. Additionally, a light and sound warning system was installed, providing operators with the opportunity to intervene in the system early.

Findings

[†] Corresponding author: hayati.mamur@cbu.edu.tr, +90-236-201-2163

With the early warning system, when the current values passing through the cathode sides are not equal, system interventions have been made and production has become more efficient.

Practical implications

This study has been carried out in a way that can be applied in almost all galvanotechnical plating baths. Therefore, by applying them, early warning systems can be operated and product efficiency and quality will increase.

Originality

An original study was carried out by taking the temperature, pH, level, currents passing through the cathode sides and determining their limit values, which affect the plating in galvanotechnical plating baths.

1. Introduction

One of the areas of use of electricity in industry is plating technologies. It is widely used in plating to increase the durability of industrial materials, improve their appearance, and protect them against corrosion (Uğur and Ay, 2018). Today, plating processes are carried out using various methods such as electrolytic, hot dipping, liquid metal spraying plating metal cladding methods (Kelen, 2023). The most common electrochemical or galvanotechnical plating are chrome (Zhao *et al.*, 2022) and zinc (Yu *et al.*, 2020) plating. Other plating types are such as aluminum (Mwema *et al.*, 2018), copper (Verma and Kumar, 2019), cobalt (Letchumanan *et al.*, 2024), nickel (Saraloğlu Güler and Irgin, 2024), cadmium (Cihangir, 2023) and lead (Pradhan and Chakraborty, 2020), which are plating that are pure metals or their alloys.

Electrolytic metal plating is the process of creating a metallic film layer on metal or non-metallic materials using an electrochemical method (Belkin *et al.*, 2020). The use of such coated materials in daily life is quite common (Basova *et al.*, 2021). Silver and gold plating of watches, gold plating of glasses, and chrome plating of aircraft parts are among the examples that can be given. The main reason for plating metals is to improve their appearance and make their chemical and physical properties suitable for use (Akafuah, 2016).

The plating used in the flexible packaging industry is galvanotechnical plating, also known as electrochemical plating. This plating method is widely used due to the flexibility of production. For plating, gravure cylinders are used to create the desired image on the film packaging material (Tyagi *et al.*, 2021). A gravure cylinder is obtained by copper electrolytic plating on the top of the iron body cylinder. Then, the desired design on the package is engraved on the copper-coated cylinder with engrave machines (Baustista *et al.*, 2017). The main reason why this design image is processed on a copper-plated surface is that copper creates a suitable surface. The design processed with engrave machines is subjected to chrome plating in the next process. During the printed film production stage, a very thin chrome plating is applied to prevent damage to the cylinder on which the design has been processed, so as not to distort and cover the pattern on the surface (Bastarrachea *et al.*, 2015). If chrome plating is not applied to the copper-plated cylinder, the design deteriorates very quickly, and visual quality problems occur. Similar processes are applied in copper and chrome plating baths. In these plating baths, the solution and the electric current passing through the solution are the two most important variables that affect the quality of the plating. There are also other variables such as pH, temperature, and level in the solution (Oliveira *et al.*, 2021).

In the literature, it is possible to come across studies to develop and improve the plating quality of electrolytic copper and chrome plating baths, to reduce malfunctions that may occur in plating baths, to detect them in advance and to determine predictive maintenance times. In addition, studies have been carried out to improve hard chrome plating, silver plating baths, to optimize the solutions in nickel plating baths and to keep the variables in the plating baths at optimum levels. Kir and Apay (2020) optimized the plating parameters in hard chrome plating of structural steel using the Taguchi method. As a result of their studies, they emphasized the effects of current density, solution temperature, anode-cathode distance, pH value and plating time. Karaoğlu and Meriç (2019) improved the nickel ratio with the response surface method for nickel plating processes. They stated that the most important factor in this plating is the solution temperature. They determined the ratios of nickel sulfate (NiSO_4), nickel chloride (NiCl_2), boric acid (H_3BO_3), pH and brightener. In another study, Can and Akyağın (2022) carried out studies on the corrosion prevention of multilayer plating. As a result of their work, they developed a plating that can minimize the effects that cause high levels of corrosion. Şimşek and Çetin (2022) examined the effects of current density and solution temperature in galvanized plating on the mechanical properties of the plating. They emphasized that the plating thickness increases linearly with temperature and current density in acidic baths. In a study conducted by Birlik and Azem (2018), they stated that the Watts bath is the best bath that can be used for electrodeposition and then touched upon the importance of current density, pH level, NiSO_4 , NiCl_2 , H_3BO_3 components and densities. In another study conducted together with these studies, Bağrıyanık (2020) examined

the changes that chrome-plated materials used in vehicles are exposed to due to temperature. García Nieto (2020) developed a new method based on support vector machines model statistical machine learning for the prediction of hard chrome plating thickness. Venkateshaiah (2022) conducted a study to increase the use of developing automation technologies in plating.

When studies in the literature are considered, it can be seen that the pH value, temperature and level of the solution in the plating baths used in electrochemical plating are important. In addition, it is seen that the current value passing through the solution, which is the most important variable of electrochemical plating, is a very critical variable. Considering all this, it is important to monitor these four variables and intervene by technicians when necessary. In this design and application study carried out to achieve this aim, the design and development of a programmable logic controller-based (PLC) data acquisition system was carried out to increase the efficiency in galvanotechnical plating baths. The prototype system was used in a chrome plating bath. In addition, this system is designed to be expandable to other plating baths operating in the same factory environment in order to reduce production costs and increase efficiency.

In the "Introduction" section of this study, a general introductory literature information is given, and then the "Material" used in the second section is given. Then, the use of materials is explained in detail in the "Method" section. After that, in the fourth chapter, "Results and Discussion" is stated. Finally, the outputs of the studies are presented in the "Conclusions" section.

2. Material

2.1. Plating

Plating processes are used to improve the appearance of metal and non-metal materials, increase their hardness, and protect them against corrosion. Plating processes are carried out in plating baths using various solutions (Brindha, 2021). Plating made with electric current are called galvanotechnical plating (Li, 2020). The basic units in plating are cathode, anode, electrolyte solution and plating bath. Electrical control systems are used to adjust the solution. Transformer rectifiers with control units are used to adjust the high value electric current passed through the solution. It is also seen that galvanotechnical plating is applied by plating non-metallic materials with a thin layer (Rajaramanan, 2021).

The plating technique used to coat metals is electrochemical plating. The basic principle of electrochemical plating is given in Figure 1. In plating, ions in solution are transported to the material to be coated due to the electric current acting on them (Wang, 2020). Hydrogen ions accumulate at the cathode electrode and sulfate ions accumulate at the anode electrode. These ions are electrically charged. Here, the fact that the solution creates an electric current causes the solution to be called an electrolyte. Considering water-soluble copper sulfate (CuSO_4), one molecule of CuSO_4 yields one copper and one sulfate ion. Copper ions collect in the solution on the cathode electrode and sulfate ions on the anode. The collection of copper ions on the cathode electrode is referred to as plating of the cathode electrode.

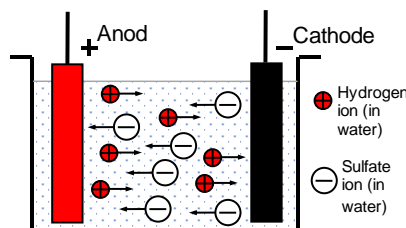


Figure 1. Electrochemical Plating.

In galvanotechnical plating, the material to be coated is generally the cathode electrode. The anode electrode is made of the material on which the cathode electrode will be coated. Increasing the current density of the power supply connected to the anode and cathode electrodes in a controlled manner increases the anode ions in the solution and results in faster plating. While the voltage values of the power supplies used are 6-12 V, they have quite high current values. Additionally, anode corrosive halide chemicals are mixed into the solution to ensure the dissolution of the anode electrode. In the plating, the anode electrodes in metal structure are not pure and therefore cause the electrode potential to be different.

Copper and chrome plating baths are similar to each other in terms of operation. They keep an anode sieve in the bath section where the plating are made. While copper plating is being done, copper particles are placed on this

anode sieve. In the chrome plating bath, nothing is placed on the anode sieve (Asamuah, 2021). In chrome plating, chromium in salt form is placed in solution. Anode sieves are mounted vertically, with the cathode cylinder to be coated in the middle. In both copper and chrome plating, the anode sieves are made of titanium plating. Therefore, no wear occurs on the anode sieves. The absence of wear increases the quality of the plating to be applied (Li, 2024).

In copper and chrome plating baths, the positive pole of the power supply is connected to the anode sieve. The current passes through the anode sieve and the solution, allowing the copper or chromium elements in the solution to reach the cylindrical cathode electrode to be coated. The material to be coated is placed on the cathode electrode, which has a cylindrical structure and can rotate around its own axis. The cathode electrode in this cylindrical structure is rotated by electric motors. As a result, the material to be coated rotates in the plating bath. The cathode cylinder electrode is connected to the negative end of the power supply with the help of current-transferring carbons at both ends of the cylinder. The same size of the coals here allows the same current to pass on both sides, and in this case, the thickness of the plating is the same on both sides. The different sizes of the coals cause the current passing from both sides to be different. As a result, the thickness of the plating on both sides of the cathode cylinder electrode is different. The plating is thick on the side where more current flows. This is an undesirable situation. The positions of the plating bath, coals and shunt resistors in this study are given in Figure 2. Plating bath consists of copper sulphate or chromic acid solutions, copper grains or chromium salts, titanium holding and working tanks, rectifier, titanium sieve, copper busbars, coals, and heating-cooling systems.



Figure 2. Plating a) Bath and b) Coals and Shunt Resistor.

While preparing the copper plating bath, copper salt is used in the solution (Ayyıldız, 2021). The plating tank is filled $\frac{1}{2}$ with deionized water or distilled water that has had its ions removed. The purity and conductivity value of water is known by pH measurement. The conductivity of the deionized water used should not exceed 10 μ (Siemens) and the pH value should be between 6.5–7.5. An amount of 210-230 g/l salt is added to the solution in 50 and 100 kg amounts by mixing. 0.5-1.0 ml/l hydrogen peroxide (H_2O_2) is added to the solution and stirred for 1 h. Then, 96% purity sulfuric acid (H_2SO_4) is slowly added to the solution. While these processes are carried out, the solution is in constant circulation. Attention should be paid to the heat generated when H_2SO_4 is added to the solution. Dilution is made for one day to remove the heat created by the H_2SO_4 acid. After these processes, the temperature of the solution in the plating bath reaches $40^\circ C$ and copper particles are placed in the anode basket. Meanwhile, the solution is kept in constant circulation and filtered with a carbon filter for 12 hours. Then, plating is done with 0.3-0.5 A/dm^2 for 6-10 h.

In order to achieve the desired plating, some criteria in the solution and system must be taken into consideration. It is desired that the plating is hard, its surface is smooth, and the thickness is in the desired amount. It is not desired to have plating holes, pits and distortions on the coated surface. Current density is of great importance in creating the desired plating. While the current density in copper plating baths is 20-25 A/dm^2 , depending on the design of the plating bath, it should be 50 A/dm^2 for chrome plating. As the current density in the solution increases, the crystal formation rate increases, and the plating becomes thinner. If the current density increases excessively, the metal ions coming out of the cathode cannot fully match the ions in the solution, causing the plating surface to become black and spongy.

Another variable that improves plating quality is solution density and mixing. If the formation of crystals in the solution is rapid, the adhesion to the surface to be coated will be thin and strong. Stirring the solution prevents local dilution at the cathode. In addition, filtering the solution at regular intervals increases the plating quality (Haifeng, 2020). Another variable that affects plating quality is temperature (Kır and Apay, 2020; Şimşek and Çetin, 2022). It is ideal for the solution temperature to be $30^\circ C$ in copper plating baths and $60^\circ C$ in chrome baths. Since

high temperature values increase diffusion, the rate of formation of crystals increases and small crystalline structures appear in the plating. Another disadvantage is that it reduces the polarization of the cathode. Other variable in the quality of the plating is the pH value of the solution. Depending on the type of plating, the solution must have a certain pH value. It is important to monitor all these variables with a control system and make necessary interventions.

2.2. Programmable Logic Controller and Human Machine Interface Touch Screen

PLC is widely used in industrial automation systems to capture variables in plating baths and other processes and to process data and create control signals. PLCs evaluate the analog and digital signals coming to their inputs depending on the programs written and produce analog or digital outputs. The elements connected to their inputs can be changed with various expansion modules. Some of the temperature sensors can be connected directly to their inputs. They also need standard current and voltage values for their inputs. Their outputs can be relay or transistor. A Siemens brand S7 1214C DC/DC/DC model PLC was used to capture the variables in this plating bath. The supply voltage of this PLC is 24 V DC. Its output is DC transistor output. The input units contain analog and digital inputs. It has 14 digital inputs and 10 digital outputs. Two of the inputs were used as analog inputs in the system with a 6ES7 222-1BH32-0XB0 module. Again, expansion modules can be installed on this PLC to increase the number of inputs and outputs. Since the number of outputs in the PLC was not sufficient for the plating baths in the factory where the application was made, an additional 6ES7 231-4HF32-0XB0 output expansion module was used. PLC makes analog digital conversion (ADC) conversions with 10 bits and provides 500 mA output current. Profinet communication interface and TIA portal (Totally Integrated Automation Portal) software are used for programming.

Siemens brand KTP 400 PN model HMI panel, which is a human machine interface (HMI), was used to visualize the variables taken by PLC of the galvanotechnical plating bath, to display warnings, to write alarms and to determine warning limits. There are 4 function keys on this device and their programming is done with TIA portal software. The screen size of the device is 4.3 inches, thin-film-transistor (TFT) screen, resolution 480 × 272 px, user memory is 10 MB, protection class is IP65, and the device depth is 43 mm.

2.3. Atmega328 Microcontroller

The ATmega328 microcontroller on the Arduino Nano CH340 microcontroller board was used to read the values of the variables affecting the quality of the plating in the galvanotechnical plating bath. This microcontroller has 14 digital Input/Output pins, 6 of which can be used as pulse width modulation (PWM). It also has 8 analog inputs. There is a 16 MHz crystal oscillator on the Arduino Nano CH340 board to operate the microcontroller. This was preferred because the inlet and outlet numbers are sufficient to obtain the variables in the plating bath.

2.4. Shunt Resistor, Signal Converter, pH, Temperature, and Level Sensors

Shunt resistors are one of the most effective ways to measure the current values of high-current circuits. 2 shunt resistors were used to measure the current value passing through the electrical busbars in the plating bath. The values of the shunt resistors in the system are 0.024 mΩ and 2500 A capacity. There is a voltage drop of 0-60 mV on it. Thus, less power loss is ensured. The voltage value falling on the shunt resistor is quite low. Its value cannot be transmitted directly to the PLC. Therefore, this voltage value must be converted to 0-10 VDC value that the PLC can read. One of the devices that does this is the ENDA brand EPA 242 model device. Using this device, the current value passing through the busbars was first converted into voltage in shunt resistors, and this value was converted to 0-10 VDC value with a converter and transferred to the PLC. 0-10 VDC current was measured to 0-2500 A with the software in the PLC.

In galvanotechnical plating baths, the pH value of the solution affects the quality of the plating, and its continuous measurement is important. The pH sensor used in the measurement of this variable is a chemical sensor and produces a voltage value depending on the pH value with 2 electrodes in its structure. The generated voltage value is transferred to the output of the transmitter card as 0-5 V DC. The supply voltage of this sensor is 5 V DC, its dimensions are 43 mm × 32 mm, its operating temperature is 0-60°C, its sensitivity is 0.1 pH (25°C), and its connector is BNC type.

A negative temperature coefficient (NTC) temperature sensor was used to detect the temperature of the solution in the system. This sensor is easily available from the market. The resistance value of NTC decreases as the temperature increases and the measurement range is -30 to 105°C, the cable length is 300 mm, the probe length is 5 × 25 mm, the resistance is 10 kΩ ±%1 and the output has 2 wires.

A float type potentiometer level sensor was used to determine the level of the solution. The level sensor has an internal resistance is 190Ω , a float type polyurethane, measurement length is 30 cm. Its operating voltage is 12-24 VDC, and operating temperature is 0-70°C and protection class is IP88. Also, its body structure is plastic - polyvinyl chloride (PVC).

3. Method

In this study, a data acquisition system was developed to increase the quality and efficiency of the plating made in galvanotechnical plating baths. The developed data acquisition system elements and the data flow between them are given in Figure 3. This design was built on a chrome galvanotechnical plating bath as a prototype application, and audible and visual warnings were sent to technicians when the data of this plating bath went beyond the specified limits. In order to improve the quality of the plating made in the chrome plating bath, it is important to constantly measure the variables of the plating bath: current, temperature, pH and level. To achieve this purpose, the current values passing through the brushes on both sides of the coated cylinder in the system were measured with two $0.024 \text{ m}\Omega$ shunt resistors specially designed for this system. Since the voltage drop in these shunt resistors is low, the voltage value was converted to 0-10 V DC value with the ENDA brand EPA 242 model voltage boost converter and transmitted to the Siemens brand S7 1214C DC/DC/DC model PLC device. A pH electrode and a transmitter that converts the voltage value produced by it to the standard 0-5 V DC value were used to determine the pH value of the solution in the chrome plating bath. A commercially available NTC with $10 \text{ k}\Omega$ resistance with error rate of $\pm 1\%$ was used to detect the temperature value. Additionally, the solution level was detected with a float sensor of 190Ω . The pH, temperature and level variables of the solution were transmitted to the Arduino Nano ATmega328 microcontroller so that they could be transmitted to the PLC device. Incoming data was evaluated with ATmega328 and converted into real pH, temperature, and level information. In order to send this information to the PLC device, the PWM pins of the ATmega328 microcontroller are transmitted analogously to the PLC device through an electronic circuit placed between the PLC and the ATmega328. The PWM and ADC resolutions of the ATmega328 microcontroller are 8 bits. The variables collected in the PLC device were transmitted to the HMI device and the limit values of the variables could be entered with this device. When the limit value exceeds the lower and upper limits of the variable value, the technician is notified with an audible and visual warning system.

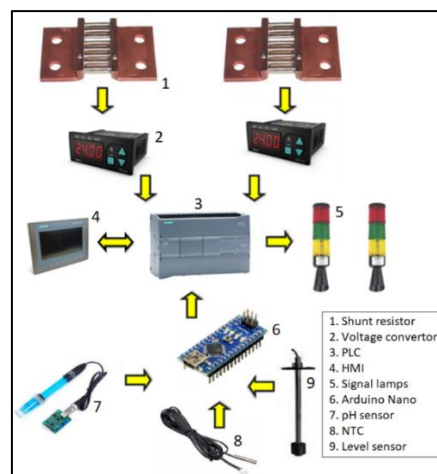


Figure 3. Galvanotechnical Plating Bath Data Acquisition System Elements and Data Flow.

The electrodes and other electrical devices in the chrome plating bath are given in Figure 4. One of the most important elements of the plating bath is AC-DC rectifiers. The electric current coming out of the positive pole of the rectifier is divided into 2 anode and screen electrodes. This current passes through the solution and reaches the cylinder where the plating is made. It passes through the carbon brushes on both sides of this rotating cylinder and reaches the negative pole of the rectifier. Thus, the plating is done. The current value passed through the solution is adjusted according to the size of the cylinder, the amount of plating and the desired plating hardness.

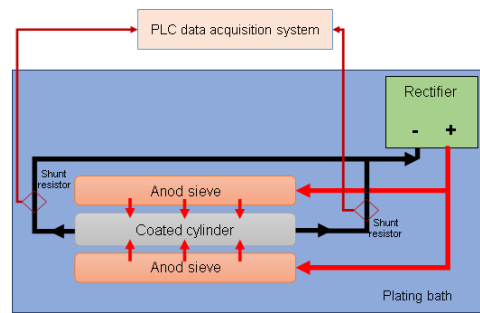


Figure 4. Plating Bath Electric Current Passage.

The current value to be passed through the cylinder in the plating bath is calculated with the following equation.

$$I = L \times C \times J \times F \quad (1)$$

Here, I is the current to be passed through the cylinder to be coated (A), L is the length of the cylinder to be coated (dm), C is the circumference of the cylinder to be coated (dm), J is the current density (A/dm²) and F is the immersion rate of the cylinder into the solution. If the cylinder to be coated is completely submerged in the solution, the immersion ratio is taken as 1, if it is half submerged, the immersion ratio is taken as $\frac{1}{2}$. In order for the plating to reach the desired thickness in the plating bath, the time the material to be coated remains in solution is determined by the equation below.

$$t = 75.3 \times L \times C \times d \times 60/I \quad (2)$$

Here, d is the desired plating thickness (mm) and t is the required time (min). For example, if the cylinder length is 8.8 dm, its circumference is 0.96 dm, the desired plating thickness is 0.15 mm and the plating bath current is 1600 A, then the time needed is 36 min. is available.

The operation of the S7 1214C DC/DC/DC PLC device, which is the basic control unit of the system, was carried out with a 24 V DC power supply. The digital outputs of the PLC were used for the lamp and buzzer. After the voltages of the shunt resistors were increased with the ENDA device, 0-10 V DC was entered into the analog inputs of the PLC. Since there are two analog inputs on this PLC, an additional analog input module was added to the system to make the system ready for other plating baths. The highest voltage of 2500 A was passed through the shunt resistor. According to this current value, the shunt resistor produced 60 mV. The data of these current-sensing shunt resistors installed on the right and left busbars of each plating bath were converted to current values with the PLC program, and audible and visual warnings were generated when they were below or above the limit values entered with the HMI device.

When the current drawn by the plating bath is 1500 A, it is expected that the current value of 750 A will pass through the two busbars due to the equal resistance value of the system. If 1200 A passed from one busbar and 300 A from the other busbar, the difference between them became quite large and the alarm mode of the system was enabled. The red signal lamp on the side where the current flows the most and the green signal lamp on the side where the current flows low worked. When the operator received these alarms, he checked the electrical equipment of the system and made the necessary cleaning and arrangements in the plating bath. If there is a difference of 600 A between the current value passing through the busbars, a yellow signal lamp is turned on the side where the current flows most, and a green signal lamp is turned on the side where the current flows less, and an audible warning is also activated.

Figure 5 shows the methods used to measure pH, temperature, and level values with the Arduino Nano ATmega328 board. The voltage level taken from the electrodes of the pH sensor used was entered into the microcontroller card as 0-5 V DC via the transmitter card to which this sensor was connected, as shown in Figure 5a. The microcontroller connection of 10 k Ω NTC is made with a voltage divider 10 k Ω resistor as shown in Figure 5b. It was carried out as shown in Figure 5c, using a 220 Ω voltage divider resistor in the microcontroller connection of the 190 Ω level sensor with float. The data processed by ATmega328 was transmitted to the analog inputs of the PLC device using the LM324 operational amplifier with the circuit as shown in Figure 5d. The reason for using opamp here is to deliver the standard voltage value to the PLC. 7805 and 7812 linear regulators are used in the system to feed the sensors and transmitter. Sensor inputs are made with the help of connectors to make connections easy. An output is provided for connections to the PLC. The physical connections of the sensors are given in Figure 5e.

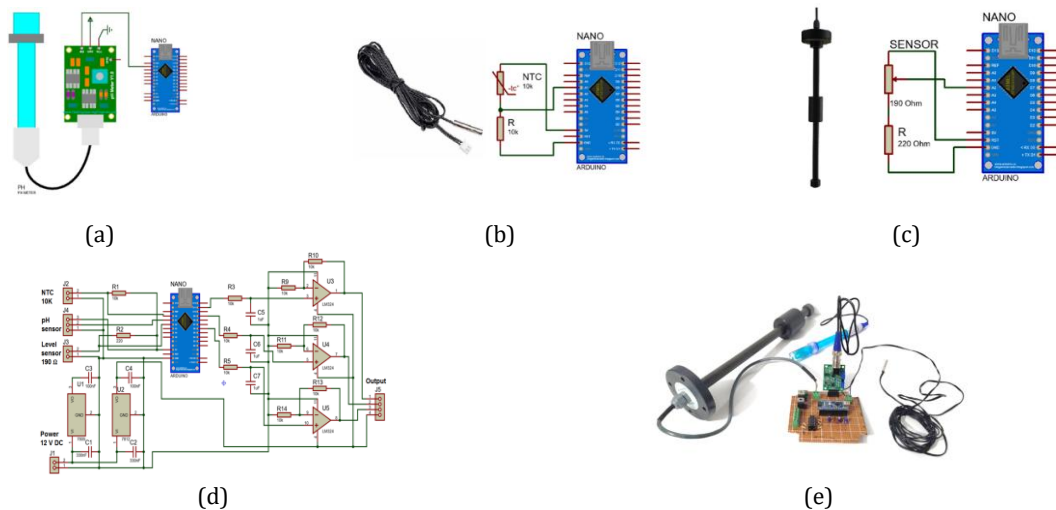


Figure 5. ATmega328 a) pH, b) NTC, c) Level Sensors, d) Electronic Circuit and e) Physical Appearance.

4. Results and Discussion

With this study, the currents passing over the coals of the brushes on both sides of the cathode cylinder in the plating baths were detected with shunt resistors. The pH, temperature, and level information of the solution, which also affects the quality of the plating, was detected and first transmitted to the ATmega328 card for processing, and from there to the PLC device with the designed and implemented electronic circuit. Thus, the variables in a plating bath can be detected and visualized with the HMI device. In this HMI device, the plating bath was operated according to the criteria determined according to the properties of the plating. Changing these alarm values on the HMI screen according to the status of the system can be done with the written program. Additionally, information about alarm situations can be obtained using the HMI device. Thanks to this flow information, equal current flow is ensured on both sides of the cylinder in the plating bath, and deformation of the plating, plating of different thicknesses, pits on the plating surfaces and the formation of plating dust are prevented. As a result, unnecessary use of consumables is prevented, and capacity reduction is prevented. In addition, plating costs have been reduced by reducing the use of spare parts. Figure 6 shows the alarm status in the chrome plating bath used as a prototype trial. The current value of 1270.6 A, which is the current value that the plating device will draw at full capacity as written on the label, is digitalized, and displayed on both the HMI device and the ENDA device.



Figure 6. Chrome Plating Machine: a) HMI Screen, b) Alarm Lights, C) Machine Information and D) ENDA Current Visual.

Current difference limits are determined at two levels on the system. These limits have been determined in line with expert opinions based on the operators' experience during use. During the trials, these threshold values were entered into the system as 300 A and 600 A. While the 300 A value warning has secondary priority, the 600 A difference warning is defined as the first priority warning. When one of these warnings occurred, operators maintained the plating bath for the next plating process. Operators have been informed about the cleaning of the busbar and coals. At the moment when the current imbalance occurred, the temperatures of the brushes were measured with a thermal camera as shown in Figure 7. It has been determined that brush coals deteriorate at temperatures of 140-160°C. This situation caused current imbalances in the system. Thermal camera images are in Fahrenheit. Here, the temperature of one adapter is 241°F = 161°C, while the temperature of the other is 145°F = 62°C. This current imbalance caused the adapter, coal and other components to fail. The adapter gear melted due to excessive heat. Accordingly, the plating bath did not work because there was no rotational movement in the cylinder.



Figure 7. Chrome Plating Bath Error Status: a) Adapter, and b) Thermal Camera Images.

Since current imbalance causes overheating, gaps have formed between bronze and aluminum parts because metals with different expansion coefficients expand at different rates. Dirt and solution residues filling the gaps made it difficult for current to flow and caused the system to fail more quickly. Example part distortions are shown in Figure 8.



Figure 8. Deteriorations in Plating Bath Because of Heating Caused By Current Imbalance: A) Melted Adapter Gear, B) Taper Distortion, C) Adapter and D) Coals.

The temperature of the solution could be monitored instantly with temperature measurements made on the system. It has been observed that the data acquisition system designed and used as a prototype gives an alarm when the specified limit values are exceeded. The temperature of the solution, which is brought to the desired value by the resistances of the plating bath, rises above the desired value by heating the solution in the current. In this case, the system's own coolers come into play. The system gave an alarm when the temperature in the chrome plating bath dropped to 50°C. In this case, the operator intervened in the system for the next plating and the system was allowed to reach 60°C again. The plating formed in these two cases are given in Figure 9.

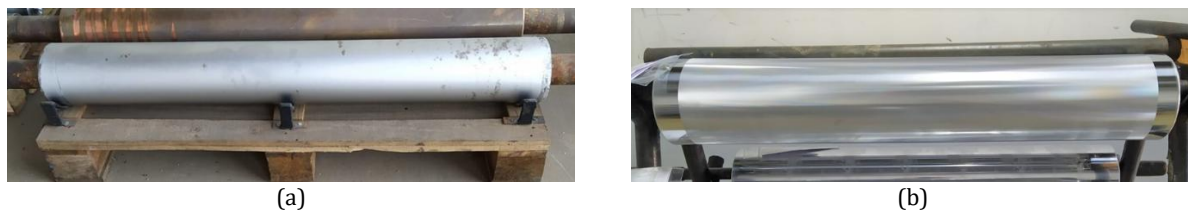


Figure 9. Chrome Plating: a) 50°C and b) 60°C.

At the solution temperature of 50°C, it was observed that the gloss of the material coated on the cylinder was low, the plating was soft and there were roughnesses on it. After the system alarms, when the operator intervened in the system for the next plating, it was observed that the coated material on the cylinder had the desired hardness, brightness, and smoothness values while the solution temperature was 60°C.

Continuous monitoring of the pH level of the solution was carried out with the sensor used. With the developed data acquisition, it was possible to monitor how the acid and salts placed in the solution caused a change in the amount of solution on a weekly basis and at what intervals the values changed. In addition, continuous detection of the change in the amount of solution was easily achieved with the help of the float system. In the system, the solution in the reserve tank is transferred by pump to the plating section where the anode sieve and cylinder are located. As a result of the process, it is transferred back to the reserve tank. This can be ensured to be between the maximum and minimum values by operator intervention in the system with the developed system warnings.

In the findings regarding current imbalance, it has been seen that many factors cause current imbalance. It has been observed that one of the main reasons is the deformation, contamination, and oxidation of the surfaces of the shafts and adapters used in the cylinder assembly, which come into contact with the plating cylinders, that is, through which electric current passes. Since it is difficult for electric current to pass through this type of surface, he preferred the other current branch. When the entire electric current passes through a single branch, overheating occurs in the busbars through which the current passes. Another important reason for the current imbalance is the coals that enable the transmission of electric current on which the cylinder adapters used in cylinder assembly sit. These coals in both cathode bars became worn and deformed after a certain operating

period, due to environmental and usage conditions. For this reason, the current chose the other easier path and heating occurred in the equipment and busbars through which excessive current passed.

In electric current imbalance, the magnitude and consequences of the imbalance vary depending on the state and degree of adverse conditions that cause the imbalance. For example, in field studies, it was determined that the current difference was less due to the corrosion of the coils and more due to deformation and pollution on the adapter and shaft surfaces. In addition, operational assembly errors can be detected thanks to this designed system, as a current difference will occur if there is an error in the assembly of the cylinder placed in the plating bath.

Some arrangements have been made in the plating process section in order to prevent undesirable situations by measuring and evaluating electrical currents and revealing their causes. The system ensures regular cleaning and maintenance of the cones, shafts, and adapters, which are the assembly parts of the cylinders to be coated and through which the electric current passes. By drawing attention to the meticulousness of the cylinder assembly process, non-contact in the electric current paths was prevented. Deformed coils were replaced at the required interval, adapter shaft cone and other machine equipment that were beyond repair were renewed. The busbars and anode screens through which electric current passes were dismantled and their cleaning and maintenance could be done by evaluating the results of the developed warning system.

With the work carried out to eliminate electrical current imbalances, undesirable situations have been reduced to minimum levels, and the costs resulting from the breakdown of cylinder assembly equipment, spare parts and consumables have been reduced. Quality problems caused by current imbalance are prevented. Machine downtimes caused by undesirable current imbalance situations are minimized, thus preventing loss of production capacity.

In order to keep the plating solution temperature at the optimum level, the resistance heating system that heats the solution and the water-cooled coil system that balances the heat must be active and working as it should. It has been determined that it would be more convenient to use a proportional-integral-derivative (PID) controlled heating system rather than an on-off resistance system to ensure a more accurate temperature operation. Studies and investigations can be carried out by changing the temperature of the water circulating in the cooling coils for both the optimum effect on the system and energy efficiency.

In the studies and examinations carried out, it has been determined that the pH value generally remains constant during the plating process and does not affect the plating as long as it remains within the oscillations of around ± 0.3 . In summary, it has been observed that the pH value is less affected by operating conditions. To fully measure this effect, measurements can be made from several points.

pH measurement of the system can be used actively and effectively during the preparation of the solution in the plating bath, when sulfuric acid, chromic acid and pure water are added. Situations such as adding undesirably excessive amounts of water during the washing process with pure water during the plating process and changing the content balance of the solution over time can be detected by pH measurement. As a result of this determination, the pH balance in the system can be adjusted. Thus, the quality of the plating in the plating bath can be increased.

Although measuring the amount of solution has the least direct effect on quality, it has indirect effects. Because of temperature, the plating solution evaporates and decreases over time. Additionally, solution losses may occur due to leaks in the machine reserve and plating tank. These situations may cause undesirable situations in the short or long term, and in the long term, the content and amount of the solution may deteriorate due to evaporation and during the washing process with pure water. In addition, it is a common situation that the cooling water mixes with the solution due to the puncture of the coils. Since the amount of solution increases rapidly in this case of mixing, this situation can be detected early by level measurement.

On the realized measurement system, current imbalance error status is shown on the HMI panel as duration and number of errors. In addition to this feature, more detailed and historical tracking of both current imbalance status, measurement data and system error conditions can be added to the system. Data can be transferred to the computer system via Ethernet or wireless communication and can be saved from the PLC to a memory card with the memory card to be added.

5. Conclusions

In this study, a data acquisition system was developed based on PLC to monitor the variables of the plating baths used in a factory and to give warnings to the operator. The current values passing through the brushes on both sides of the cathode electrode in the solution were detected by a designed and produced shunt resistor and transmitted to the PLC device with an ENDA brand converter. The pH, temperature and level variables of the solution were detected by sensors and converted into analog signals that could be transmitted to the PLC with the Arduino Nano Atmega328 microcontroller. The data in the system is visualized on the HMI screen. The minimum and maximum ranges of the plating bath variables can be entered with the buttons of the HMI screen. The designed system was tested as a prototype in a plating bath. For the plating to have the desired quality, it was important that the temperature value was 30°C in the copper plating bath and 60°C in the chrome plating bath. If these temperatures were lower than the desired values, it was observed that the plating was incomplete and hazy. If the temperature values were higher than the desired values, the plating hardness was not at the desired level and soft plating were observed. With the warnings in the developed system, the operator is enabled to intervene in the system. This ensures that the system has fewer malfunctions, less consumables are used, and fewer defective products come out of the machine. As a result, the efficiency of the system is increased. The designed system only involves data acquisition. According to this data, it has been determined that improvements can be continued by creating control algorithms that can intervene in the system and placing the necessary actuators in the system.

Acknowledgment

This study produced from the master's thesis prepared by Süleyman TOKMAK at Graduate Education Institute at Manisa Celal Bayar University.

Conflict of interest

There is no conflict of interest in this study.

Ethics consent

Ethical consent is not required for the study.

Nomenclatures

ADC	Analog Digital Conversion	<i>C</i>	Circumference of Cylinder to be Coated (dm)
CuSO ₄	Copper Sulfate	<i>d</i>	Desired Plating Thickness (mm)
HMI	Human Machine Interface	<i>F</i>	Immersion Rate of Cylinder into Solution
H ₂ SO ₄	Sulfuric Acid	<i>I</i>	Current (A)
NTC	Negative Temperature Coefficient	<i>J</i>	Current density (A/dm ²)
PID	Proportional-Integral-Derivative	<i>L</i>	Length of Cylinder to be Coated (dm)
PLC	Programmable Logic Control	<i>t</i>	Required Time (min)
PVC	Polyvinyl Chloride		
PWM	Pulse Width Modulation		
TIA	Totally Integrated Automation Portal		
TFT	Thin-Film-Transistor		

References

- Akafuah, N. K., Poozesh, S., Salaimeh, A., Patrick, G., Lawler, K., Saito, K., 2016. Evolution of The Automotive Body Coating Process—A review. *Coatings*, 6(2), 24.
- Asamoah, B. D., Asare, A., Okpati, S. W., Aidoo, P., 2021. Heavy Metal Levels and Their Ecological Risks in Surface Soils at Sunyani Magazine in The Bono Region of Ghana. *Scientific African*, 13, e00937.
- Ayyıldız, S., Varol, T., Pürçek, G., 2021. Al7075 Alaşımına Uygulanan Dekoratif Krom Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(1), 132-140.
- Bağrıyanık, A., 2020. Krom Kaplamalı Parçalarda Termal Çevrim Analizi. *Mühendis ve Makina*, 61(698), 17-30.
- Basova, T. V., Vikulova, E. S., Dorovskikh, S. I., Hassan, A., Morozova, N. B., 2021. The Use of Noble Metal Coatings and Nanoparticles for the Modification of Medical Implant Materials. *Materials & Design*, 204, 109672.
- Bastarrachea, L. J., Wong, D. E., Roman, M. J., Lin, Z., Goddard, J. M., 2015. Active Packaging Coatings. *Coatings*, 5(4), 771-791.
- Bautista, L., Molina, L., Niembro, S., García, J. M., López, J., Vílchez, A., 2017. Coatings and Inks for Food Packaging Including Nanomaterials. In *Emerging Nanotechnologies in Food Science* (pp. 149-173). Elsevier.
- Belkin, P. N., Kusmanov, S. A., Parfenov, E. V., 2020. Mechanism and Technological Opportunity of Plasma Electrolytic Polishing of Metals and Alloys Surfaces. *Applied Surface Science Advances*, 1, 100016.

- Birlik, I., Azem, N. F. A., 2018. Banyo Kompozisyonunun Elektroçöktürme Yöntemi ile Üretilen Nikel Kaplamaların Yapısı ve Özelliklerine Etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(59), 689-697.
- Brindha, T., Rathinam, R., Dheenadhayalan, S., Sivakumar, R., 2021. Nanocomposite Coatings in Corrosion Protection Applications: An overview. Oriental Journal of chemistry, 37(5), 1062.
- Can, A., Akyalçın, L., 2022. Alkali Çinko ve Alaşımli Çinko Kaplama Üzerine Çözücü Bazlı Çinko Lamelli Kaplama Uygulaması ile Oluşturulan Çok Katmanlı Kaplamanın Korozyon Önleme Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 300-308.
- Cihangir, S., 2023. Greening Industrially Applied Toxic Cadmium Plating with γ -Ni₂Zn₁₁ Alloy in Deep Eutectic Solvents: Promising Electroplating Efficiency and Chemical Corrosion Resistance. Advanced Engineering Materials, 25(20), 2300731.
- García Nieto, P. J., García-Gonzalo, E., Sanchez Lasheras, F., Bernardo Sanchez, A., 2020. Chrome Layer Thickness Modelling in a Hard Chromium Plating Process Using a hybrid PSO/RBF-SVM-Based Model.
- Haifeng, Y., Fei, X., Yan, W., Le, J., Hao, L., Jingbin, H., 2020. Manufacturing Profile-Free Copper Foil Using Laser Shock Flattening. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 152, 103542.
- Karaođlan, A. D., Meriç, A., 2019. Nikel Kaplama Prosesinde Verimli Olarak Kullanılan Nikel Oranının Yanıt Yüzey Yöntemi ile Eniyilenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 507-512.
- Kelen, F., 2023. Magnezyum ve Magnezyum Esash Malzemelerde Korozyon. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 11(1), 41-56.
- Kır, H., Apay, S., 2020. Elektrolitik Yöntemle Sert Krom Kaplanan Yapı Çeliğinde Kaplama Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(1), 7-14.
- Letchumanan, I., Yunus, R. M., Mastar, M. S., Beygisangchin, M., Kamarudin, S. K., Karim, N. A., 2024. Modified Surface Nanotopography for Renewable Energy Applications for Promising Cobalt-Based Nanomaterials Towards Dual-Functional Electrocatalyst. International Journal of Hydrogen Energy, 59, 1518-1539.
- Li, N., Shi, M., Lan, Y., Zhang, H., An, G., Lin, S., Xue, L., 2024. Efficacy and Mechanism of Copper Removal from Electroplating Wastewater by Schwertmannite-Like Mineral. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(2), 112001.
- Li, T. T., Ling, L., Lin, M. C., Peng, H. K., Ren, H. T., Lou, C. W., Lin, J. H., 2020. Recent Advances in Multifunctional Hydroxyapatite Coating by Electrochemical Deposition. Journal of Materials Science, 55(15), 6352-6374.
- Mwema, F. M., Oladajo, O. P., Akinlabi, S. A., Akinlabi, E. T., 2018. Properties of Physically Deposited Thin Aluminium Film Coatings: A review. Journal of Alloys and Compounds, 747, 306-323.
- Oliveira, J. A. M., de Almeida, A. F., Campos, A. R. N., Prasad, S., Alves, J. J. N., de Santana, R. A. C., 2021. Effect of Current Density, Temperature and Bath pH on Properties of Ni-W-Co Alloys Obtained by Electrodeposition. Journal of Alloys and Compounds, 853, 157104.
- Pradhan, S. K., Chakraborty, B., 2020. Substrate Materials and Novel Designs for Bipolar Lead-Acid Batteries: A review. Journal of Energy Storage, 32, 101764.
- Rajaramanan, T., Kumara, G. R. A., Velauthapillai, D., Ravirajan, P., Senthilnathanan, M., 2021. Ni/N co-doped P25 TiO₂ photoelectrodes for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. Materials Science in Semiconductor Processing, 135, 106062.
- Saraloğlu Güler, E., Irgin, D., 2024. Maximizing Electromagnetic Interference Shielding Through Carbon Fiber Plating with Nickel: A Parameter-Based Approach. Transactions of the Indian Institute of Metals, 1-10.
- Şimşek, S., Çetin, B., 2022. Galvaniz Kaplamada Banyo Sıcaklığı ve Akım Yoğunluğunun Kaplamanın Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (38), 544-552.
- Tyagi, P., Salem, K. S., Hubbe, M. A., Pal, L., 2021. Advances in Barrier Coatings and Film Technologies for Achieving Sustainable Packaging of Food Products—A Review. Trends in Food Science & Technology, 115, 461-485.
- Uğur, A., Nuran, A. Y., 2018. Atomik Katman Biriktirme (ALD) Cihazları ve Çeşitlerindeki Gelişmeler. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(4), 590-605.
- Venkateshaiah, N., 2022. Electroplating Process Plant Automation and Management Using Emerging Automation and Communications Technologies.
- Verma, N., Kumar, N., 2019. Synthesis and Biomedical Applications of Copper Oxide Nanoparticles: An Expanding Horizon. ACS Biomaterials Science & Engineering, 5(3), 1170-1188.
- Wang, Y., Li, W., Ma, L., Li, W., Liu, X., 2020. Degradation of Solid Oxide Electrolysis Cells: Phenomena, Mechanisms, and Emerging Mitigation Strategies—A Review. Journal of Materials Science & Technology, 55, 35-55.
- Yu, Y., Xu, W., Liu, X., Lu, X., 2020. Challenges and Strategies for Constructing Highly Reversible Zinc Anodes in Aqueous Zinc-Ion Batteries: Recent Progress and Future Perspectives. Advanced Sustainable Systems, 4(9), 2000082.
- Zhao, Y., Mo, Z., Wang, Z., Li, N., Xu, Y., Li, D., 2022. Numerical Simulation for Improving Coating Homogeneity of High-Speed Tin Plating System. Journal of The Electrochemical Society, 169(9), 092509.



TARIM TRAKTÖRLERİNDE HİDROLİK KALDIRMA KUVVETİNİN GERİYE DEVRİLME (ŞAHLANMA) NOKTASINA ETKİSİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Sadık Oğuz YILDIZ^{1*}, Selçuk OLUM², Hakan VELİOĞLU²

¹ T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Alet ve Makine Test Merkezi Müdürlüğü, ANKARA,

² T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, İç Denetim Başkanlığı, ANKARA,

Anahtar Kelimeler

Kaldırma Kuvveti,
OECD Kod 2,
Traktör Test,
Geriye Devrilme,
Hidrolik.

Öz

OECD Kod 2 traktör performans test standartlarına göre, Tarım Alet ve Makine Test Merkezi Müdürlüğünde (TAMTEST) gerçekleştirilen hidrolik kaldırma kuvveti (HK) testlerinden elde edilen veriler üzerinde yapılan çalışmada; traktörlerin HK kapasitelerinin, geriye devrilme (şahlanma) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bilindiği üzere OECD Kod2 traktör performans testlerinden biri olan HK testlerinde traktörler yükleme öncesinde ön akslarından zincirle yere sabitlenmektedir. Güvenlik amacıyla alınan önlemler, test edilen traktörlerin tarla koşullarındaki HK performansını tam olarak yansıtmamasına ve şahlanma etkisinin göz ardı edilmesine neden olmaktadır. Yapılan çalışmada; traktörlerin alt bağlantı kolu oynak noktasının yerden yüksekliği referans nokta kabul edilmiş ve paralel nokta olarak adlandırılmıştır. Ayrıca test edilen her bir traktörün alt bağlantı kolu oynak noktası ile dingiller arası mesafeleri ölçülmüş, basit moment hesabıyla paralel noktada, azami yüklemeye, ön dingile düşen dinamik yük bulunmuş ve traktörlerin şahlanma noktasına ulaşip ulaşmadığı hesaplanmıştır. Toplam 262 traktörün deney verileri incelenmiş olup, test edilen traktörlerin 104'ünün şahlanma noktasına ulaştığı yapılan hesapla bulunmuştur.

A STUDY ON THE EFFECT OF HYDRAULIC LIFTING FORCE ON THE OVERTURN BACKWARDS (REARING) POINT IN AGRICULTURAL TRACTORS

Keywords

Lifting Force,
OECD Code 2,
Tractor Tests,
Backward Overturning,
Hydraulics.

Abstract

In the study conducted on the data obtained from the hydraulic lifting force (HL) tests carried out at the Agricultural Tools and Machinery Test Center Directorate (TAMTEST) according to OECD Code 2 tractor performance test standards; The effect of hydraulic lifting force capacities of tractors on overturn backwards (rearing) was tested. As it is known, in HK tests, one of the OECD Code2 tractor performance tests, tractors are fixed to the ground by a chain from their front axles before loading. The measures taken for safety purposes cause the tested tractors to not fully reflect the HK performance of the tractors in field conditions and the rearing effect to be ignored. In the study; The height of the lower link arm pivot point of the tractors from the ground was accepted as the reference point and called the parallel point. In addition, the distances between the lower link arm pivot point and the axles of each tested tractor were measured, the dynamic load falling on the front axle at the parallel point, at maximum loading, was found by simple moment calculation, and it was calculated whether the tractors reached the rearing point. The test data of a total of 262 tractors were tested and it was calculated that 104 of the tested tractors reached the rearing point.

Alıntı / Cite

Yıldız, S.O., Olum, S., Veliöğlü, H., (2025). Tarım Traktörlerinde Hidrolik Kaldırma Kuvvetinin Geriye Devrilme (Şahlanma) Noktasına Etkisi Üzerine Bir Çalışma, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 133-143.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Sadık Oğuz Yıldız, 0000-0002-2831-7814
Selçuk Olum, 0000-0002-1442-3982
Hakan Veliöğlü, 0000-0003-2220-3602

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.12.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	23.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: oguzyz@gmail.com, +90-312-315-6374

A STUDY ON THE EFFECT OF HYDRAULIC LIFTING FORCE ON THE REVERSING POINT IN AGRICULTURAL TRACTORS

Sadık Oğuz YILDIZ^{1†}, Selçuk OLUM², Hakan VELİOĞLU²

¹ T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Alet ve Makine Test Merkezi Müdürlüğü, ANKARA,

² T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, İç Denetim Başkanlığı, ANKARA,

Highlights

- Increasing hydraulic lifting forces (HL) of tractors may also increase the risk of rollover.
- For more balanced tractors, the design should be made by taking the HL factor into consideration.Sentence
- The distance between axles is very important in maintaining tractor balance.
- For safe steering, the front axle weight should not fall below 20% of the tractor's total weight..

Purpose and Scope

If tractor designs are made without taking into account the HL, collapse hazardous situations such as pitching can occur. the aim of the study is to determine the reaching of the pitching point of the tractors subjected to the HK test and to ensure that the tractor designs are reviewed.

Design/methodology/approach

In this study, using the data obtained from the frameless hydraulic lifting force tests, the load falling on the front axles of the tractors during the test was determined, and the rearing point was found by calculating the moment with respect to the rear wheel axis. According to the calculations made, it was determined how many tractors exceeded the rearing point and how many did not reach the rearing point and remained in equilibrium. In addition, according to the OECD test procedure, the load on the front axle should not fall below 20% of the total weight of the tractor for safe steering. The moment calculation based on the rear axle center also determined how many tractors were within the safe steering tolerance.

Findings

In the evaluation, it was found that 113 (43%) tractors reared and the load on the front axle was insufficient, and 149 (57%) tractors did not rear. Of the 113 rearing tractors, 74 are 4WD and 39 tractors are 2WD tractors. Calculations showed that 26 (9.9%) of the 262 tractors tested exceeded the 20% tolerance for safe steering.

Research limitations/implications

Field trials may be conducted for at least some tractors so that laboratory test data can be compared with field data

Practical implications

In tractor hydraulic lifting force tests, the load on the front axle can be measured. In this way, the values found by calculations in this study can be compared with experimental data.

Social Implications

Informing tractor operators about what the data in tractor test reports mean and how to read the reports will be of great benefit.

Originality

The weight and load distribution of a standard tractor is a known issue and published in articles. However, the evaluation of the data in the tractor performance tests, the calculation of the moment against the danger of rearing and for safe steering tolerance, and the fact that the study was conducted with a large number of samples reveal the difference between this study and other studies.

† İlgili yazar / Corresponding author: oguzyz@gmail.com, +90-312-315-6374

1. Giriş (Introduction)

Tarımda ana güç kaynağı traktördür. Traktörün termik motorunda üretilen güç dönü hareketine çevrilerek tekerlere, kuyruk miline ve hidrolik pompaya iletilmektedir. Böylelikle traktör motorunda üretilen güç tekerlere iletilerek çeki gücü, kuyruk miline ileterek PTO (Power Take Off) gücü ve hidrolik motora iletilerek hidrolik güç olarak karşımıza çıkmaktadır. Traktör; tarımsal mekanizasyonun temel kaynağı olan ve tüm tarımsal iş ve işlemlerde kullanılabilen, tırtıllı, tekerlekli veya kombine yürüyen aksamı olan kendi yürür bir kuvvet makinesi şeklinde tanımlanmaktadır (Saral, 1997).

Tarımsal işlemlerde, üretilecek ürünün çeşidine ve arazi özelliklerine göre kullanılacak ekipman ve ekipmanın bağlandığı traktörün özelliklerinin değişiklik gösterdiği bilinmektedir.

Çiftçinin bu önemli kuvvet kaynağını verimli kullanabilmesi ve traktörün ticaretinin sağlıklı yapılabilmesi için traktör performansının tespit edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Hükümetler arası bir kuruluş olan Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) tarım ve orman traktörlerinin testleri için standart kodlar koymuştur. (Taşbaş vd., 2003)

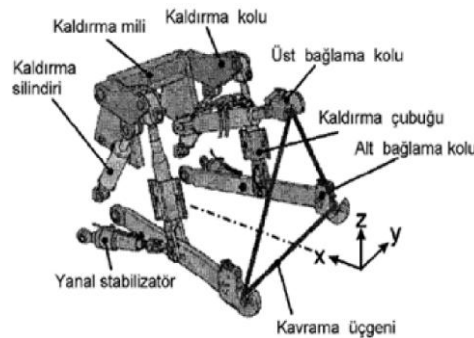
OECD, hükümetlere dirençli, kapsayıcı ve sürdürülebilir büyümeyi destekleyen politikalar konusunda danışmanlık yaparak dünya çapında daha fazla refah sağlamayı amaçlayan; kanıta dayalı politika analizleri ile tavsiyeler veren, uluslararası standartlar oluşturan, küresel zorluklara yönelik reformların ve çok taraflı çözümlerin geliştirilmesine yardımcı olan uluslararası ekonomik bir iş birliği örgütüdür (OECD, 2024).

OECD Kod 2 tarım ve orman traktörlerinin performansı için standart test kodu olarak kabul edilmektedir OECD Kod 2'de yapılan testler zorunlu ve isteğe bağlı testler olarak iki kısımda incelenebilmektedir. Kuyruk mili (power take-off and engine tests), hidrolik güç (hydraulic power), hidrolik kaldırma kuvveti (hydraulic lift), çeki gücü ve yakıt tüketimi (drawbar power and fuel consumption) yapılması zorunlu testlerdir. Dönme alanı ve dönme noktası (turning area and turning circle), ağırlık merkezi (centre of gravity), frenleme (braking), gürültü seviyesi (external noise level), su geçirmezlik testi (waterproofing test) isteğe bağlı testler olarak nitelendirilmektedir (OECD, 2024).

OECD traktör performans testlerinin amacı, tarım traktörlerinin performansını standart bir şekilde değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. Bu testler, traktörlerin güvenilirliği, verimliliği, yakıt tüketimi, emisyonları ve genel iş performansı gibi önemli özelliklerini belirlemek için kullanılır. Testler, traktör üreticileri arasında adil bir rekabet ortamı sağlamak, tüketicilere kaliteli ürünler sunmak ve tarım endüstrisinde standartları yükseltmek amacıyla gerçekleştirilir. Bu testler aynı zamanda çevresel etkileri değerlendirerek, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliğini de göz önünde bulundurmaktadır. Traktörlerin performansı kadar önemli bir hususta bu performansı sergilerken ortaya çıkan güvenlik riskleridir. Özellikle engebeli ve eğimli arazilerde traktörlerin devrilmesi sık rastlanan kazalar arasındadır. Bu tür olumsuz durumları önlemeye yardımcı olmak için traktör tasarımlarında denge faktörünü de mutlaka göz önünde bulundurmak gerekir.

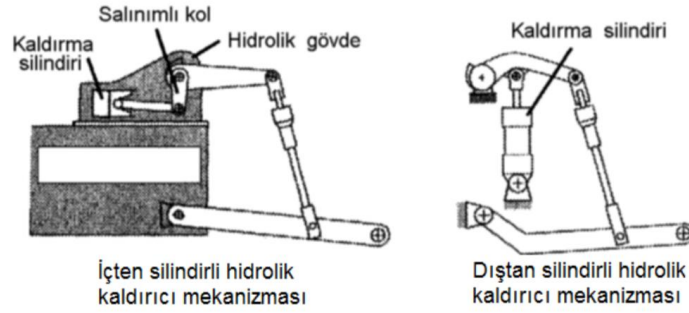
Güvenlik açısından zorunlu olan yuvarlanmaya karşı koruyucu donanımlar yüksekliği tasarlanırken esas faktör yuvarlanmayı önlemek olsa da şaşlanma ve öne kapaklanma durumlarında sürücüyü koruyabilecek limitlerden daha düşük olmamalıdır (Silleli, 2006).

Hidrolik kaldırıcı traktörün arka kısmında, transmisyon (dişli kutusu) üzerine monte edilmiş bir gövde, iki adet kaldırma kolu (dış kol), ana mil, krank kolu, piston kolu, silindir, piston ve kontrol valfinden meydana gelen bir kaldırma sistemidir. Bazı tip hidrolik kaldırıcılarda krank kolu ve piston kolu olmayabilir. Silindir veya silindirler böyle sistemlerde doğrudan dış kollara bağlıdır (Tezcan vd., 2014). Şekil - 2'de gösterildiği gibi ekipman üç nokta askı sistemi yardımıyla hidrolik kaldırıcının kollarına bağlanır ve kumanda kolları vasıtasıyla istenen pozisyona kalkması veya inmesi sağlanır (Şekil 1).



Şekil 1. Traktör Üç Nokta Askı Sistemi (Tractor Three-Point Hitch System)

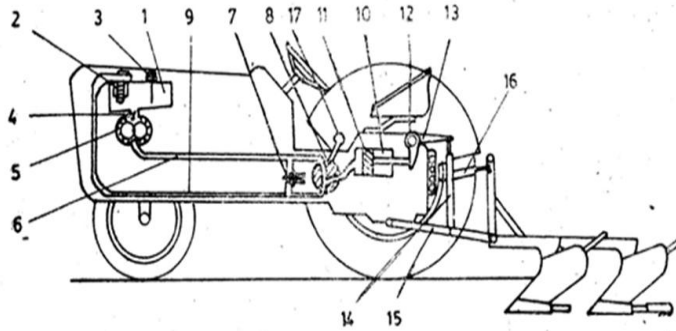
Hidrolik kaldırıcılar önce kendi arasında içten silindirli ve dıştan silindirli hidrolik kaldırıcılar olarak gruplanabilir. Ekipmana hareket vermeye yarayan askı kolları tahrikini hidrolik silindirlerden alır. Bu hidrolik silindirler tasarıma göre değişiklikler göstererek **Şekil 2**'te gösterildiği gibi bir gövde içine konumlandırılmış hareketi bir iç kol ve piston koluyla dış kollarla iletiyor ya da direkt dış kolların altına konumlandırılmış yapıda olabilir (Keçecioglu & Gülsoylu, 2003).



Şekil 2. İçten silindirli ve dıştan silindirli yapıya sahip hidrolik kaldırma mekanizmalarının yapısı (Structure of hydraulic lifting mechanisms with internal cylinder and external cylinder structure)

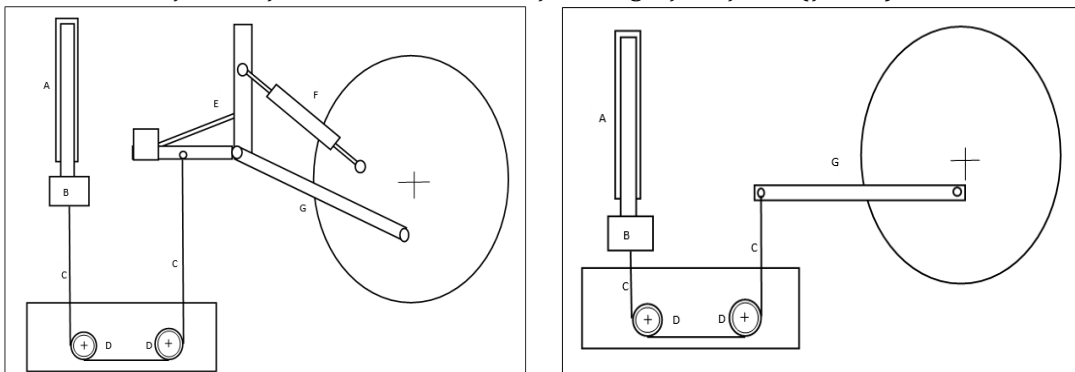
Hidroliğin uygulama alanının yaygınlığı; kolay kontrol edilebilmeleri, güçlü ve güvenilir hareketler üretebilmeleri, sistemi durdurmadan tersine hareketler üretebilmeleri, sistem çalışırken hız ve yön ayarı yapılabilmesi gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır (Güner & Erkan, 2003).

Traktör hidrolik sisteminde yer alan başlıca elemanlar Şekil 3'de gösterilmektedir. Bunla, yağ deposu, borular ve hortumlar, pompalar, yön kontrol valfleri, basınç kontrol valfleri, hidrolik kaldırıcı kumanda valfleri, yardımcı güç çıkışı bağlantıları, hidrolik silindirler ve hidrolik motorlar olarak sıralanabilmektedir. (Ünlü, 2005).



Şekil 3. Traktör Hidrolik Sisteminde Yer Alan Başlıca Elemanlar (Main Components in Tractor Hydraulic System)

OECD Kod 2'ye göre hidrolik testler iki aşamadan oluşur önce hidrolik güç testi ardından da HK testleri yapılmaktadır. HK testi, çatılı ve çatısız olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir (Şekil 4).



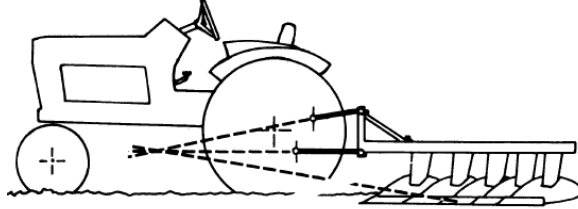
Şekil 4. Çatılı ve Çatısız Deneysel Kurulumlar (Coupled Frame and Hitch Point Tests)

- | | |
|--------------------|------------------------------|
| A. Hidrolik piston | E. Test çatısı |
| B. Loadcell | F. Traktör üst bağlantı kolu |
| C. Çelik halat | G. Traktör Alt bağlantı kolu |
| D. Makara | |

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

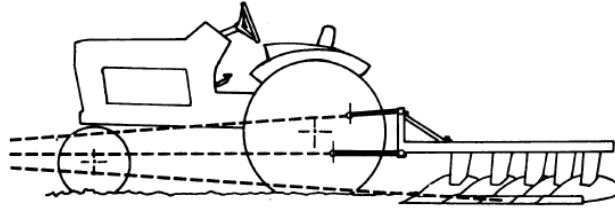
Yüksek güçlü traktörlerin hidrolik güçleri üzerine yapılan bir çalışmada; traktöre bağlanan ekipmanların ağırlık merkezine etkisi incelenmiştir. Ekipman olarak seçilen pulluğun toprağa temas ettiği noktada yanal ve dikey denge noktasında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiş ancak ekipman taşıma modunda yukarı kaldırıldığında şahlanma riski meydana geldiği gözlemlenmiştir (Wilson, 1971).

Traktörle ekipman kullanımında tüm koşullar için optimum bir bağlantı yöntemi veya geometrisi yoktur. Kullanılacak ekipmana toprak koşullarına göre bağlantı şekli ayarlanmalıdır. Aşağıda farklı ekipman konumlarının traktör dengesine etkisi gösterilmektedir. Eğer ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün ağırlık merkezine yakınsa (Şekil 5), pulluk düz ya da engebeli arazilerde verimli çalışacaktır ancak eğimli arazide verimli çalışmak mümkün olmayacaktır.



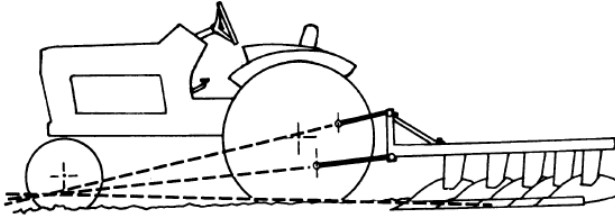
Şekil 5. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası (merkezde)
(Intersection Point of Equipment Loads in The Vertical Plane (at the center))

Ekipman yüklerinin kesişim noktası ileri uçta, ortada ise ekipman çeşitli derinliklerde zorlanmadan çalışabilecektir (Şekil 6). Bu durum traktör hidrolik güç kapasitesinin verimli kullanıldığı anlamına gelmektedir ancak engebeli arazide aynı verimden söz etmek mümkün değildir.



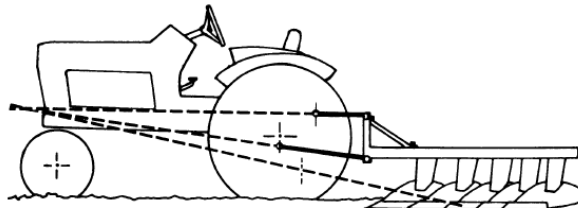
Şekil 6. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası (ileri uçta, ortada)
(Intersection Point of Equipment Loads in The Vertical plane (forward end, center))

Ekipman yüklerinin kesişim noktası ileri uçta, alçak konumda ise; sert ve aşınmış toprakta iyi pulluk penetrasyonu elde edilir (Şekil 7).



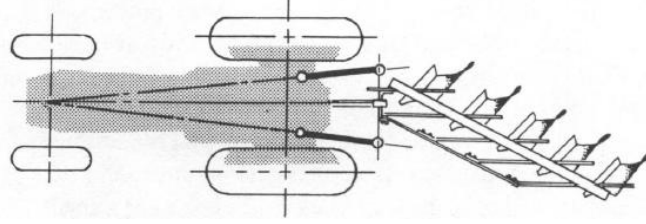
Şekil 7. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası (ileri uçta, alçakta)
(Intersection Point of Equipment Loads in The Vertical plane (forward end, low end))

Ekipman yüklerinin kesişim noktası ileri uçta, yüksek konumda ise daha yüksek hidrolik güç gereksiniminin yanı sıra patinaj miktarının artmasına da yol açacaktır (Şekil 8).



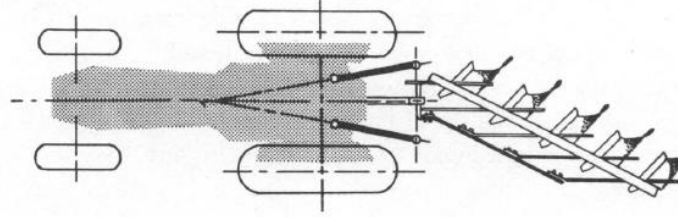
Şekil 8. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası (ileri uçta, yüksekte)
(Intersection of Equipment Loads in The Vertical Plane (at the forward end, at height))

Yatay düzlemde ekipman yüklerinin kesişim noktası ileri uçta ise; traktör keskin dönüşlerde daha dengeli davranma eğiliminde olacak ve daha hassas işlem genişliği elde edilebilecektir. (Şekil 9).



Şekil 9. Yatay Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası (ileri uçta)
(Intersection Point of Equipment Loads in The Horizontal plane (at the forward end))

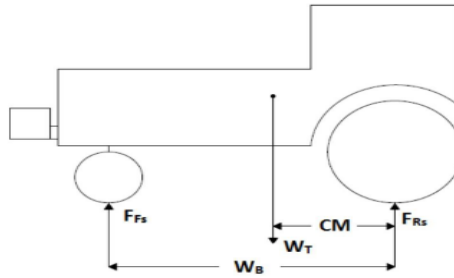
Yatay düzlemde ekipman yüklerinin kesişim noktası merkeze yakın konumda ise; ekipman daha kolay yönlendirilebilmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Yatay Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası (merkeze yakın)
(Intersection Point of Equipment Loads in The Horizontal Plane (near the center))

OECD traktör test kodlarını esas alınarak, traktör hidrolik kaldırıcılarının performansları üzerine yapılan bir araştırmada; son on yılda Amerikalı çiftçiler traktör satın alırlarken Nebraska Traktör Test Laboratuvarı'nın raporlarını referans aldıkları ancak alınan traktörlerin test raporundaki HK performansını göstermediği belirlenmiştir (Melotz, 2016). Bu durumun gerekçesi ise HK testlerinde traktörler şahlanma tehlikesine karşın güvenlik amaçlı zemine sabitleniyordu bu durum traktörün daha fazla hidrolik kuvvet üretmesine neden oluyordu. Arazi şartlarında böyle bir durum mümkün olamayacağı için çiftçiler ya fazladan ön ağırlık koyarak ya da daha büyük güçlü traktörler temin ederek sorunu çözmek zorunda kalıyorlardı.

Kaldırma kuvveti arttıkça, traktörün arka dingili üzerindeki aşağı yönlü kuvvet artar ve ön dingildeki yukarı yönlü destek kuvveti azalır. Toplam traktör ağırlığı, Şekil 11'de gösterildiği gibi statik tartımda ön dingilde ölçülen ağırlık (FFs) ve arka dingilde ölçülen ağırlığın (FRs) toplamına eşittir.



Şekil 11. Traktör Ağırlık Dağılım Diyagramı (Tractor Weight Distribution Diagram)

Çalışmada traktörün üç nokta askı sisteminin gerçekçi, arazi koşullarında da ulaşılabilir HK kapasitesi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın amacı yalnızca traktörün gerçekçi HK kapasitesine ulaşmak değil; aynı zamanda kaldırma esnasında traktörün ön dingiline düşen yükü bularak dümenleme hakimiyetini yorumlamaktır. Çalışmanın sonunda, Traktör operatörlerinin ön dingile gelen yükün toplam traktör ağırlığının %20'sine sahip olmanın %15'ine kıyasla traktörün dümenleme kontrolünü daha iyi sağladığı kanaatine varılmıştır. Bulunan sonuçlar

Güney Kore, İspanya ve Türkiye dahil olmak üzere çeşitli ülkelerde traktör kaza oranlarının araştırıldığı bir çalışmanın sonucunda, traktörle ilgili ölümlerin yarısından fazlasının devrilme kazalarından kaynaklandığını göstermektedir (Jang vd., 2024). Güney Kore'de, traktör kazaları 2020 yılında tarım makinesi kazalarının %12,3'ünü oluştururken, binilebilir tarım makinelerinde yan devrilme ve geriye doğru devrilme kazalarından kaynaklanan çiftçi yaralanmaları en büyük payı (%34,1) oluşturuyordu. Traktörler Güney Kore'de ve birçok gelişmiş ülkede tarımsal kazaların önemli nedenleri arasında sayılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri ve AB'de, tarımsal faaliyetler diğer faaliyetlere kıyasla yaklaşık üç kat daha fazla kaza ile ilişkilendirilir. Bu kazaların %80'i tarım makinelerini içerir ve traktörler önde gelen nedendir. İspanya'da 2004 ila 2013 yılları arasında yaklaşık 200

tarım kazasının analizi, makineyle ilgili kazaların %69'unun traktörlerden kaynaklandığını ve bunların %30'unun devrilme kazaları olduğunu ortaya koydu. Benzer şekilde, Türkiye'de, 2000 ila 2007 yılları arasında traktörün devrilmesi ve devrilmesinden kaynaklanan 85 ölümün analizi, 53 ölümün (%61,6) tarlalarda, tarım arazilerinde ve sırtlarda meydana geldiğini ortaya koydu. Sonuçlar, traktörlerin yana devrilme ve geriye doğru devrilme nedenlerinin aşırı uç açısı (statik güvenlik sınırının ötesinde), dengesiz ve engebeli zemin, yükleme koşulları ve aşırı yüksek sürüş hızını içerdiğini göstermektedir.

Traktörün sol ve sağ devrilme açıları karşılaştırıldığında, sağ tarafa devrilme güvenliğinin düşük olduğu bulundu çünkü ağırlık merkezi (yağ pompası ve yakıt hücresi) sağ tarafta bulunuyordu. Ayrıca, ön tekerlek kaldırma(uç) açısı arttıkça geriye doğru devrilme güvenliğinin azaldığı bulunmuştur.

Çalışmada traktörün devrilmeden gidebilme durumunu araştırabilmek için bir matematiksel model oluşturulmuştur. Elde edilen bulgulara göre; traktörün ağırlık merkezinin yerden yükselmesi, dingiller arası mesafenin kısılması şahlanmaya ve akabinde geriye devrilmeye yol açtığı; iz genişliğinin artırılmasının yanal ve dikey stabiliteyi olumlu yönde etkilediği bulunmuştur. Ayrıca eğimli ve engebeli arazide sürüm yaparken eğim açısının traktörün güvenli sürüş hızını etkilediği belirlenmiştir. Ekipman kullanımına bağlı olarak ağırlık merkezinin değiştiği, zemin eğiminin ve engebelerin yüksekliği arttıkça güvenliğin azaldığı da yana ve geriye doğru devrilme konusunda elde edilen bulgular arasındadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmanın materyalini, 2018-2020 yılları arasında TAMTEST'te, HK test istasyonunda, OECD Kod 2'ye göre test edilen toplam 262 adet traktörün test raporlarından elde edilen veriler oluşturmaktadır.

HK testi OECD Kod 2 Traktör performansı HK test prosedürüne göre yapılmış olup çatisız test verileri esas alınmıştır.

Test edilen 262 traktöre ait bazı teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Test Edilen Traktörlere Ait Bilgiler (Information About The Tested Tractors)

	Ağırlık (kg)	Motor gücü (kW)	Hidrolik güç (kW)	Çeki gücü (kW)	Hidr. K. Kuv. (kN)	Dingiller arası m. (m)
En yüksek	8800	181,7	17,1	96,7	96,7	3
En düşük	625	10	1,2	4,8	4,8	1,3
Ortalama	3340	55,1	7,8	28,4	28,4	2,2

Ayrıca test edilen traktörlerin 213 adedi 4WD, 49 adedi 2WD çekiş özelliğine sahip olup; 9 adedi CVT şanzımana sahiptir. Test edilen traktörler motor güçlerine göre 5 gruba bölünmüş ve bu gruplara göre değerlendirme yapılmıştır.

Tablo 2. Traktör Motor Gücüne Göre Oluşturulan Gruplar ve Test Edilen Traktör Adetleri (Groups Formed According to Tractor Engine Power and Number of Tractors Tested)

Grup	Güç Aralığı (kW)	Toplam Adet
A	10-<35 kW	50
B	35 ≤-<45 Kw	69
C	45-<60 kW	69
D	60≤-<100 kW	54
E	100 kW (+)	20

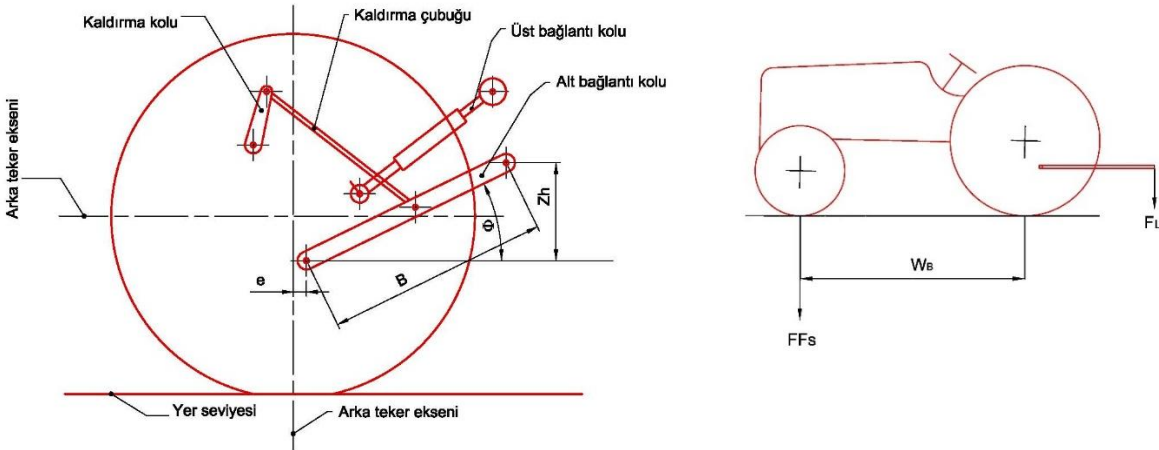
3.2. Yöntem (Method)

HK testleri, temel olarak traktörlerin hidrolik kaldırma kollarının hangi yükseklikte ne kadar kuvvet ürettiğinin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Traktör alt bağlantı kolu bağlantı noktasının yerden yüksekliği ISO 730:2009 standardı gereği maksimum 230mm olacak şekilde ayarlanır. Bu yükseklik alt bağlantı kollarının minimum yüksekliği olarak kabul edilir. Testin sonunda, traktörün hidrolik sisteminde bulunan relief valfin açtığı nokta ise maksimum yükseklik olarak kabul edilir. HK testi traktör alt bağlantı kollarının minimum yükseklikten maksimum yüksekliğe ulaşmaya kadar sürekli olarak kuvvet ve mesafe ölçümü yapılır. Bu sayede hangi yükseklikte ne kadar kuvvet üretildiği bulunmuş olur. Hesaplamalarda kullanılan formüller ve şeması aşağıdadır (Şekil 12).

$$F_L \frac{(F_{FS} - (W_T * \%0W)) * W_B}{(e + [B * \cos(\Phi)])} \quad (5)$$

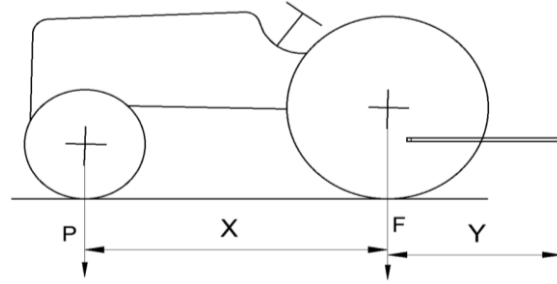
$$\Phi = \sin^{-1} \frac{Z_h}{B} \quad (6)$$

- FL : Ön dingile etki eden yukarı yönlü dikey kaldırma kuvveti (kN)
 FFs : Ön dingil ağırlığı (kN)
 WT : Traktörün toplam ağırlığı (kN)
 WB : Dingiller arası uzaklığı (mm)
 e : Alt bağlantı kolu oynak noktasının arka tekerlek ekseninden yatay uzaklığı (mm)
 B : Alt bağlantı kollarının uzunluğu (mm)
 zh : Alt bağlantı kolu bağlantı noktasının, alt bağlantı kolu oynak noktasına göre yüksekliği (mm)
 ϕ : zh kaldırma yüksekliğinde, hidrolik kaldırıcının alt bağlantı kollarının yataya göre açısı



Şekil 12. HK Testi Ölçülen Ve Hesaplanan Değerler (Hydraulic Lift Test Measured and Calculated Values)

Çalışmada, HK testlerinden elde edilen veriler kullanılarak, traktörlerin test esnasında, maksimum yükte, alt bağlantı kolları paralel noktasındayken ön dingiline düşen yük tespit edilmiş ve arka teker eksenine göre moment hesabı yapılarak şatlanma noktası bulunmuştur. Hesaplamalarda kullanılan ölçülerin şematik gösterimi Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Yüklü Durumda Moment Kolları ve Yükler (Moment Arms And Loads in Loaded Condition)

- P: Ön dingile gelen yük (N),
 F: Paralel noktasında kaldırma kuvveti (N),
 Y: 1.Moment kolu (m),
 X: 2.Moment kolu (m)

$$M_1 = F \cdot Y \quad (3)$$

$$M_2 = P \cdot X \quad (4)$$

M1 = M2 ise traktör şatlanma eşiğindedir.
 M1 > M2 ise Şatlanma başlamıştır.
 M1 < M2 ise yatay dengededir.

Yapılan hesaplara göre şatlanma noktasını aşan ve şatlanma noktasına ulaşmayıp dengede kalan traktörler tespit edilmiştir. Ayrıca OECD test prosedürüne göre güvenli dümenleme yapılabilmesi için ön dingile gelen yükün, traktörün toplam ağırlığının %20'sinin altına düşmemesi gerekmektedir ((OECD, 2024b)). Çalışmada arka dingil merkezine göre yapılan moment hesabıyla kaç traktörün güvenli dümenleme toleransında olduğu da tespit edilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yapılan değerlendirmede 113 adet (%43) traktörün şahlandığı ve ön dingile gelen yükün yetersiz kaldığı, 149 adet (%57) traktörde de şahlanmanın olmadığı yapılan hesapla bulunmuştur. Şahlanma tehlikesi olan 113 adet traktörün 74 adedi 4WD, 39 adet traktör ise 2 WD traktördür. 4WD traktörlerin ön dingil ağırlığının toplam ağırlığa oranı (42,4%), 2WD traktörlere (37,8%) nazaran daha yüksek çıkmıştır.

Testleri yapılan 262 traktörün 26'sının (%9,9) güvenli dümenleme yapabilecek %20'lik toleransı aştığı yapılan hesaplamalarla bulunmuştur. Şahlanma tehlikesi olan ve olmayan traktörlerle ilgili detaylı bilgi Tablo 3'te ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3 . Şahlanma Tehlikesi Yaşayan Traktörlerle İlgili Veriler (Data On Tractors in Danger of Overturning)

Grup	Traktör (Adet)	Motor Gücü (kW)	Hidr. Güç (kW)	Hidr. K.Kuv (kN)	Çeki Gücü (kW)	Ağırlık (kg)	Ön/T. Ağırlık Oran (%)
A	23	28,8	6,7	18,1	18,4	1987	% 39,1
B	29	38,3	8,4	38,3	42,7	3915	% 40,3
C	27	51,8	7,3	28,1	32,8	3000	% 40,2
D	31	74,5	9,1	43,5	47,5	4367	% 40,7
E	3	173,1	12,0	86,2	93,7	8450	% 39,7
G. ORTALAMA	113	53,11	7,43	30,42	32,86	3158,40	% 39,6

Şahlanma tehlikesi yaşamayan dengeli traktörlerle ilgili veriler Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4. Şahlanma Tehlikesi Yaşamayan, Dengeli Traktörlerle İlgili Veriler (Data on Stable Tractors That Are Not in Danger of Overturning)

Grup	Traktör (Adet)	Motor Gücü (kW)	Hidr. Güç (kW)	Hidr. K.Kuv (kN)	Çeki Gücü (kW)	Ağırlık (kg)	Ön/T. Ağırlık Oran (%)
A	27	27,6	6,1	14,8	18,3	1993	% 42,2
B	40	40,9	7,3	21,0	27,1	2775	% 42,1
C	42	51,3	7,7	24,4	34,6	3282	% 41,5
D	23	75,2	9,3	33,9	48,1	4242	% 42,0
E	17	128,6	12,0	57,4	77,8	6981	% 42,8
G. ORTALAMA	149	56,7	8,0	26,9	36,6	3477,0	% 42,1

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

4WD traktörlerin ağırlık merkezi 2WD traktörlere nazaran daha geride olmasına rağmen şahlanma tehlikesi daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni ise 4WD traktörlerin ön dingil ağırlığının ya da ön dingil ağırlığının traktör toplam ağırlığına oranının daha yüksek olmasıdır. 4WD traktörler için ön dingil ağırlığının toplam ağırlığa oranı: 42,4%, 2WD için bu oran: 37,8% olarak hesaplanmıştır. Traktör çekiş türüne bakmaksızın genel ortalama bakıldığında da benzer bir durum olduğu görülmektedir. Traktör ön dingil ağırlığının toplam ağırlığa oranı şahlanma tehlikesi olan traktörlerde olmayan traktörlere oranla %2,5 daha düşüktür. Genel ortalama; şahlanmayan traktörlerin motor gücünün, hidrolik gücünün, çeki gücünün ve toplam ağırlığının daha yüksek olduğu; ancak HK'nin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu verilerden yola çıkarak daha dengeli traktörlerin tasarımında, her ne kadar güçleri artmış olsa da ön-arka ağırlık dengesinin ve HK kapasitesinin büyüklüğünün önemli rol oynadığı anlaşılmaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte traktör motor güçlerinin, hidrolik güçlerinin ve ağırlıklarının arttığı bilinen bir gerçektir. Örneğin, Nebraska Traktör Test Laboratuvarı'nda yapılan bir araştırmaya göre, 1995-2014 yılları arasında test edilen 112 kw üzerindeki 2WD ve MFWD traktörlerin toplam ağırlığının yılda ortalama 1,51 kN, HK'nin 1,66 kN; ön dingildeki statik ağırlığın 0,69 kN arttığı bulunmuştur (Melotz, 2016). Ön dingil ağırlığının HK ve toplam ağırlığa nispeten daha düşük bir oranda artması daha dengesiz traktörlerin üretildiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir.

Tarımsal faaliyetlerde Daha büyük ekipman kullanabilmek için HK kapasitesinin yüksek traktör almak önemli bir avantajdır. Ancak üç nokta askı sistemi HK kapasitesine uygun tasarlanmadığında, dümenleme kontrolünün azalmasına ve nihayetinde şahlanma tehlikesiyle karşılaşılmasına neden olabilmektedir. Traktör ön dingiline düşen yük %15 ile %20 aralığında traktör dengesinde önemli ölçüde bozulma meydana getirdiği yapılan çalışmalarla belirlenmiştir (Melotz, 2016). Bu durum göz önüne alınarak OECD 2020 yılında HK test kurallarında değişikliğe gitmiş ve ön dingile düşen yükün %20'nin altına düşmemesi gerektiği OECD Kod2 test talimatlarına eklenmiştir (OECD, 2024).

Tarım traktörleri gibi arazi araçlarında denge çok önemlidir. Özellikle engebeli ve eğimli arazilerde çalışırken dengeli çalışmak hayati önem arz etmektedir. Dengeli tasarlanmamış traktörler, dümenleme kontrolünün azalmasının yanı sıra yana ve geriye devrilmeye sebep olabilmektedir. Sonuç olarak yaralanmalı ya da ölümlü iş kazaları meydana gelebilmektedir. Türkiye’de, 2000 ila 2007 yılları arasında traktör devrilmesinden kaynaklanan 85 ölümün, 53’ü (%61,6) tarım arazilerinde meydana gelmiştir. Traktörlerin yana devrilme ve geriye doğru devrilme nedenlerinin aşırı uç açısı (statik güvenlik sınırının ötesinde), dengesiz ve engebeli zemin, yükleme koşulları ve aşırı yüksek sürüş hızını içerdiğini göstermektedir (Jang vd., 2024).

Türkiye’de, 2023 yılı içerisinde, tarımsal faaliyetler esnasında, toplam 6111 adet iş kazası meydana gelmiştir. Bu kazaların 38’i ölümlü sonuçlanmıştır (SGK, 2024). 2003–2005 yılları arasında meydana gelen tarımda iş kazaları ve kaza maliyetleri hakkında yapılan bir araştırmaya göre tarım sektöründe yılda ortalama 402 iş kazası olduğu, bu sayının toplam iş kazaları içerisinde %0,51’lik bir paya sahip olduğu anlaşılmıştır. Kaza başına maliyetlerde ise tarım sektöründe ortalama kaza maliyeti 7.250\$ olduğu ve diğer sektörlerdeki kaza maliyetinden %81 daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Meslek hastalığı nedeniyle toplam işgücü kaybı tarım sektöründe 27.519\$ (%0,51), diğer sektörlerde ise 5.323.403\$ (%99,49) olmuştur (Ünal vd., 2008).

OECD traktör test kodları kullanılmaya başlandığı 1959 yılından itibaren ihtiyaca binaen değişikliklere uğramıştır. Örneğin 1979 yılında HK test prosedürüne göre; traktör ön dingili gevşek bir şekilde yere bağlanıyordu. Bu durum zamanla güvenlik gerekçesiyle yere daha sıkı bağlanması yönünde değiştirildi (Melotz, 2016). Güncel yönetmeliğe göre HK testleri esnasında traktörler, lastikleri ve süspansiyonlarını saptırmayacak şekilde ön dingilden yere sabitlenmektedir (Şekil 14). Ön dingilin yere sabitlenmesi HK’nın arazi şartlarına nazaran daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. HK testi esnasında ön dingil yükünün de ölçülerek şahlanma noktası bilgisinin deney talimatlarına ve test raporuna dahil edilmesi, daha doğru traktör seçimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 14. Traktörün Ön Kısımının Zemine Sabitlenmesi (Fixing The Front of The Tractor To The ground)

Şahlanma tehlikesine karşı traktör operatörleri dengeli sağlayabilmek için ilave ağırlık kullanmak zorunda kalmaktadır. Bu da toprağın daha fazla çığnemesi gibi tarımsal zararının yanı sıra yakıt tüketimi, lastik aşınması, işçilik vb. gibi maliyeti artırıcı unsurları da beraberinde getirmektedir. Traktör ağırlık merkezinin yere daha yakın tasarlanması, tüm lastiklere fren ve süspansiyon sistemleri uygulanması güvenliği artıracaktır. Traktör iz genişliğindeki bir artış, yan devrilmeyi ve geriye doğru devrilmeyi önleyebilir, ancak aşırı bir artış sürüş ve dümenleme kontrolünü olumsuz etkileyecektir (Jang vd., 2024). Şahlanmaya etki eden diğer faktörler: alt bağlantı kolları uzunluğu, üst bağlantı kolu uzunluğu, dingiller arası mesafe, ilave ağırlık kullanımı vb. sayılabilir. Bu bilgilerin hem traktör operatörleri hem de üreticileri tarafından iyi anlaşılması oldukça önemlidir. Ayrıca, traktör tasarımında da yukarıda belirtilen durumların dikkate alınması sorunun çözümü noktasında katkı sağlayacaktır.

6. Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

7. Kaynaklar (References)

- Güner, M., Erkan, M. T., 2003. Hidrolik Tahrikli Kovalı İletici Tasarımı. Tarım Bilimleri Dergisi, 9(3), 284-290
- Jang, M. K., Kim, S. J., Shin, B. S., Nam, J. S. 2024, Mart 1. "Lateral Overturning and Backward Rollover of Agricultural Tractors: A Review". Agriculture (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- Keçecioglu, G., Gülsoylu, E., 2003. Traktör ve Tarım Makinaları Hidroliği, III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, S.57-66. İzmir.
- Melotz, G., 2016. An Evaluation Of Agricultural Tractors Hydraulic Lift Performance, Theses, and Student Research, Biological Systems Engineering University of Nebraska USA
- OECD. (2024). Code 2 OECD Standard Code For The Official Testing of Agricultural And Forestry Tractor Performance.

- <https://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/02-oecd-tractor-codes-code-02.pdf>, erişim tarihi, 14.03.2024.
- Saral, A. (1997). Tarım Traktörleri. Ankara üniversitesi ziraat fakültesi. Yayın No: 1471, Ders Kitabı, 436, s.141-152.
- Silleli, H. H., 2006. Traktör Sürücüsü Önüne Takılan Koruyucu Yapılarda Sürücü Güvenliğini ve Sürüş Performansını Artıracak Bir Sistem Geliştirilmesi. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, C. 2, Sayı 1, S.41-48
- Taşbaş, H., Aygül, A., İlban, B., ve Cıvcıv, M., 2003. Tarım Traktörlerinin OECD Test Koduna Göre Performans Değerleri (1999-2002). Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Yayınları. Ankara
- Tezcan, O., 2014. Kontrol Mekanizması Gövdesine Tümlleşik Dıştan Silindirli Hidrolik Kaldırıcı Tasarımı ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Namık Kemal Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 87s. Tekirdağ
- Ünal, H. G., Yaman, K., Gök, A. 2008, Türkiye’de Tarımsal İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları nın Maliyeti Üzerine Bir Araştırma, Tarım Bilimleri Dergisi, 14(4), 428-435.
- Wilson, R. W. 1971. Hydraulic Power Lift Controls and Power Utilization for Larger Tractors, SAE Transactions, Vol. 80, Section 4: Papers 710619-710867 (1971), pp. 2378-2385, SAE International



AA5754 ALAŞIMININ ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ İLE EĞİLME VE GERİ ESNEME DAVRANIŞININ ANALİZİ

Süleyman KILIÇ^{1*}, Mehmet Fatih DEMİRDÖĞEN²

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

² Petlas Lastik Sanayi Ticaret A. Ş., Kırşehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

AA5754,
Geri Esneme,
Üç Nokta Eğme,
Zımba Yarıçapı,
Haddelme Yönü.

Öz

Bu çalışmada, AA5754 alüminyum alaşımının eğilme davranışı üç nokta eğme testi kullanılarak araştırılmıştır. Üç nokta eğme testi, malzemelerin elastik ve plastik deformasyon davranışlarını anlaşılması, sertlik ve mukavemet özelliklerini değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir test yöntemidir. Farklı zımba yarıçapları (3, 5, 7 mm), deformasyon hızları (2, 5, 10 mm/dak), zımba mesafeleri (30, 40, 50 mm) ve hadde yönleri (0° ve 90°) kullanılarak yapılan deneylerde, bu parametrelerin geri esneme üzerindeki etkileri incelenmiştir. İmalat mühendisliğinde kritik bir konu olan geri esneme, sac metal malzemelerin şekillendirilmesi sırasında zımba kuvvetinin kaldırılmasıyla malzemede meydana gelen açı değişimidir. Geri esneme ölçümleri, evrensel açı ölçer ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilere göre, zımba mesafesinin artırılması geri esnemenin artmasına neden olmuştur. Zımba yarıçapının haddelme yönü boyunca artırılması geri esnemeyi önemli ölçüde etkilemezken, numunelerin haddelme yönüne dik yönde zımba yarıçapının artırılması daha büyük geri esnemeye neden olmuştur. Zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisi ise sınırlı düzeyde bulunmuştur. Minimum geri esneme, 3 mm zımba yarıçapı, 10 mm/dak deformasyon hızı ve hadde yönünde yapılan eğme işlemlerinde gözlemlenmiştir. Bu çalışma eğme işlemindeki parametrelerin geri esneme üzerindeki etkisini göstermektedir.

ANALYSIS OF BENDING AND SPRINGBACK BEHAVIOUR OF AA5754 ALLOY USING THE THREE-POINT BENDING TEST

Keywords

AA5754,
Springback,
Three-Point Bending,
Punch Radius,
Rolling Direction.

Abstract

In this study, the bending behavior of AA5754 aluminum alloy was investigated using the three-point bending test. The three-point bending test is a method used to understand the elastic and plastic deformation behaviors of materials and to evaluate their hardness and strength properties. Experiments were conducted with different punch radii (3, 5, 7 mm), deformation speeds (2, 5, 10 mm/min), punch distances (30, 40, 50 mm), and rolling directions (0° and 90°) to examine their effects on springback. In manufacturing engineering, springback is a critical issue and refers to the change in angle of the material when the punch force is removed during the forming of sheet metal materials. Springback measurements were performed using a universal protractor and image processing techniques. According to the experimental data obtained, increasing the punch distance led to an increase in springback. While increasing the punch radius along the rolling direction did not significantly affect springback, increasing the punch radius in the transverse direction resulted in greater springback. The effect of punch speed on springback was found to be limited. Minimum springback was observed in bending processes performed with a 3 mm punch radius, a deformation speed of 10 mm/min, and in the rolling direction. This study demonstrates the impact of various parameters on springback during the bending process.

Alıntı / Cite

Kılıç, S., Demirdöğen, M. F., (2025). AA5754 Alaşımının Üç nokta Eğme Testi ile Eğilme ve Geri Esneme Davranışının Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 144-154.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Süleyman Kılıç, 0000-0002-1681-9403
Mehmet Fatih Demirdöğen, 0000-0002-0545-3733

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.08.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.12.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili Yazar / Corresponding author: suleymankilic@ahievran.edu.tr, +90-386-280-3812

ANALYSIS OF BENDING AND SPRINGBACK BEHAVIOUR OF AA5754 ALLOY USING THE THREE-POINT BENDING TEST

Suleyman KILIC^{1†}, Mehmet Fatih DEMIRDOGEN²

¹ Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kırşehir, Türkiye

² Petlas Tire Industry and Trade Inc., Kırşehir, Türkiye

Highlights

- Investigation of springback in AA5754 alloy using three-point bending tests.
- Effect of punch radius, deformation speed, punch distances, and rolling direction on springback analyzed.
- Results indicate increased punch radius in the transverse direction leads to higher springback.
- Punch speed found to have a limited effect on springback behavior.

Graphical Abstract

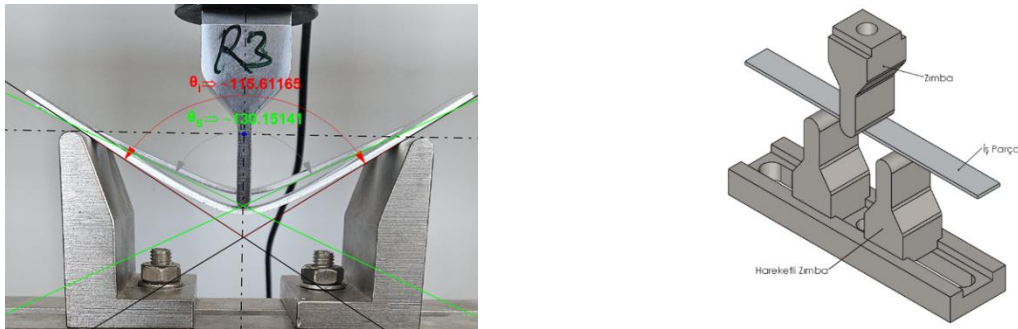


Figure a) Springback Measurement Using Image Processing Techniques, b) Schematic Three-Point Bending Test Setup

Purpose and Scope

The purpose of this paper is to investigate the bending behavior and springback characteristics of the AA5754-H111 aluminum alloy using the three-point bending test. The research aims to understand the influence of various parameters, including punch radius, deformation speed, and rolling direction, on springback, which is a critical factor in manufacturing engineering.

Design/methodology/approach

The objectives were achieved through a series of three-point bending experiments, utilizing different punch radii (3, 5, 7 mm), deformation speeds (2, 5, 10 mm/min), punch distances (30, 40, 50 mm), and orientations (rolling direction and transverse direction). The study employed a combination of experimental methods, including universal protractors and image processing techniques, to accurately measure springback. The theoretical scope includes the mechanical properties and deformation behaviors of aluminum alloys in forming processes.

Findings

The study found that increasing the punch radius along the transverse direction led to a significant increase in springback, while variations along the rolling direction had minimal impact. Additionally, the effect of punch speed on springback was found to be limited. These results highlight the importance of considering anisotropy in material behavior, as the rolling direction influences the mechanical response significantly.

Originality

The originality of this paper lies in its detailed examination of the effects of punch radius, deformation speed, punch distances, and rolling direction on springback in AA5754-H111 alloy. The research provides new insights into the material's anisotropic behavior during bending processes, offering valuable knowledge for both academic research and practical applications in manufacturing engineering.

[†] Corresponding author: suleymankilic@ahievran.edu.tr, +90-386-280-3812

1. Giriş (Introduction)

Alüminyum alaşımları, hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, mükemmel korozyon dirençleri ve kaynaklanabilirliği sayesinde otomotiv, havacılık ve inşaat gibi pek çok endüstriyel alanda tercih edilmektedir (Paik vd., 2005; Yuri vd., 2001; Zhou vd., 2021; Georgantzia vd., 2021). Özellikle, AA5754-H111 alaşımı, iyi işlenebilirlik özellikleri ve orta seviye mukavemeti ile öne çıkmaktadır (Kamal vd., 2023). Bu alaşım, genellikle yapısal bileşenlerde ve şekillendirilmiş parçalarda kullanılmaktadır (Macwan vd., 2017). Dolayısıyla malzemenin mekanik davranışlarının detaylı bir şekilde anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

Eğme işlemleri, metal şekillendirme endüstrisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Hosford ve Caddell, 2011; Boljanovic, 2004; Altan ve Tekkaya, 2012). Aynı zamanda, malzemenin mekanik özelliklerini incelemek içinde pratik bir yöntemdir (Geiger vd., 1991; Kilic, 2019; Kilic ve Ozturk, 2017). Özellikle üç nokta eğme testi, malzemenin esneklik ve plastik deformasyon limitlerini anlamak için tercih edilen bir yöntemdir. Bu test yöntemi, kompozit malzemelerin eğilme davranışlarını incelemek (Seyed Jafari vd., 2021; Kazemi vd., 2022; Kümmel vd., 2018; Xia vd., 2022), kaynakların verimliliğini değerlendirmek (Sudhakar ve Srinivas, 2021; Moni, 2020) ve katmanlı imalat ile üretilen parçaların dayanıklılığını ölçmek (Monkova vd., 2023) amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, malzemenin yük altında nasıl davrandığını (Václavík vd., 2024), çatlakların nasıl yayıldığını (Ren vd., 2023; Jeong vd., 2024), yapışkan mukavemetini belirleme ve yüzey hasarları (Birro vd., 2021), sandviç kompozitlerin dayanımı ve incelenmesi (Harizi vd., 2021; Beigpour vd., 2021) gibi işlemlerde önemli bilgiler sağlamaktadır. Koçar ve arkadaşları (Koçar vd., 2023), malzeme bilimi alanında önemli bir test olan üç nokta eğme testi için bir yer değiştirme modelinin doğrulamasını incelemişlerdir. İnceledikleri modelin deneysel sonuçlarla yüksek uyum gösterdiğini söylemişlerdir. Modelin kırılma sürecini ve çatlak ilerlemesini doğru bir şekilde tahmin ettiği ve kırılma sonrası malzeme davranışının anlaşılmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır. Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2023), farklı hızlarda üç nokta eğme testleri ile malzemenin kırılma davranışını incelemişlerdir. Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2023), yaptıkları başka bir çalışmada 30°C ile 150°C arasındaki sıcaklıklarda ve 1.5, 3 ve 5 mm/dak yükleme hızlarında üç nokta eğme deneyi ile kırılma davranışını incelemişlerdir.

Chen ve arkadaşları (Chen vd., 2023), yüksek yükleme hızlarında dinamik üç nokta eğme testlerinin teorisini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri teoriyi, Hopkinson bar testi ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemi ile doğrulamışlardır. Bu doğrulama sürecinde, malzemede oluşan normal ve kayma gerilmeleri ölçülerek teorik modellerle karşılaştırılmıştır. Yu ve arkadaşları (Yu vd., 2018), üç farklı tane boyutuna sahip granit malzemenin üç nokta eğme testi kullanılarak çekme dayanımı ve kırılma tokluğunun hesaplanmasını amaçlamışlardır. Daha küçük tane boyutuna sahip granit numunelerin daha yüksek çekme dayanımı ve kırılma tokluğu sergilediği vurgulanmıştır. Önerdikleri yöntemin mühendislik uygulamalarında granit ve benzeri malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir. Jindra ve arkadaşları (Jindra vd., 2021), AISI 304 paslanmaz çeliğinde üç nokta eğme testiyle ortaya çıkan davranışları deneysel ve sayısal simülasyonlarla incelemişlerdir. Çalışmalarında iki farklı AISI304 paslanmaz çelik kiriş kullanmışlardır. Bu iki kiriş, aynı malzeme sınıfında (EN 1.4301 / AISI 304) olmasına rağmen farklı partilerden almışlardır. Metal malzemelerin üretimi genellikle farklı üretim hatlarında gerçekleştirilmekte ve bu üretim grupları parti veya sevkiyat olarak tanımlanmaktadır. Her bir parti, belirli bir üretim dönemi boyunca üretilen malzemeleri içermekte ve kalite kontrol süreçlerinde izlenebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmayla malzeme özelliklerinin partiden partiye değişebileceğini göstermişlerdir. Plastik davranışın başlaması açısından küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Dindar (Berkant, 2021), 5754-H111 alaşımı plaka malzemesi olan V-kesikli alüminyumun nanokompozit yama ile onarılan malzemelerin dayanımını üç noktalı eğme yöntemiyle incelemiştir.

Eğme işlemi sonucu meydana gelen geri esnemenin incelenmesinde de bu yöntem pratik olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, zımba mesafesi, zımba yarıçapı, deformasyon hızı ve hadde yönü gibi faktörlerin malzemenin geri esneme davranışını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir (Sarkar vd., 2001; Liu vd., 2017; Sert vd., 2017; Mohammadtabar vd., 2021; Toros vd., 2011). Bu faktörlerin her birinin malzemenin eğme sonrası davranışları üzerindeki etkisini belirlemek, daha doğru ve verimli imalat süreçlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Inamdar ve arkadaşları (Inamdar vd., 2002), beş farklı malzemede eğme işleminde geri esneme etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışmalarında, farklı eğme açıları, farklı kalıp açıklığı ve sac kalınlığını parametre olarak kullanmışlardır. Eğilme açısı arttıkça geri esnemede de bir artış olduğu ayrıca kalıp açıklığı arttıkça geri esnemenin azaldığını göstermişlerdir. İncelenen tüm malzemelerde geri esnemenin, kalıp açıklığı/sac kalınlığı oranına ve eğme açısına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. AA5754 alaşımında geri esneme miktarının incelenmesi ve modellenmesi üzerine yapılan bir çalışmada (Tiryakioğlu, 2013), eğme açısı, malzeme kalınlığı, uç yarıçapı gibi parametrelerin geri esneme davranışında önemli ölçüde etkili olduğu gösterilmiştir. Wang ve arkadaşları (Wang vd., 2020), AA5754 alaşımında sıcak şekillendirme koşullarındaki geri esneme davranışını tahmin etmek için hem analitik hem de ampirik modeller geliştirmişlerdir. Geliştirilen modellerin %5 hata oranı ile tahmin yapabildiği söylenmiştir. Laurent ve arkadaşları (Laurent vd., 2010), AA5754 alaşımında geri esneme davranışını ayrılmış halka deneyi ve sayısal simülasyonlar kullanarak incelemişlerdir. Ayrık halka deneyi, derin çekilmiş bir bardaktan

kesilen halka şeklindeki bir numune, radyal bir düzlem boyunca bölünerek incelenir. Bu deney, malzemenin çekme, eğme ve diğer mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Abaqus yazılımı ile yapılan sayısal simülasyonlarla modellenmişler ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Sargeant ve arkadaşları (Sargeant vd., 2023), AA6016-T4 alaşımında bükme işlemi sonrası geri esneme davranışını incelemişlerdir. Numunelere farklı ön gerinimler uygulanarak bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İç yapıda meydana gelen dislokasyon yoğunluğunun geri esneme üzerinde önemli bir etken olduğu söylenmiştir. Ön gerininim artmasıyla geri esneme miktarının arttığı gösterilmiştir. Özellikle çift eksenli deformasyon uygulamasının geri esneme üzerinde daha büyük etkisi olduğu vurgulanmıştır. Sofuoğlu ve arkadaşları (Sofuoğlu vd., 2017), AA6082-T6 alüminyum tüplerin üç nokta eğme deneyi ile geri esneme davranışını incelemişlerdir. Ls-Dyna yazılımı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasını yapmışlar, aradaki farkı 0,09° olarak elde etmişlerdir. Hareket mesafesi arttıkça geri esneme açısının arttığı vurgulanmıştır. Liu ve arkadaşları (Liu vd., 2018), iki alüminyum alaşımında geri esneme davranışını incelemişlerdir. Geri esneme davranışını haddelme yönüne 0°, 45° ve 90° açılarda incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı bükme açıları (60°, 90°, 120°) ve zımba hızlarını (004, 0.4, 4 mm/s) araştırmışlardır. Bükme açısı arttıkça geri esneme açısının azaldığı, daha kalın malzemenin daha az geri esmediği, zımba hızının ise geri esneme üzerindeki etkisinin minimum olduğu gösterilmiştir. Zhang ve arkadaşları (Zhang vd., 2018), Q235 karbon çeliğinin geri esneme sürecini incelemişlerdir. Farklı adım uzunlukları (15 mm, 30 mm, 60 mm) kullanılarak yaptıkları bükme deneylerinde, maksimum yükleme kuvveti ve zımba derinliği aynı olduğu sürece adım uzunluğunun geri esneme üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, ancak zımba derinliği arttıkça geri esneme miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Zımba pozisyonunun iki destek noktası arasındaki mesafeyi (L) etkilediğini, L büyüdükçe yükleme kuvvetinin arttığını vurgulamışlardır. Zımba pozisyonu destek noktalarına yaklaştıkça geri esneme miktarının azaldığını göstermişlerdir. Bu durumun da daha büyük L ile plastik deformasyon bölgesinin artmasıyla ve elastik deformasyonun azalmasıyla açıklanmışlardır. Zang ve arkadaşları (Zang vd., 2014), üç nokta eğme testi ile ön gerininim uygulanmış numunelerde Bauschinger etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında DP780 çeliğini kullanmışlar ve sonlu elemanlar simülasyonları ile doğrulamışlardır. Ön gerininim uygulanmasının geri esneme üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Özellikle otomotiv endüstrisinde, yüksek bükme kalitesinin bir ürünün toplam maliyetini düşürmekte önemli bir faktör olduğu ifade edilmektedir (Chatti vd., 2004). Bükülme esnasında Elastisite (Young) modül değişmektedir. Elastisite modül değişimi de geri esneme üzerinde etkili bir parametredir. Bu nedenle elastik modülün değişimini dikkate alan simülasyonların, daha doğru geri esneme tahminleri sağladığı bilinmektedir (Chang vd., 2021). Zeng ve arkadaşları (Zeng vd., 2014), yeni bir üç nokta eğme testi yöntemi ile malzemelerin Elastisite modülünü belirlemeyi amaçlamışlardır. Yapılan deneylerde AA2024 alaşımını kullanmışlardır. Bu yeni yöntem ile ölçülen Elastisite modülü, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hata oranı %2,3 bulunmuştur. Daha yüksek sürtünme katsayısında daha yüksek Elastisite modülü değerleri elde etmişlerdir. Yoshihara ve Tsunematsu (Yoshihara ve Tsunematsu, 2006), üç nokta eğme testi kullanarak ahşap malzemelerin Elastisite modülünü ölçmek için tahmin yöntemlerinin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Elastisite modülünü ölçmek için iki nokta yer değiştirme ölçümlerinin ve yük-gerilme ilişkisi kullanmanın etkili yöntemler olduğu, gerininim ölçer (strain gauge) kullanımının Elastisite modülünün ölçülmesinde standart bir yöntem olarak uygulanmasını önermişlerdir.

Bu çalışma, AA5754-H111 alaşımının üç nokta eğme testi ile değişken zımba mesafesi, zımba yarıçapı, zımba hızı ve hadde yönlerinde nasıl davrandığını araştırmaktadır. Çalışmanın amacı, bu değişkenlerin alaşımın geri esneme özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmek ve bu bilgiler ışığında, alaşımın endüstriyel uygulamalar için optimizasyonuna katkıda bulunmaktır. Bunun yanı sıra, çalışma, geri esneme ölçümlerinde görüntü işleme tekniklerinin kullanılması ve farklı parametre kombinasyonlarının etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesiyle literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu kapsamlı analiz çalışması, sac metal şekillendirme süreçlerinde geri esneme davranışını daha iyi anlamaya yönelik bilgiler sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

AA5754-H111, özellikle denizcilik ve otomotiv endüstrilerinde tercih edilen bir alüminyum-magnezyum alaşımıdır. Hafifliği, şekillendirilebilirliği ve korozyon direnci nedeniyle endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmezdir. Deneylerde 2,5 mm kalınlığında AA5754-H111 alaşımı kullanılmıştır. Numuneler, 1 m x 2 m boyutlarındaki sac levhalardan giyotin makas ile kesilmiş ve deneyler için uygun hale getirilmiştir. Deneyler, Shimadzu marka 100 kN kapasiteli çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testleri için özel olarak tasarlanmış eğme takımları kullanılmıştır. Deney parametreleri, cihazın kontrol paneli üzerinden hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Kimyasal Bileşim (Chemical Composition)

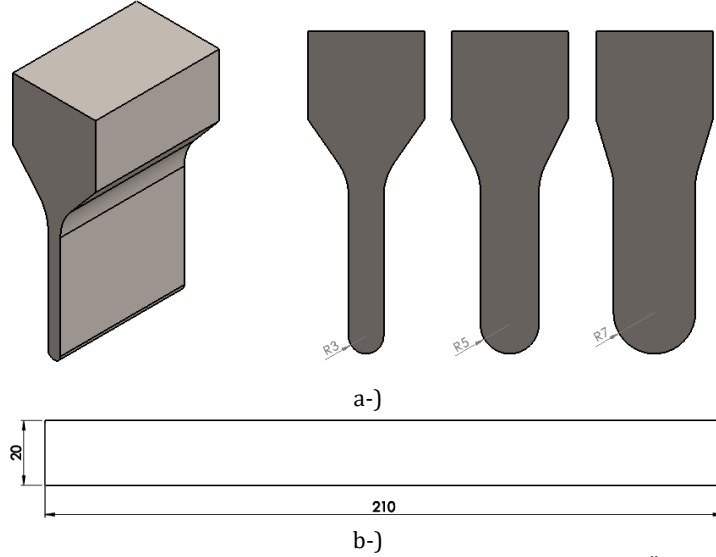
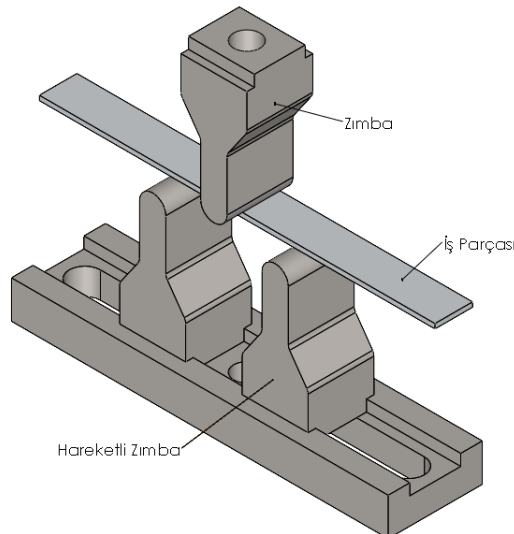
Malzeme	Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zn+Ti	Diğer	Al
AA5754	0,4	0,4	0,1	0,3	0,5	2,6-3,6	0,2	0,15	0,15	Kalan

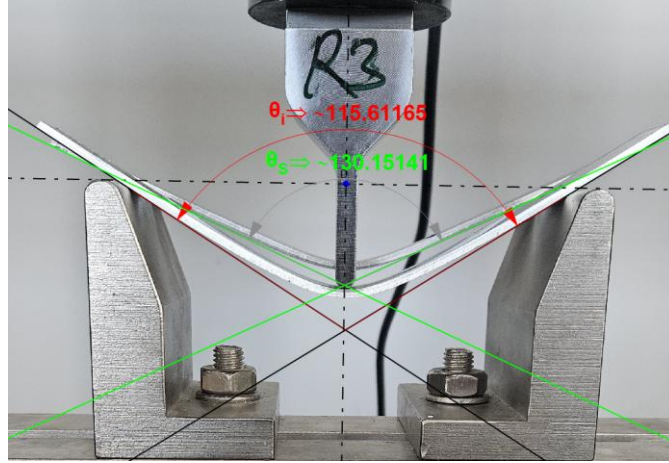
Bu çalışmada, farklı zımba yarıçapları (3, 5, 7 mm), zımba mesafeleri (10, 20, 30 mm) ve zımba hızları (2, 5, 10 mm/dak) kullanılarak gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri üzerinden malzemenin eğilme ve geri esneme davranışı analiz edilmiştir. Özellikle hadde yönünün (0° ve 90°) etkisi üzerinde durulmuştur. Bu parametre, malzemenin şekillendirme işlemi sırasındaki tepkisini belirlemede kritik bir faktördür. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Deneylerde Kullanılan Zımba Yarıçapı, Deformasyon Hızı ve Zımba Mesafesi (Punch Radius, Deformation Speed, and Punch Distances Used in The Experiments)

Zımba Yarıçapı (mm)	Deformasyon Hızı (mm/dak)	Zımba Mesafesi (mm)	Hadde Yönü
3	2, 5, 10	10, 20, 30	$0-90^\circ$
5	2, 5, 10	10, 20, 30	$0-90^\circ$
7	2, 5, 10	10, 20, 30	$0-90^\circ$

Deneysel çalışma, Şekil 1.'de şematik olarak gösterilen farklı yarıçaplara sahip eğme takımları ve numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Şekil 2'de şematik olarak gösterilen üç nokta eğme düzeneği yardımıyla eğilmiştir. Geri esneme değerleri deneysel olarak elde edilmiş, deneyler üçer kez tekrarlanmıştır. Evrensel açı ölçer ve Şekil 3.'de örneği görülen görüntü işleme teknikleri (Kılıç ve Demirdöğen, 2024) yardımıyla geri esneme ölçümleri yapılmıştır.

**Şekil 1.** a-) Farklı Zımba Yarıçapları (Different Punch Radii), b-) Numune Ölçüleri (Sample Dimensions)**Şekil 2.** Şematik Üç Nokta Eğme Testi Düzeneği (Schematic Three-Point Bending Test Setup)



Şekil 3. Görüntü İşleme Teknikleri ile Geri Esneme Ölçümü (Springback Measurement Using Image Processing Techniques)

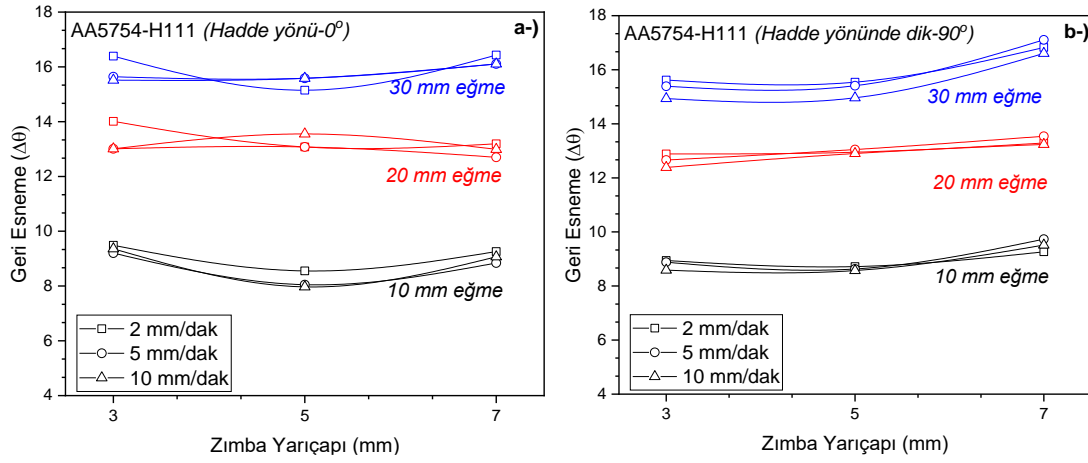
AA5754-H111 alaşımı için literatürde elde edilen mekanik özellikler Tablo 3'te sunulmuştur (Taktak vd., 2017). Bu veriler, hadde yönü boyunca (0°) ve hadde yönüne dik (90°) doğrultulardaki mekanik davranışı temsil etmektedir.

Tablo 3. AA5754-H111 Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of AA5754-H111) (Taktak vd., 2017).

Mekanik Özellik	0° (Hadde Yönü-RD)	90° (Hadde Yönüne Dik-TD)
Akma Mukavemeti (MPa)	100	99
Çekme Mukavemeti (MPa)	270	265
Uzama (%)	15,28	14,89

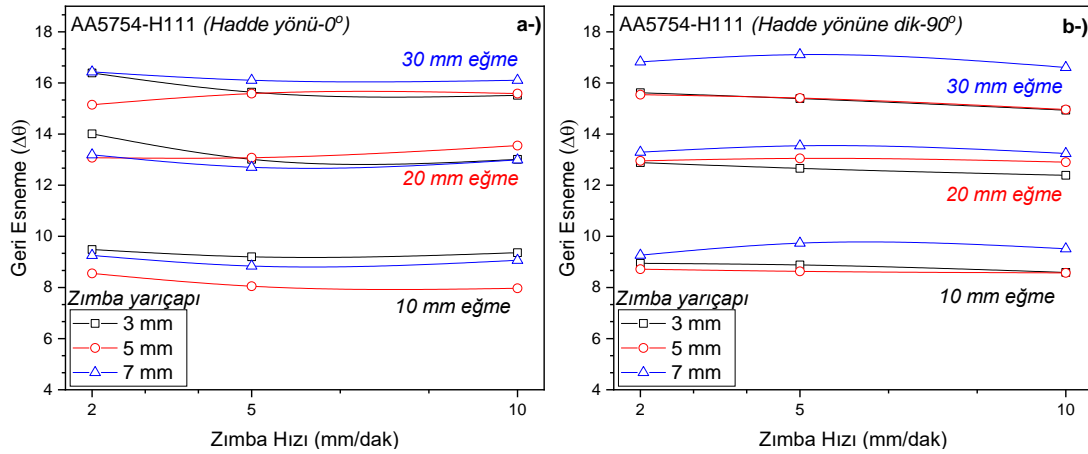
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, sac metal şekillendirme süreçlerinde geri esnemenin tahmin edilmesine yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 4, zımba yarıçapı ve eğme miktarının geri esneme üzerindeki etkilerini görsel olarak sergilemektedir. Hadde yönünde, zımba yarıçapının artırılması geri esneme üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmazken, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapının artışı geri esneme miktarını artırmıştır. Örneğin, 10 mm eğme miktarında, 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı $8,9^\circ$, 7 mm zımba yarıçapında ise $9,2^\circ$ olarak ölçülmüştür. Bu durum, yaklaşık %3,6'lık bir artışı göstermektedir. 20 mm eğme miktarında, 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı $12,3^\circ$, 7 mm zımba yarıçapında ise $13,2^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda geri esneme açısında yaklaşık %7,3'lük bir artış gözlenmiştir. 30 mm eğme miktarında, 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı $15,6^\circ$, 7 mm zımba yarıçapında ise $16,8^\circ$ 'ye yükselmiştir. Bu durum, geri esneme miktarında yaklaşık %7,7'lik bir artış olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapının artırılmasının geri esneme miktarını önemli ölçüde artırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, eğme miktarının artışıyla birlikte geri esneme açısında gözle görülür bir yükselme meydana gelmiştir. Bu durum, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapı etkisinin daha belirgin hale gelmesiyle birlikte, malzemenin geometrik ve elastik şekil değişim davranışında farklılık oluştuğunu göstermektedir. Mekanik özelliklerde (çekme ve akma mukavemeti) küçük farklar bulunmakla birlikte, bu farklar elastik geri dönüş (geri esneme) üzerinde hafif bir etki yaratmış olabilir. Bu bulgular, literatürdeki önceki çalışmalarla da desteklenmektedir (Li vd., 2024; Gao vd., 2023; Zhao vd., 2023; Goel vd., 2023; Trzepieciński ve Lemu, 2020; Li vd., 2021).



Şekil 4. AA5754 Alaşımında Deformasyon Hızı ve Eğme Miktarının Geri Esnemeye Etkisi, a-) Hadde Yönü, b-) Hadde Yönüne Dik (The Effect of Deformation Speed and Bending Amount on Springback in AA5754 Alloy: a) Rolling Direction, b) Transverse Direction)

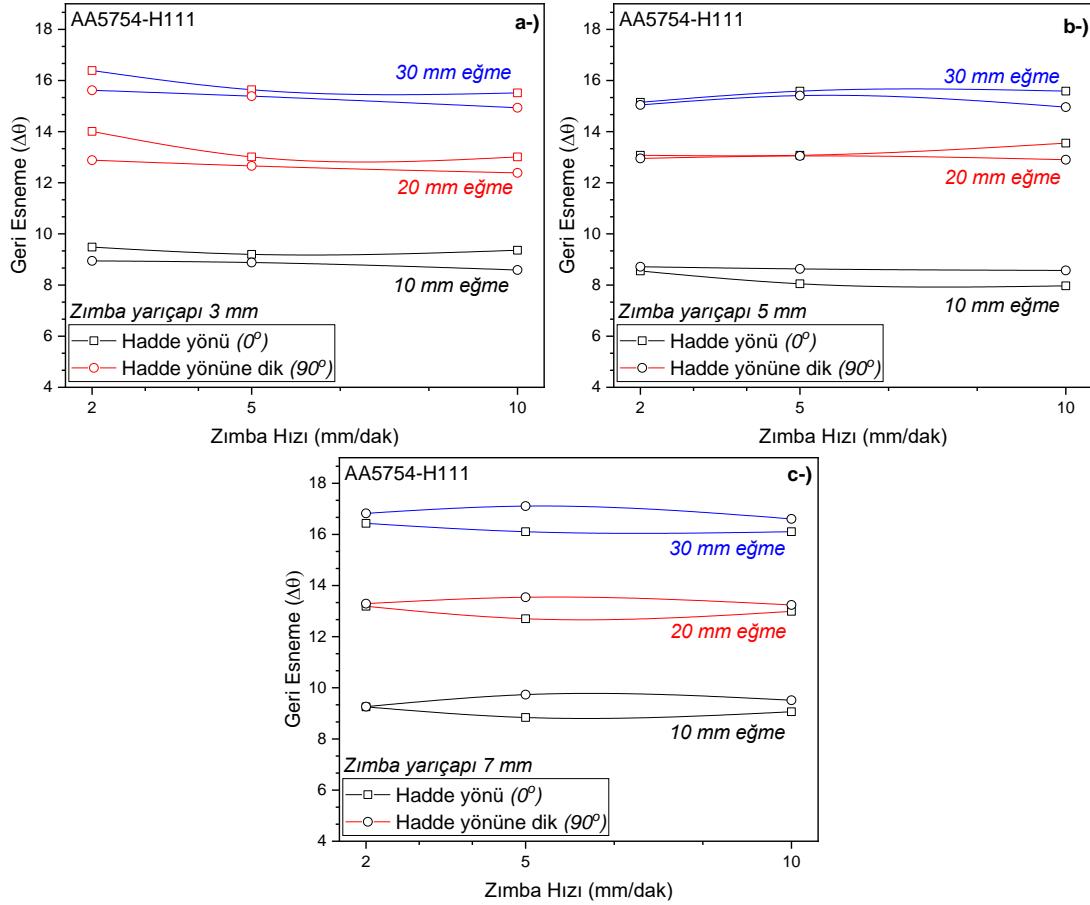
Bu çalışmada kullanılan 2, 5 ve 10 mm/dak zımba hızları, kontrollü laboratuvar koşullarında geri esneme davranışını incelemek için belirlenmiş düşük hızlardır. Endüstriyel uygulamalarda daha yüksek hızlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada düşük hızların geri esneme üzerindeki etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Şekil 5, zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisini göstermektedir. Düşük zımba hızlarında, geri esneme değerlerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Hadde yönünde (Şekil 5a), zımba hızının artışıyla geri esneme değerleri neredeyse sabit kalmaktadır. Hadde yönüne dik numunelerde (Şekil 5b) ise zımba hızının artırılmasıyla geri esneme değerlerinde hafif bir azalış eğilimi gözlenmiştir. Ancak bu değişim sınırlı düzeyde olup ve büyük bir etki yaratmamaktadır. Bu durum, zımba hızının plastik deformasyon bölgesine olan katkısının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde, zımba hızının geri esneme üzerinde genellikle küçük bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Bruni vd., 2006; Nagasaka vd., 2023). Ancak, bazı çalışmalar zımba hızının, malzemenin türüne ve işlem koşullarına bağlı olarak geri esneme üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini ortaya koymaktadır (Almeida vd., 2023). Örneğin, SPCC çeliğinde zımba hızı arttıkça geri esneme miktarı azalırken, DP780 çeliğinde ise zımba hızı arttıkça geri esneme miktarı artmaktadır (Choi ve Huh, 2014). Bu sonuçlar, zımba hızının geri esneme üzerinde önemli ve malzemenin özelliklerine göre değişken bir etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. AA5754 Alaşımında Zımba Yarıçapı ve Eğme Miktarının Geri Esnemeye Etkisi, a-) Hadde Yönü, b-) Hadde Yönüne Dik Numune (The Effect of Punch Radius and Bending Amount on Springback in AA5754 Alloy: a) Rolling Direction, b) Transverse Direction)

Şekil 6, eğme işlemi farklı zımba yarıçaplarının geri esnemeye etkisini göstermektedir. Eğme işlemi kullanılan zımba yarıçapı ve hadde yönü, malzemenin geri esneme özelliklerini belirleyen önemli faktörler arasındadır. Yapılan deneylerde, 3 mm zımba yarıçapı kullanılan numuneler, hadde yönünde daha fazla geri esneme göstermiştir. Bu durum, belirli bir zımba yarıçapında malzemenin hadde yönündeki deformasyonunun daha fazla esneme eğilimine neden olduğunu işaret etmektedir. Diğer yandan, 5 mm zımba yarıçapında genel bir eğilim gözlemlenmezken, 7 mm yarıçapında hadde yönünde daha az geri esneme değerleri elde edilmiştir. Bu gözlemler, eğme işlemi kullanılan zımba yarıçapının ve hadde yönünün, malzemenin geri esneme özelliklerini kritik şekilde etkilediğini vurgulamaktadır. Daha küçük zımba yarıçapları ve belirli bir hadde yönü, malzemenin

daha fazla esnemesine neden olurken, farklı zımba yarıçapları ve yönlendirmeleri, geri esneme davranışında çeşitlilik yaratabilmektedir. Kristal yapıdaki yönlendirilme, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyerek farklı davranışlar ortaya çıkarır. Bu durum, eğme işlemlerinde geri esneme özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Malzemenin hadde yönüne göre değişen kristal yapısı, farklı yönlerde farklı mekanik özelliklere neden olmakta ve özellikle geri esneme özelliklerinde belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda, eğme işlemlerinde hadde yönünün dikkate alınması, tasarım sürecinde mekanik özelliklerin doğru anlaşılmasını sağlamak ve istenen şeklin elde edilmesine yardımcı olmak açısından kritik öneme sahiptir. Literatür yapılan çalışmalarda da haddeleme yönünün geri esnemeyi etkilediği gösterilmiştir (Trzepieciński ve Lemu, 2020).



Şekil 6. AA5754 Alaşımında Hadde Yönünün Geri Esnemeye Etkisi, a-) 3 mm Zımba Yarıçapı, b-) 5 mm Zımba Yarıçapı c-) 7 mm Zımba Yarıçapı (The Effect of Rolling Direction on Springback in AA5754 Alloy: a) 3 mm Punch Radius, b) 5 mm Punch Radius c) 7 mm Punch Radius)

Literatürdeki birçok çalışma, zımba yarıçapının artırılması geri esneme miktarını artırmaktadır (Vorkov vd., 2017; Suyuti vd., 2019; Özdemir, 2020; Dessie ve Lukacs, 2023). Bu çalışmada, AA5754 alaşımında, hadde yönünde zımba yarıçapının artırılmasının geri esnemeyi belirgin bir şekilde etkilemediği gözlemlenmiştir. Ancak, hadde yönüne dik numunelerde zımba yarıçapının artması, geri esnemenin artmasına neden olmuştur. Anizotropi, eğme sırasında malzemenin akış davranışını ve sünekliğini etkileyen önemli bir faktördür ve geri esneme üzerinde etkilidir (Setiawan vd., 2023; Hajiahmadi vd., 2023). Bu çalışma, hadde yönünün ve zımba yarıçapının, malzemenin mekanik davranışları üzerindeki etkisini vurgulamaktadır ve malzemenin anizotropik özelliklerinin bu etkileşimde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, farklı deney parametreleri kullanılarak geri esnemenin etkileyen faktörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bulgular şu şekildedir:

- Eğme Miktarının Etkisi: Eğme miktarının artması, toplam birim şekil değiştirme değerini artırarak geri esneme miktarında önemli bir artışa neden olmuştur. Örneğin, 2 mm/dak deformasyon hızı ve 3 mm zımba yarıçapında yapılan testlerde, 10 mm bükme miktarında geri esneme açısı $9,4^\circ$, 30 mm bükme miktarında ise $16,4^\circ$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, eğme miktarının artışıyla birlikte geri esneme miktarının gözle görülür şekilde arttığını açıkça ortaya koymaktadır.

- Anizotropi: Hadde yönü (0°) ve hadde yönüne dik (90°) numuneler arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Hadde yönünde zımba yarıçapının artırılması geri esneme üzerinde sınırlı bir etkiye sahipken, hadde yönüne dik numunelerde geri esneme artışı daha belirgin hale gelmiştir. Örneğin, hadde yönünde, 30 mm bükme miktarında 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı 16,3°, 7 mm zımba yarıçapında ise 16,4° olarak ölçülmüş ve bu durum %0,61'lik bir artışı göstermiştir. Aynı koşullarda, hadde yönüne dik numunelerde 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı 15,6°, 7 mm zımba yarıçapında ise 16,8° olarak kaydedilmiştir. Bu durumda, hadde yönüne dik numunelerde geri esneme açısında yaklaşık %7,69'luk bir artış meydana gelmiştir.
- Zımba Yarıçapının Etkisi: Zımba yarıçapının artırılması, özellikle hadde yönüne dik numunelerde geri esneme miktarını artırmıştır. Örneğin, 10 mm bükme miktarında 3 mm zımba yarıçapında geri esneme açısı 8,9°, 7 mm zımba yarıçapında ise 9,2° olarak ölçülmüştür. Bu durum, yaklaşık %3,6'lık bir artışa işaret etmektedir. Zımba yarıçapının artırılmasıyla malzeme üzerinde daha düşük gerilme yoğunluğu oluşmakta ve bu durum malzemenin elastik geri dönüş davranışını değiştirmektedir.
- Zımba Hızının Etkisi: Zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır. Örneğin, hadde yönündeki numunelerde, 2 mm/dak hızda geri esneme açısı 9,4°, 10 mm/dak hızda ise 9,3° olarak belirlenmiştir. Artış oranı oldukça düşük olup, bu sonuçlar zımba hızının geri esneme üzerindeki etkisinin diğer parametrelere kıyasla daha sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. (No conflict of interest was declared by the authors.)

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: MMF.A4.23.008 (This work was supported by Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: MMF.A4.23.008)

Kaynaklar (References)

- Almeida, C. O. L., Santos, O. J. P. d., Panziera, R. C., Dutra, M. K., Pereira, M. and Pereira, M. d. S. 2023. Analysis of the springback effect of laser welded DP600 high-strength steel thin sheets, *Journal of Laser Applications*, 35 (4), 042045.
- Altan, T. and Tekkaya, A. E. 2012. Sheet metal forming: processes and applications, ASM international.
- Beigpour, R., Shokrollahi, H. and Khalili, S. M. R. 2021. Experimental and numerical analysis of a biodegradable hybrid composite under tensile and three-point bending tests, *Composite Structures*, 273 (0), 114255.
- Berkant, D. 2021. Three-point bending properties of V-notched aluminum repaired with a nanocomposite patch, *Emerging Materials Research*, 10 (3), 300-306.
- Birro, T. V., Aufray, M., Paroissien, E. and Lachaud, F. 2021. Assessment of interface failure behaviour for brittle adhesive using the three-point bending test, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 110 (0), 102891.
- Boljanovic, V. 2004. Sheet metal forming processes and die design, Industrial Press Inc.
- Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F. and Simoncini, M. 2006. Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (1-3), 373-376.
- Chang, Y., Wang, N., Wang, B. T., Li, X. D., Wang, C. Y., Zhao, K. M. and Dong, H. 2021. Prediction of bending springback of the medium-Mn steel considering elastic modulus attenuation, *Journal of Manufacturing Processes*, 67 (0), 345-355.
- Chatti, S., Dirksen, U. and Kleiner, M. 2004. Optimization of the design and manufacturing process of bent profiles, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 15 (6), 437-444.
- Chen, T., Jiang, Q., Xue, J., Harvey, C. M., Zhang, X., Silberschmidt, V. V., Liu, Y., Zhang, K., Wang, S. and Wei, B. 2023. Dynamic three-point bending tests under high loading rates, *Thin-Walled Structures*, 188 (0), 110836.
- Choi, M. K. and Huh, H. 2014. Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets, *Procedia Engineering*, 81 963-968.
- Dessie, J. E. and Lukacs, Z. 2023. Determination of influential springback parameters in U-bending test, *Pollack Periodica*, 18 (2), 17-22.
- Gao, S., SUN, Y., LI, Q., YING, L., HAO, Z. and ZHANG, B. 2023. Multi-point 3D Hot Stretch-Bending Process of Titanium Alloy Profiles and Their Microstructure Evolution, *China Mechanical Engineering*, 34 (24), 2986.
- Geiger, M., Engel, U. and Vom Ende, A. 1991. Investigations on the sheet bending process with elastic tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 27 (1-3), 265-277.
- Georgantzia, E., Gkantou, M. and Kamaris, G. S. 2021. Aluminium alloys as structural material: A review of research, *Engineering Structures*, 227 (0), 111372.
- Goel, A., Vengatesh, T. P., Jerald, J. and Satheeshkumar, V. 2023. Influence of spot welding in adhesive bonded steel sheets on formability and springback, *Materials Today: Proceedings*, 90 (1), 156-163.

- Hajiahmadi, S., Naeini, H. M., Talebi-Ghadikolaee, H., Safdarian, R. and Zeinolabedin-Beygi, A. 2023. Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129 (9), 3965-3978.
- Harizi, W., Anjoul, J., Acosta Santamaría, V. A., Aboura, Z. and Briand, V. 2021. Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests, *Composite Structures*, 262 (0), 113590.
- Hosford, W. F. and Caddell, R. M. 2011. *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge university press.
- Inamdar, M. V., Date, P. P. and Sabnis, S. V. 2002. On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending, *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (3), 459-463.
- Jeong, K., Jeong, Y., Lee, J., Chung, G., Kim, G.-h. and Yoon, J. 2024. Experimental correlation between bending crack evolution and load-drop criterion in tight-radius three-point bending test with GPa-grade steels, *International Journal of Solids and Structures*, 301 (0), 112949.
- Jindra, D., Kala, Z., Kala, J. and Seitzl, S. 2021. Experimental and Numerical simulation of a Three Point Bending Test of a Stainless Steel Beam, *Transportation Research Procedia*, 55 1114-1121.
- Kamal, A. H., Ghazaly, N., Abdellah, M. Y., Seleem, A.-E. H. A. and Abdel-Jaber, G. T. 2023. Influence Parameters on the Essential Work of Fracture of 5754-H111 Aluminum Alloy Plate: Comparative Study, *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 4 (2), 243-259.
- Kazemi, F., Hashemi, R. and Niknam, S. A. 2022. Formability and fractography of AA5754/polyethylene/AA5754 sandwich composites, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50 (4), 1253-1267.
- Kilic, S. 2019. Experimental and numerical investigation of the effect of different temperature and deformation speeds on mechanical properties and springback behaviour in Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Mechanics*, 25 (5), 406-412.
- Kilic, S. and Ozturk, F. 2017. Evaluation of Formability Under Different Deformation Modes for TWIP900 Steel, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 139 (3),
- Kılıç, S. and Demirdöğen, M. F. 2024. Görüntü işleme yöntemi ile geri esnemenin otomatik ölçümü: Deneysel bir yaklaşım, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13 (3), 785-791.
- Koçar, I., Sulovsky, T., Plovanić, M. and Božić, Ž. 2023. Verification of a displacement model for three-point bending test, *Procedia Structural Integrity*, 46 (0), 143-148.
- Kümmel, F., Diepold, B., Prakash, A., Höppel, H. W. and Göken, M. 2018. Enhanced monotonic and cyclic mechanical properties of ultrafine-grained laminated metal composites with strong and stiff interlayers, *International Journal of Fatigue*, 116 (0), 379-387.
- Laurent, H., Grèze, R., Oliveira, M. C., Menezes, L. F., Manach, P. Y. and Alves, J. L. 2010. Numerical study of springback using the split-ring test for an AA5754 aluminum alloy, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46 (9), 751-759.
- Li, G., He, Z., Ma, J., Yang, H. and Li, H. 2021. Springback Analysis for Warm Bending of Titanium Tube Based on Coupled Thermal-Mechanical Simulation, *Materials*, 14 (17), 5044.
- Li, X., Wang, R., Jiang, H., Zhang, K., Lou, S., Su, C. and Sun, J. 2024. Multipass roll forming of variable-curvature elliptical panels using the angular function based on UOSDM, *Thin-Walled Structures*, (0), 111759.
- Liu, Y., Ma, Z., Liu, X., Wang, Z., Zhang, Z. and Liu, X. 2023. Ductile-to-brittle transition behavior of Fe-6.5 wt%Si alloy with three-point bending testing, *Materials Characterization*, 200 (0), 112861.
- Liu, Y., Ma, Z., Liu, X. and Zhang, Z. 2023. Effect of grain size and grain boundary on ductile to brittle transition behavior of Fe-6.5wt.%Si alloy under miniaturized three-point bending tests, *Materials Letters*, 353 (0), 135288.
- Liu, Y., Wang, L., Zhu, B., Wang, Y. and Zhang, Y. 2018. Identification of two aluminum alloys and springback behaviors in cold bending, *Procedia Manufacturing*, 15 (0), 701-708.
- Liu, Z.-w., Li, L.-x., Jie, Y., Li, S.-k., Wang, Z.-h. and Guan, W. 2017. Influence of heat treatment conditions on bending characteristics of 6063 aluminum alloy sheets, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27 (7), 1498-1506.
- Macwan, A., Mirza, F., Bhole, S. and Chen, D. L. Year. Similar and dissimilar ultrasonic spot welding of 5754 aluminum alloy for automotive applications, *Materials Science Forum*, 561-568.
- Mohammadtabar, N., Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, H., Jamaati, R. and Szpunar, J. A. 2021. Effect of electric current pulse type on springback, microstructure, texture, and mechanical properties during V-bending of AA2024 aluminum alloy, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143 (1), 011004.
- Moni, V. 2020. Mechanical properties of friction stir welded 5083-h321 and 6082-t651 dissimilar aluminium alloys. Cape Peninsula University of Technology,
- Monkova, K., Monka, P. P., Žaludek, M., Beňo, P., Hricová, R. and Šmeringaiová, A. 2023. Experimental Study of the Bending Behaviour of the Neovius Porous Structure Made Additively from Aluminium Alloy, *Aerospace*, 10 (4), 361.
- Nagasaka, A., Hojo, T., Kobayashi, J. and Tabata, C. Year. Warm V-Bending and Hydrogen Embrittlement Properties of Ultrahigh-Strength TRIP-Aided Bainitic Ferrite Steel Sheets, *International Conference on the Technology of Plasticity*, 436-444.
- Özdemir, M. 2020. Optimization of spring back in air v bending processing using Taguchi and RSM method, *Mechanics*, 26 (1), 73-81.
- Paik, J. K., van der Veen, S., Duran, A. and Collette, M. 2005. Ultimate compressive strength design methods of aluminum welded stiffened panel structures for aerospace, marine and land-based applications: A benchmark study, *Thin-Walled Structures*, 43 (10), 1550-1566.
- Ren, H., Li, T., Ning, J. and Song, S. 2023. Bending damage and fractal characteristics of steel fiber-reinforced concrete under three-point bending test, *Construction and Building Materials*, 409 (0), 134053.
- Sargeant, D., Sarkar, M. Z., Sharma, R., Knezevic, M., Fullwood, D. T. and Miles, M. P. 2023. Effect of pre-strain on springback behavior after bending in AA 6016-T4: Experiments and crystal plasticity modeling, *International Journal of Solids and Structures*, 283 (0), 112485.
- Sarkar, J., Kutty, T., Conlon, K., Wilkinson, D., Embury, J. and Lloyd, D. 2001. Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 316 (1-2), 52-59.

- Sert, A., Gürgen, S., Çelik, O. N. and Kuşhan, M. C. 2017. Effect of heat treatment on the bending behavior of aluminum alloy tubes, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (0), 5273-5278.
- Setiawan, H., Nopriyanti, R. and Selvi Novita, S. Year. Analysis of the Effect of AISI 1005 Grain Structure and Cutting Angle on Springback Using the V-Bending Method, *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science* (567-572).
- Seyed Jafari, P., Hashemi, R., Kazemi, F. and Pourmorad Kaleybar, S. 2021. An experimental investigation of mechanical properties, forming limit curves, and bending behavior of aluminum-polymer sandwich composites, *Materials Research Express*, 8 (8), 086516.
- Sofuoğlu, M. A., Gürgen, S., Çakır, F. H. and Orak, S. 2017. Springback Behavior of AA6082T6 Tubes in Three-point Bending Operation, *Procedia Engineering*, 182 (0), 658-664.
- Sudhakar, U. and Srinivas, J. 2021. Chapter Three - Sustainable friction stir welding of metals. In: KUMAR, K., ZINDANI, D. & DAVIM, J. P. (eds.) *Sustainable Manufacturing and Design*. Woodhead Publishing.
- Suyuti, M. A., Iswar, M. and Nur, R. 2019. Effect of Punch Parameters on Springback for Mild Carbon Steel in A V-Shape Bending Process, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541 (1), 012015.
- Taktak, W., Taktak, R., Haddar, N. and Elleuch, R. 2017. Study of the influence of cold working on mechanical behavior and ductile fracture of 5754 aluminum alloy: experimental and numerical simulations, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 55 (3), 923-935.
- Tiryakioğlu, M. F. 2013. AA 2024 ve AL 5754 sac metal malzemelerde bükme esnasında oluşan geri esneme miktarının deneysel verilerle matematiksel olarak modellenmesi.
- Toros, S., Kilic, S. and Ozturk, F. 2011. The Effects of Material Thickness and Deformation Speed on Springback Behavior of DP600 Steel, *Advanced Materials Research*, 264 (0), 636-645.
- Trzepieciński, T. and Lemu, H. G. 2020. Improving Prediction of Springback in Sheet Metal Forming Using Multilayer Perceptron-Based Genetic Algorithm, *Materials*, 13 (14), 3129.
- Václavík, J., Dopierala, L. and Chvojan, J. 2024. Investigations of the Hybrid Beam Behavior during the Three-point Bending Test, *Procedia Structural Integrity*, 54 (0), 294-299.
- Vorkov, V., Aerens, R., Vandepitte, D. and Dufloy, J. R. 2017. Experimental investigation of large radius air bending, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92 (0), 3553-3569.
- Wang, A., Zhong, K., El Fakir, O., Sun, C., Liu, J. and Wang, L.-L. 2020. Springback Analysis of AA5754 under Warm Stamping Conditions, *Engineering Science & Technology*, 1 (1), 1-53.
- Xia, F., Durandet, Y., Tan, P. and Ruan, D. 2022. Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores, *Thin-Walled Structures*, 179 (0), 109723.
- Yoshihara, H. and Tsunematsu, S. 2006. Feasibility of estimation methods for measuring Young's modulus of wood by three-point bending test, *Materials and structures*, 39 (0), 29-36.
- Yu, M., Wei, C., Niu, L., Li, S. and Yu, Y. 2018. Calculation for tensile strength and fracture toughness of granite with three kinds of grain sizes using three-point-bending test, *PLOS ONE*, 13 (3), e0180880.
- Yuri, T., Ogata, T., Saito, M. and Hirayama, Y. 2001. Effect of welding structure on high-cycle and low-cycle fatigue properties for MIG welded A5083 aluminum alloys at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 41 (7), 475-483.
- Zang, S.-l., Lee, M.-G., Sun, L. and Kim, J. H. 2014. Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point bending springback test with pre-strained strips, *International Journal of Plasticity*, 59 (0), 84-107.
- Zeng, X., Wen, S., Li, M. and Xie, G. 2014. Estimating Young's Modulus of Materials by a New Three-Point Bending Method, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 (1), 189423.
- Zhang, F., Ruan, J., Zhang, J., He, K. and Du, R. 2018. Experimental study of springback behavior in incremental bending process, *Procedia Manufacturing*, 15 (0), 1290-1297.
- Zhao, D., Du, P. and Liu, J. 2023. Design on multi-station progressive die for automobile reinforcement plate, *Forging & Stamping Technology*, 48 (8), 219-223.
- Zhou, B., Liu, B. and Zhang, S. 2021. The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review, *Metals*, 11 (5), 718.



ÜÇ KANALLI ISI DEĞİŞTİRİCİDE HİBRİT NANOAKIŞKANIN CEBRİ TAŞINIMA ETKİSİ

Gülenay Alevay KILIÇ^{1*}, Imen MERIEM², Ziad SAGHIR³

¹ Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

² Brothers Mentouri Constantine Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, Constantine, Cezayir

³ Toronto Metropolitan Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, M5B 2K3, Toronto, Kanada

Anahtar Kelimeler

Hibrit Nanoakışkan,
Zorlanmış Isı Taşınımı,
Laminer Akış,
Titanyum Dioksit,
Silikon Dioksit.

Öz

Bilgisayar işlemcilerinin soğutulması, bilgisayarın stabil çalışması ve performansının korunması için önemlidir. Yüksek sıcaklıklar işlemcinin performansını düşürmekte ya da zarar vermektedir. Bu nedenle, hava soğutma sistemleri dışında sıvı soğutma sistemleri de kullanılmaktadır. Sıvı soğutma, ısıyı iletme için akışkan kullanarak genellikle daha etkili ve sessiz çalışmaktadır. Hibrit nano akışkanlar (HNA) ise bir sistemde mümkün olan ısı transferini artırmak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bilgisayar işlemcilerinden Intel i7 vb için kullanılan üç kanallı bir ısı değiştirici aracılığıyla HNA'nın zorlanmış akış temelli sistemdeki termal etkileri deneysel olarak incelenmiştir. HNA olarak %0.5 titanyum dioksit (TiO₂) + %0.5 silisyum dioksit (SiO₂) kullanılmıştır. Model için yapılan düzenek, laminer akışta ve sabit ısı akışı sağlanacak şekilde şartlandırılmıştır. Deneylerde HNA'nın, ısı emici üzerindeki termal etkileri beş farklı akış hızı için senaryolaştırılmıştır. Bununla beraber HNA'nın ve modelin termal yeterliliğini gözlemlemek için Nusselt sayısından yararlanılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda HNA hızı 150 mm/s iken ısı iletiminin %20 arttığı gözlemlenmiştir.

EFFECT OF HYBRID NANOFUID ON FORCED CONVECTION IN THREE-CHANNEL HEAT EXCHANGER

Keywords

Hybrid Nanofluid,
Forced Convection,
Laminar Flow,
Titanium Dioxide,
Silicon Dioxide.

Abstract

The cooling of computer processors is vital for maintaining stability and performance. High temperatures can degrade the processor's performance or even cause damage. Therefore, liquid cooling systems are used in addition to air cooling systems. Liquid cooling, which uses a fluid to transmit heat, is generally more effective and quieter. Hybrid nano fluids (HNF) are used to enhance heat transfer in a system. In this study, the thermal effects of HNF in a forced flow-based system were experimentally investigated using a three-channel heat exchanger for computer processors such as Intel i7. A mixture of 0.5% titanium dioxide (TiO₂) and 0.5% silicon dioxide (SiO₂) was used as HNF. The setup for the model was conditioned for laminar flow and provided a constant heat flux. In the experiments, scenarios were formulated to assess the thermal effects of HNF on the heat absorber for five different flow rates. Additionally, the Nusselt number was utilized to observe the thermal efficiency of both HNF and the model. As a result of the obtained data, it has been observed that thermal conduction increases by 20% when the HNA velocity is 150 mm/s.

Alıntı / Cite

Kılıç, G.A., Meriem, I., Saghir, Z., (2025). Hibrit Nanoakışkanın Cebri Taşınım Performansının Üç Kanallı Isı Değiştiricide İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 155-164.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G.A. Kılıç, 0000-0002-3513-8785
I. Meriem 0000-0003-4254-0120
Z. Saghir, 0000-0002-6199-0314

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.12.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: gulenay.kilic@yalova.edu.tr, +90-226-817-7459

EFFECT OF HYBRİD NANOFİUID ON FORCED CONVECTION İN THREE-CHANNEL HEAT EXCHANGER

Gulenay Alevay Kilic^{1†}, İmen Meriem², Ziad Saghir³

^{1*} Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

²Brothers Mentouri Constantine Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, Constantine, Cezayir

³Toronto Metropolitan Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, M5B 2K3, Toronto, Kanada

Highlights

- HNF (0.5% TiO₂ + 0.5% SiO₂) enhanced heat transfer by 23.10%.
- Thermal conductivity increased by 20% at 150 mm/s, with no significant gains beyond this velocity.
- High-conductivity, low-concentration materials are needed to minimize pressure drops; further research is required for different geometries.

Graphical Abstract

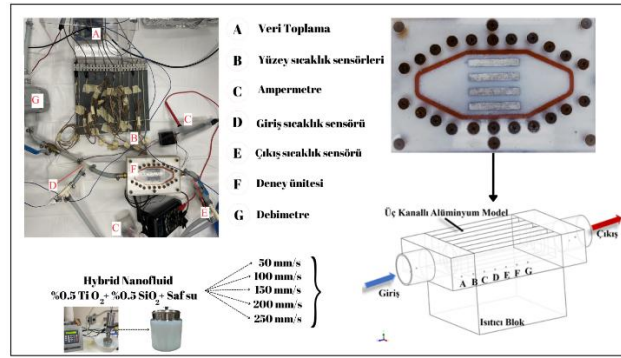


Figure. Experimental Procedure

Purpose and Scope

This study aimed to observe the contribution of a hybrid nano fluid (HNF) to heat transfer in a three-channel heat exchanger under laminar flow and forced convection conditions for liquid cooling applications of microchips.

Design/methodology/approach

TiO₂ and SiO₂ were identified as beneficial for microchip cooling. An experimental setup matching an Intel i7 processor's surface area was designed to analyze HNF performance in a three-channel heat exchanger under laminar flow and forced convection at different velocities.

Findings

Experiments showed that HNF (0.5% TiO₂ + 0.5% SiO₂) enhanced heat transfer by 23.10%. Thermal conductivity increased by 20% at 150 mm/s compared to 50 mm/s, while higher velocities (200–250 mm/s) had no significant effect.

Originality

In this study, a liquid-cooled microprocessor was designed, and the synthesis of TiO₂ and SiO₂ together, which has not been found in cooling applications in the literature, was carried out. The obtained data indicates a 20% advantage in heat transfer when the liquid coolant is at 150 mm/s, with a heat flux applied. However, it has been determined that higher flow rates of HNF are not necessary due to the lack of a significant increase in thermal effect at flow velocities exceeding 150 mm/s.

[†] Corresponding author: gulenay.kilic@yalova.edu.tr, +90-226-817-7459

1. Giriş (Introduction)

Hava soğutmalı ısı emiciler, çoğunlukla elektronik cihazların soğutulması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle ısınmış yüzeye; tek/çoklu kare, dikdörtgen veya dairesel modüller (çubuklar) gibi geniş yüzeyli ısı emiciler monte edilmektedir. Bunun dışında daha dar yüzeylerden oluşan soğutma amaçlı pasif ısı değiştiricileri de yerleştirilmektedir. Elektronik cihaz bileşenlerinden biri olan çiplerin ürettiği ısı, termal yayıcı ve termal ara yüz malzemesinden ısı emicisine ulaşarak burada cebri veya serbest konveksiyonla soğutulmaktadır.

Termal ara yüz son zamanlarda metal malzeme kullanılarak açık hücreli hafif gözenekli yapılardan üretilmektedir. Diğer bir deyişle bu metal köpük, elektronik soğutma gibi düşük sıcaklık uygulamalarından yüksek sıcaklık uygulamalarına kadar kullanılabilir. Aynı zamanda belirli bir gözeneklilik, geçirgenlik ve farklı homojen yoğunluk dağılımlarına sahiptir (Plant vd., 2020; Bayomy ve Saghir, 2017).

Nano akışkanlar, sıvının uygulanmasında karşılaşılan maliyet ve akış sisteminin genel verimliliği gibi birkaç dezavantajın yanında termal gelişme sağlayabilen bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak bu alandaki çalışmalar, performans optimizasyonu gibi belirli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Araştırmacılar nano akışkanların kullanımından kaynaklanan dezavantajları aşma ve performans artırma gibi sorunlarla mücadele etmektedir. Bunlar arasında, nano akışkan kullanımının yarattığı yüksek basınç düşüşü ve buna bağlı olarak artan pompalama gücü gibi sorunlar bulunmaktadır. Bu sorun genellikle saf sıvıya kıyasla artan bir akışkan viskozitesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, bu endişeler yüksek konsantrasyonlu nano akışkanlar kullanılarak giderilebilmektedir. Dolayısıyla artan parçacık konsantrasyonu termal gelişmeye doğru bir eğilim göstermektedir (Kimura ve Lipeles, 2006; Bumataria vd., 2019).

Geleneksel akışkanlar yerine Grafen oksit (GO) bazlı nanoakışkanlar, yüksek ısı iletkenlik özellikleri nedeniyle uygulama alanı bulmaktadırlar. Karabulut ve ark. (2020), grafen oksit (GO)-su nanoakışkanının laminar akış koşullarında ısı transferi performansını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, %0.02 GO konsantrasyonunda ısı iletkenlikte %9.85'lik bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, 1.5 l/dk debi ($Re=2023$) ve 2536.62 W/m^2 ısı akısı koşullarında, ısı taşınım katsayısında %13.9'luk bir artış elde etmişlerdir. Araştırmacılar, GO-su nanoakışkanının özellikle yüksek ısı akılarında ve belirli Reynolds sayılarında geleneksel çalışma akışkanlarına alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, nanoakışkanların pratik uygulamalarda kullanımı için uzun süreli kararlılıklarının artırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Uzun süreli kararlılık gösteren nanoakışkanlar arasında yer alan Al_2O_3 ise mikrokanallarda kullanılabilir. Shi vd. (2018) tarafından yürütülen bir çalışmada, sulu Al_2O_3 'ün laminar akış halinde mikrokanalda kullanılması durumunda basınç düşüşü ve konvektif ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarında, bakır bir mikrokanalda durağan koşullar altında sabit ısı akısı uygulanmıştır. %1 ve %2 Alüminyum içeren nano akışkan ile saf suyun ısı özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, saf suya kıyasla %1 Alüminyum ve %2 Alüminyum içeren nano akışkanların ısı etkilerinde sırasıyla %5.86 ve %8.49 oranında artış olduğunu göstermektedir.

Hibrit nano akışkanlar (HNA) ise çoğunlukla farklı bileşenlerden oluşan birden fazla nano boyutlu malzemenin bir akışkan içinde dağılmasıyla oluşur. Hibrit nano akışkanlar, farklı malzemelerin birleşik özelliklerinden yararlanmak için kullanılmaktadır. Örneğin, metal nanopartiküller ve polimerik nanopartiküllerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir hibrit nano akışkan hem metalin iletkenliği hem de polimerin mekanik dayanıklılığı gibi özellikleri içermektedir. Saba vd. (2018), asimetrik duvarlara sahip genişleyen bir kanalda hibrit alümina/bakır nano akışkanların etkisini inceleyen sayısal bir araştırma yapmışlardır. Modelin diferansiyel denklemlerini çıkarmak için Runge-Kutta-Fehlberg algoritmasını uygulamışlardır. Kanallı, silindirik ve levha yüzeyler modellenerek levha şeklinin daha yüksek ısı transferi sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla HNA performansını artırmak için başka bir olası faktörün farklı geometrik yüzeylere bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Isı transferi performansını artırmak için yenilikçi yüzey tasarımları ve nanoakışkanların kullanımı üzerine yapılan araştırmalar arasında, çarpaz akış ve çarpan jet akışının birlikte kullanıldığı sistemler bulunmaktadır. Karabulut (2023) tarafından farklı fin açıları ve uzunlukları kullanarak çarpaz akış-çarpan jet akışı kanallarında ısı transferi ve akış yapıları incelenmiştir. Küp ve dairesel oyuk bakır yüzeyler için su ve %2 hacimsel konsantrasyonlu CuO-su nanoakışkanı kullanarak, fin açıları ve mesafelerinin Nusselt sayısı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlarda uygun fin konfigürasyonları ve çarpan jet akışının kombinasyonu ile ısı transferinde önemli artışlar sağlanabileceği belirtilmiştir. Tijani ve Sudirman (2018), bir otomobil radyatörüne dayalı düz tüp kanat modelini kullanmışlar ve sıvı ortam için seçilen malzemenin sistemin olası performansında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Alüminyum ve bakır oksit nano akışkan içeren bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Nanopartiküllerin küresel olduğunu varsayarak, akışkanı sıkıştırılmaz olarak ele almışlardır. Nano akışkanda termodinamik değişiklikler olmadığını ve akışın türbülanslı olduğunu varsaymışlardır. Çalışmada Alüminyum nano akışkanın beklenen aksine daha düşük bir Nusselt sayısına ulaşmışlardır. Nusselt sayısı, temel akışkan olan

etilenglikolün 164.29 iken bakır oksit nano akışkanında 208.71 olarak bulunmuştur. Veriler bakır oksit nano akışkanın daha iyi bir ısı transfer performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak, hibrit nano akışkanların geliştirmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Lahari vd. (2018), konsantrasyona bağlı nano akışkan performansını ve bir hibrit çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit (TiO₂) performansını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Seramik elyaf ile kaplanmış çift borulu bir ısı değiştiriciyi boru boyunca eşit uygulanan bir ısı akısıyla birlikte incelemişlerdir. %2 TiO₂'nin saf suyun termal iletkenliğine göre %27.9'luk en iyi termal iletkenliği elde edebildiğini, %2 ZnO'nun ise %18.1 gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca %1.5 ZnO ve %1.5 TiO₂'nin hibrit karışımının, toplam termal iletkenlikte %40.9'luk bir artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Ahmadiouydarab vd. (2020), TiO₂ nano akışkan kullanarak düzlemsel güneş kolektörü (DLG) üzerinde çalışmışlardır. Düzenekleri, kızılötesi bir ışık kaynağına sahip bir laboratuvar ölçekli düzlemsel güneş kolektörünü içermektedir. Termal enerji emilimini artırmaya yardımcı olmak için nano akışkanı DGK içine yerleştirmişlerdir. Ayrıca nano akışkana termal enerji emilimini teşvik etmek için koyu renkli bir boya ekleyerek %5 TiO₂ kullanarak sistem veriminde %49'luk bir artış elde etmişlerdir.

Khan vd. (2020), otomobil radyatörlerinde kullanılmak üzere bir ZnO/su/etilen glikol nano akışkan karışımı üzerinde çalışmışlardır. %0,01 hacimden %0,04 kadar değişen konsantrasyonları inceleyerek 4 ila 12 l/dk arasında değişen akış hızlarının termal karakteri incelenmiştir. Ayrıca, TiO₂ ve demir oksit (Fe₂O₃) içeren HNA ve bunların termal sistem performansına etkisi araştırılmıştır. Veriler sonucunda ısı transferinde %36'lık artış ve pompa gücünde %1'lik artış sağlandığını ortaya konmuştur. Babar ve Ali (2019), %0.01 Fe₂O₃ ve %0.01 TiO₂'den oluşan HNA üzerine çalışmışlardır. Sistemlerine HNA eklemenin Nusselt sayısını, Fe₂O₃ nano akışkan için %15,89 ve TiO₂ nano akışkan için ise %14,5 artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Karabulut vd. (2018), grafen oksit (GO)-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi, üniform duvar ısı akı ile dairesel bir bakır boruda laminer akış koşullarında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Nanoakışkanların yalnızca bir araştırma alanı olmaktan çıkarak elektronik soğutma sistemleri, ısı değiştiriciler, güneş kolektörleri ve nükleer reaktörler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılabilmesi için öncelikle uzun süreli kararlılığının artırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, nanoparçacıkların sentezi ve nanoakışkan hazırlanması sırasında kullanılan kimyasal maddelerin, kararlılığı artırırken termofiziksel özelliklere zarar vermemesine özen gösterilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

HNA bünyesine mikrokapsüllü faz değişim malzemesinin (MFDM) dahil edilmesi, olası termal artış yöntemine etkisi de ayrıca araştırılmıştır. Ho vd. (2019), ani-pulsajlı ısı akısı koşullarına maruz kalan bir deneysel incelemede alüminyum-su içeren bir nano akışkanın karakterini incelemişlerdir. Çalışmada, dikdörtgen mikrokanallı yalıtımlı duvarlara sahip bir düzeneğin, nanopartiküllerle akışkan arasındaki ısı taşınımının katkısını araştırmışlardır. Nano akışkanın ısı transferinde hafif bir artışa neden olduğunu fakat nano akışkan kütle kesri artarsa ısı transferinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Bununla beraber sayısal modelleme için bir sonlu hacim yöntemi kullanılmıştır. MFDM tabakası ile model arasındaki etkileşimin beklenenden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Mikro pin finler, ısı transferi uygulamalarında kullanılan, geniş yüzey alanı sağlayan, ince metal çubuklardır. Finler, genellikle bir plaka veya boru üzerine monte edilen, ince ve uzun metal parçalarıdır. Mikro boyutlarda olması daha yoğun bir yüzey alanı ile daha etkili ısı transferi sağlamaktadır. Genellikle, ısı transferini artırmak için ısı emici veya ısı verici yüzeylerin üzerine monte edilirler. Ambreen vd. (2019), çalışmalarında bir mikro pin fin soğutucu için iki fazlı Eulerian-Lagrangian modelini uygulamışlardır. Modelde, sabit bir ısı akısı durumunda, %0.25 hacimden %1'e kadar değişen bir küresel partikül içeren bir HNA incelenmiştir. Sabit bir ısı akısı uygulanarak ısı değiştiricinin uzunluğu boyunca 3000 Pa'dan az olan basınç düşüşü izlenmiştir. Sonuçlar, %1 nano akışkan içeren HNA için basınç düşüşünde iyileşme ve ortalama ısı transferinde %16'lık artış gözlemlendiği belirtilmiştir. Isı transferi sistemlerinde performans optimizasyonu için, ısı transferi artışı ve basınç düşüşü arasındaki dengenin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, üç periyodik minimal yüzeylerin (TPMS) ısı emici uygulamalarında kullanımını inceleyen bir çalışma, bu yapıların ısı transferi performansını artırırken basınç düşüşü üzerindeki etkilerini de ele almıştır. Saghir ve Kilic (2024), farklı akış hızları ve akışkan türleri için deneyler gerçekleştirerek, karmaşık sistem geometrilerinin basit geometrideki ısı emicilere kıyasla basınç düşüşü karakteristiklerini incelemiştir. Elde edilen bulgular arasında basınç düşüşünün yapı tasarımına bağlı olarak değişebileceği ve nanoakışkan kullanımının ısı transferini artırırken basınç düşüşünü de yükselttiği belirtilmektedir. Karabulut ve Alnak (2021) yaptıkları nümerik bir çalışmada ısı transferini artırmak için ayrılmış akış bölgesini azaltacak kanal tasarımları yapmak gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, daha fazla miktarda ısı transferi istenen uygulamalarda nanofluidler gibi yüksek ısı transfer katsayılarına sahip akışkanların seçimi son derece önemli olduğunu vurgulamışlardır.

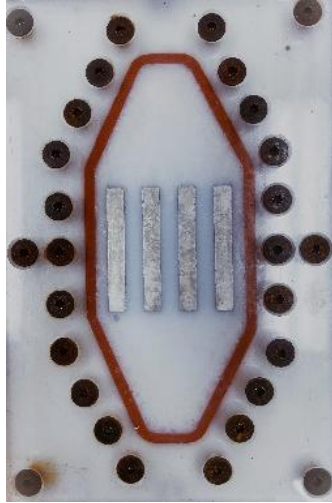
Literatürdeki bulgular ışığında, HNA'lar arasında TiO₂ ve SiO₂'in sentezlenmesi ile suyun termal iletkenliğine katkı sağlayabileceği anlaşılmaktadır. Böylelikle suyun, ısıyı daha etkin bir şekilde iletilmesine ve dağıtılmasına yardımcı olmaktadır. Bununla beraber SiO₂, metal yüzeylerde korozif etkileri azaltarak ısı transfer ekipmanlarının ömrünü uzatmakta da pozitif katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu HNA sentezi, suya karıştırıldığında homojen bir dağılım sağlayarak karışımın uzun süreli kararlı halde kalabileceğini göstermektedir. Diğer bir deyişle TiO₂ ve

SiO₂'nin birlikte kullanılması ile özellikle soğutma veya ısıtma sistemlerinde ısı iletkenlikte avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, %0.5 TiO₂+%0.5 SiO₂'den oluşan hibrit nano akışkanın, üç kanallı bir ısı değiştirici için laminer akış ve zorlanmış taşınım altındaki termal performansı deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen veriler şekil ve grafiklerle sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada ticari olarak bulunan bilgisayar işlemcileri (örneğin, Intel i7 gibi) ile aynı yüzey alanına sahip olan bir ünitenin deneysel tasarım gelişimi ele alınarak bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Düzenekte kullanılan ünite Şekil 1'de görüleceği üzere, üç kanallı bir 6061-T6 Alüminyum malzemeden yapılmış kare şeklinde bir plaka olup bir kenarı 37.5 mm ve yüksekliği 12.7 mm ölçülerindedir (Şekil 2a). Bu boyutlandırma, "Intel Core i7" işlemcinin boyutlarıyla uyumludur. Test bölgesi boyunca giriş/çıkış suyu sıcaklık sensörleri ve ısınmış bloğun üst yüzeyinin 1 mm altında A, B, C, D, E, F, G konumlarında 7 adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır (Şekil 2b) birbirlerine olan mesafeleri ise sırasıyla; 0.5 cm, 0.9 cm, 1.4 cm, 1.9 cm, 2.3 cm, 2.8 cm ve 3.3 cm. Kanalın ısınmış blokla temas ettiği yerdeki plaka kalınlığı 0.3 cm'dir. Kullanılan ısı değiştiricinin altında konumlandırılmış sıcaklık sensörlerinden alınan veriler her bir saniye için kayıt altına alınmıştır. Değerlendirilen tüm senaryolarda sürtünme faktörü dikkate alınmamıştır.

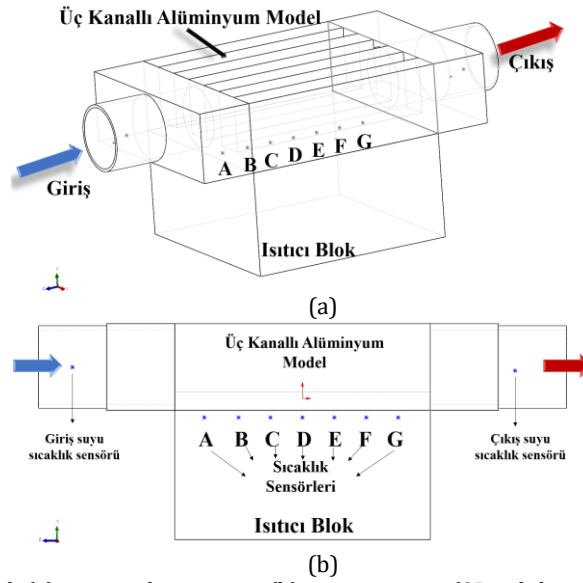
Ünitenin kanallarından cebri sirkülasyonla dolaştırılan HNA, %0.5 TiO₂+%0.5 SiO₂ ve su karışımı olup üretici bir firma tarafından sentezlenmiştir. Nano partiküllerin askıda kalması ve homojen dağılımı için 50 nm'lik nanopartikül boyutu kullanılmıştır. Bu sıvı daha sonra damıtılmış su ile hedeflenen hacim konsantrasyonuna kadar seyreltilmiştir. HNA'nın damıtılmış suyun içinde askıya alınabilmesi için 40 dk manyetik bir karıştırıcı kullanılarak homojenizasyon sağlanmıştır. Deney setinde soğutma sıvısı olarak distile su kullanılmış olup yoğunluk (ρ), dinamik viskozite (μ), sabit basınçta özgül ısı (C_p), ısı transfer katsayısı (k) ve iletkenlik değeri (EC) ile HNA'nın termofiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.



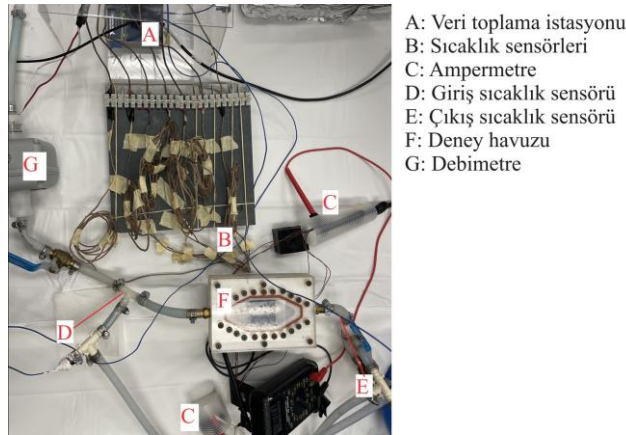
Şekil 1. Deneyde Kullanılan Ünite Modeli (The Unit Model Used in the test unit)

Tablo 1. Distile Suyun Ve HNA'nın Termofiziksel Özellikleri (Tilton Ve Taylor, 1922). (The Thermophysical Properties of Distilled Water and HNA (Tilton and Taylor, 1922))

MATERYAL	ρ kg/m ³	$\mu \times 10^{-4}$ kg/m.s	C_p J/kg.K	k W/m.K	EC $\mu S/cm$
Distile su	998.2	10.01	4128	0.631	0.055
HNA	1013,8	11.4	4109	0,62	-



Şekil 2. Ünitenin 3D katı modeli (a) izometrik görünüşü (b) yan görünüşü (3D solid model of the unit (a) isometric view (b) side view)



Şekil 3. Deney Seti (Experimental Setup)

Bilgisayar işlemcilerinin ürettiği ısıyı simüle etmek amacıyla, ünitenin altına Şekil 3'te belirtilen konumdan ısı akışı uygulanmıştır. Alüminyum plakaya (ünite), standart bir işlemcinin ürettiği ısı akısına eşdeğer olan 30000 W/m^2 uygulanmıştır. Bu ısı akışı, deney bölgesinin alanı üzerine uygulanan gücün voltmetre ve ampermetre ile ölçülmesi sonucu hesaplanmıştır. Üç kanallı blok ünite ile düzenek arasındaki ısıl temas direncini minimize etmek için termal macun kullanılmıştır.

Reynolds sayısı (Re), akışkanın hızı, yoğunluğu, viskozitesi ve karakteristik uzunluk gibi birçok faktörü tek bir boyutsuz sayıda birleştirmektedir. Bu, farklı akışkan sistemleri arasında doğrudan karşılaştırma yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Deneylerde 5 farklı hız değeri için veriler kayıt altına alınmıştır. Hız değerleri sırasıyla 50 mm/s, 100 mm/s, 150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s olacak şekilde senaryolaştırılmıştır. Sistemde dolaşan akışkanın termofiziksel özelliklerine bağlı Reynolds (Re) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tüm deneylerde cebri sirkülasyonlu soğuk distile su banyosu başlangıç set sıcaklık değeri $+4^\circ\text{C}$ alınmıştır. Sirküle edilen distile su, istenen set sıcaklığına ulaşıncaya kadar sistemde dolaştırılmıştır. Alüminyum ünite kanalları içinden geçirilen HNA'nın hacimsel debisi, hızı, giriş ve çıkış sıcaklıkları ve kanal boyunca her saniye alınan sıcaklık değerleri, veri toplama istasyonu (DAQ) aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Deneyler, dış ortam sıcaklığı 22°C olan laboratuvar şartları altında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Sistemde Dolaşan Akışkanın Termofiziksel Özelliklerine Bağlı Reynolds (Re) Değerleri (Reynolds (Re) Values Dependent on Thermophysical Properties of Fluid Circulating in the System)

HIZ	50 mm/s	100 mm/s	150 mm/s	200 mm/s	250 mm/s
Re	460,49	921,73	1382,22	1846,42	2303,95

Sınır tabaka etkisi, bir akışkanın bir katı yüzeye yakın bölgelerdeki akış davranışını tanımlamaktadır. Bu etki, akışkanın yüzeye yakın bölgelerdeki hız, basınç ve sıcaklık gibi özellikleri katettiği mesafe boyunca önemli ölçüde farklılık gösterip ince bir tabaka oluşturmaktadır. Oluşan bu ince tabaka sayesinde, akış hızında ve sıcaklık gradyanında artış gözlemlenmektedir. Bu sayede ince tabakada deneyimlenen ısı transferinin artmasını sağlamaktadır. Bu tabakanın kalınlığı, tamamen gelişmiş bölgede sabit bir kalınlığa kadar yol aldığı uzunlukla doğru orantılı artmaktadır. Diğer yandan Yerel Nusselt sayısı, sınır tabaka kalınlığı ile de ters orantılıdır (Bayomy, 2017). Yerel Nusselt sayısı, akışkandaki muhtemel ısı artışını değerlendirmenin yaygın bir yolu olup kontrol hacmindeki ısı artışının değerlendirilmesi için sayısal ya da deneysel incelemeler sonucu yapılmaktadır. Denklem 1(a), Nusselt sayısını, Denklem 1(b) ısı konveksiyon katsayısı (h) [$W/m^2°C$], Denklem (1c) ise Reynolds sayısının (Re) formüllerini göstermektedir. Burada D_e , kanalın hidrolik çapı (m); k_{nf} , HNA'nın termal iletkenliğini ($W/m°C$); q'' , ısı akısını (W/m^2); T_x , yerel yüzey sıcaklığını ($°C$); T_{in} , akışkan sıcaklığını ($°C$); U , deney kesitindeki su hızını (m/s); ν_f , akışkanın kinematik viskozitesini (m^2/s) temsil etmektedir. Bu çalışmadaki D_e 0.01897m olarak alınmıştır.

$$Nu = \frac{h.D_e}{k_{nf}} \quad (1a)$$

$$h = \frac{q''}{(T_x - T_{in})} = \frac{q''}{\Delta T_x} \quad (1b)$$

$$Re = \frac{U.D_e}{\nu_f} \quad (1c)$$

2.1. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Reynolds sayısı, sürtünme faktörü ve yerel/ortalama Nusselt sayısı (Denklem 2) gibi boyutsuz sayıların ölçümü ve belirsizliğinin kontrolü deneysel çalışmalar için hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada karşılaşılan belirsizlik, yerel Nusselt sayısından kaynaklanan hata yayılımından gelmekte ve aşağıda gösterilen Taylor belirsizlik yaklaşımı kullanılarak hesaplanmaktadır (Taylor ve Thompson, 1982).

$$\delta Nu_x = \sqrt{a \left(\frac{\partial Nu_x}{\partial x} \delta x \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Nu_x}{\partial y} \delta y \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Nu_x}{\partial z} \delta z \right)^2} \quad (2)$$

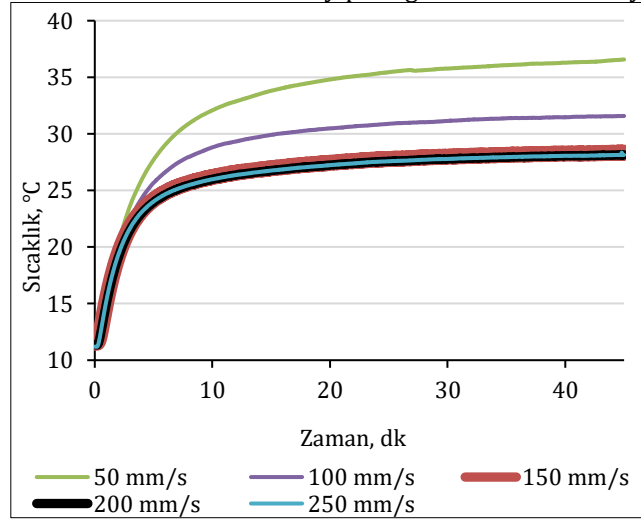
Burada Nu_x , deney verileriyle hesaplanan yerel Nusselt sayısıdır. x , y ve z terimleri yönlendirilmiş koordinat sistemidir ve ∂ , terimin bağlı olduğu boyutun kısmi türevidir. Bu durumda, x , y ve z boyutları, sıcaklık, basınç farkı ve debi gibi ölçülen miktarlar olarak alınır, her terimin değerleri ∂x , ∂y ve ∂z olarak ifade edilebilecek belirsizliklere sahip olur ki bu da yerel Nusselt sayısı gibi parametrelerin belirsizliğini hesaplamak için kullanılır (Taylor ve Thompson, 1982; Welsford vd., 2020). Kullanılan T-tipi termokuplun bilinen bir belirsizliği %0.75, debimetre %0.44 belirsizliğe sahiptir. Elde edilen sonuçlar, kabul edilen ortalama sınır değerler arasında olduğunu göstermektedir.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmanın amacı, sabit ısı akısı altında, değişen akış koşulları ve su içinde askıya alınmış %0.5 TiO₂+%0.5 SiO₂ içeren yüksek konsantrasyonlu HNA'nın alüminyum malzemeden yapılmış bir ısı değiştiriciden ısıyı uzaklaştırma etkinliği incelenmiştir. Alüminyumdan yapılan ünite üç kanallı olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada HNA üzerinde beş farklı devir-daim akış hızı için deneyler yapılarak ısı değiştiricinin ulaşacağı stabil sıcaklık değerleri gözlemlenerek kayıt altına alınmıştır. Alüminyum ısı değiştiricinin duvarlarındaki termal yüklerin kalkması için deneyler 12 saat arayla yapılmıştır. Bununla birlikte, her deney üç kez gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın termal dengeye ulaştığı esnada sıcaklık dağılımlarının taşınım ve iletme olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada deneysel veriler, bir HNA konsantrasyonuna uygun optimum akış hızını önermektedir.

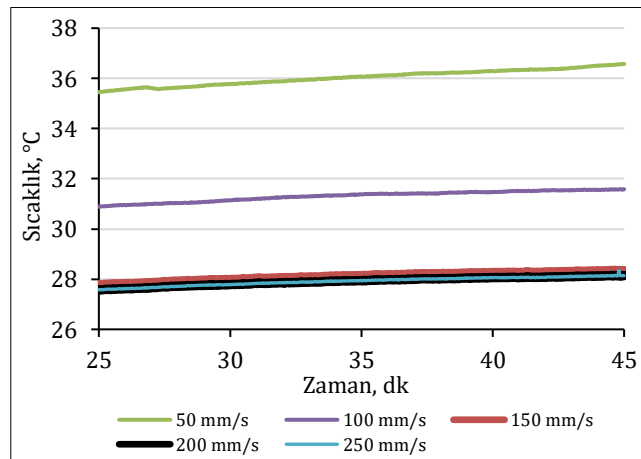
HNA'nın farklı hızlardaki zamana bağlı sıcaklık dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Ortalama 20 dakikada sıcaklık artış eğiliminin azaldığı 40 dakika içinde stabil sıcaklık değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. HNA'nın hızı 50 mm/s, 100 mm/s ve 150 mm/s olarak kademeli şekilde artırıldığında, ısı değiştiricideki sıcaklıkların her bir hız artışında 5'er derece azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, artan akışkan hızının ısı transferini iyileştirdiğini göstermektedir. Yüksek hızlarda akışkan, ısıyı daha etkili bir şekilde uzaklaştırabilmekte ve böylece sistem sıcaklığını düşürmektedir. HNA hızı 150 mm/s'ye çıkarıldığında, 50 mm/s hıza kıyasla termal iletkenlikte %20'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu önemli artış, yüksek hızlarda akışkanın ısıyı daha etkili bir şekilde taşıdığını ve sistemin genel termal performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Artan hız, sınır tabaka kalınlığını azaltarak ısı transferini

kolaylaştırmakta ve böylece termal iletkenliği artırmaktadır. İlginç bir şekilde, akışkan hızının 200 mm/s veya 250 mm/s'ye çıkarılması, 150 mm/s hıza göre ısı aktarımında anlamlı bir değişime neden olmamıştır. Bu gözlem, ısı transferi açısından bir "optimum hız" olduğunu ve bu hızın ötesinde ek faydaların sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, muhtemelen artan türbülans ve sürtünme kayıpları gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır.

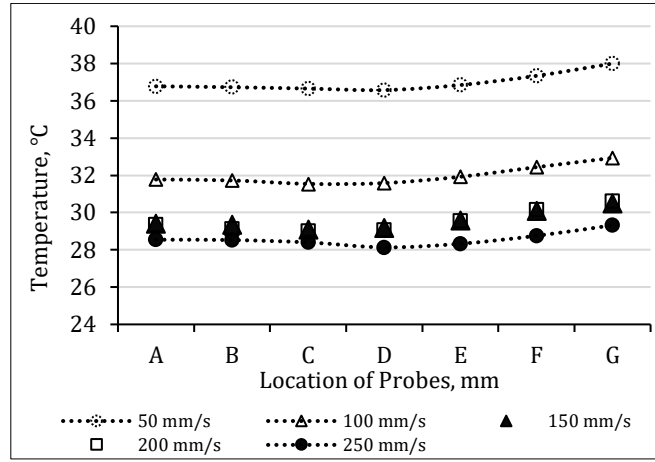


Şekil 4. HNA'nın Farklı Hızlarda Zamana Bağlı Sıcaklık Dağılımı (Time-Dependent Temperature Distribution of HNF at Different Velocities)

Şekil 5' de görüldüğü üzere HNA'nın ısıl dengeye ulaştığı sıcaklık dağılımı verilmiştir. Akış hızı arttıkça, soğutma kapasitesi de artmaktadır fakat akış hızının 150 mm/s'nin üstüne çıkarılmasının ısı transferine bir katkısının olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6'da, HNA'nın gelişmiş sıcaklık davranışının ünite boyunca mesafeye bağlı termal dengedeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Akışkan giriş hızı arttıkça sıcaklık dağılımı azalmıştır. Üç kanallı sıcaklık dağılımlarında en düşük akış hızında ısı emiliminin daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu, termal direnç tabakasının başlangıç ısı akısı temel alınarak belirlenmesi, bu nedenle ısı akısı arttıkça iki değer arasındaki sapmanın arttığı anlamına gelmektedir. Üç kanallı sıcaklık dağılımında, genel olarak sıcaklığın kanal ortasına doğru pozitif yönde azaldığı görülmektedir. HNA davranışı minimum ve maksimum hızlar arasında karşılaştırıldığında ısı değiştirici boyunca ortalama %23.1 sıcaklık dağılımında iyileşme görülmektedir. Böylelikle daha fazla ısı su dolaşımına salınarak ünitenin soğumasını sağlanmaktadır. Isı değiştirici kanalına HNA ilk girdiğinde sıcaklığın hafifçe azaldığı ve ardından düz bir değişim sergiledikten sonra eğimin yükseldiği tespit edilmiştir. Girişte geniş diğer bir ifadeyle sabit seyreden bir sıcaklık gradyanı, sınır tabakadaki gelişimin pozitif yönlü göstergesidir. Tamamen gelişmiş akış olduğunda sıcaklık eğimi sifıra yaklaşmaktadır. Ayrıca, daha yüksek bir akış hızı ile daha düşük sıcaklıklar elde edilmektedir. Sıcaklık profili içinde zayıf bir parabolik şekilde gözlemlenebilir; bu parabolik şekil, sınır tabaka etkisinin kanalların giriş ve çıkış bölgelerinde ısıyı salma eğiliminin daha belirgin olduğunu göstermektedir.

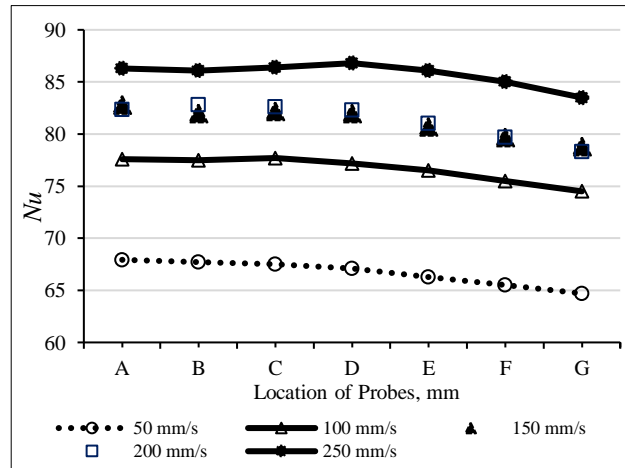


Şekil 5. Termal Dengedeki Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distribution in Thermal Equilibrium)



Şekil 6. HNA'nın Isı Değiştirici Boyunca Mesafeye Bağlı Termal Dengedeki Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distribution in Thermal Equilibrium Along the Length of the Heat Exchanger for HNF)

Değerlendirilen tüm senaryolar için sürtünme faktörü ve ısı kayıpları dikkate alınmamıştır. Deney seti, izolasyon malzemesi olan Delrin'den yapılmıştır, ancak düzenek üst kısmı test bölümünü görmek için plexiglass'tan yapılmıştır. Ayrıca 1.5 mm çaplı iki adet sensör kablosunun geçebilmesi için dolaşım suyu boru hattında delik açılmasından ötürü bu durum sistemde olası termal kayıplar olduğu anlamına gelmektedir. Bu delikler, veri ölçümüne izin vermek için eklenmiş olup, termal kayıpları azaltmaya yardımcı olması için taşıyıcı ile doldurulmuştur. Ancak, bu farklılıklar göz önüne alındığında, veriler hala kabul edilebilir ve HNA davranış karakteri hakkında önemli bilgiler vermektedir.



Şekil 7. Konuma Bağlı Yerel Nusselt Sayısının Dağılımı (Local Nusselt Number Distribution Depending on Location)

Nusselt sayısı, HNA içindeki ısı emiliminin bir sonucu olarak Şekil 7'de görüldüğü üzere uzunluk boyunca azalmaktadır. Isı transferinde kullanılan hibrit nano akışkanlarda, kanalların kullanımı, sistem için gereken pompa gücünü artırarak giriş bölgesinde basıncın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca ısı değiştirici de akış hızını korumak için kanal sayısını artırılması yerel Nusselt sayısını da artırmaktadır. Bu çalışmadaki modelin deney sonuçları Nusselt sayısında artış olmadığını, kanal sayısı ve mesafenin yeterli olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, mikroişlemcilerin soğutulmasında sıvı soğutma yöntemi kullanılırken, ısı değiştiricide kullanılan akışkana HNA eklenmesi halinde ısı etkiler deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar:

- %0.5 hacimli TiO_2 ve %0.5 hacimli SiO_2 'den oluşan HNA'nın, standart bir işlemcinin ürettiği ısı akısı olan 30000 W/m^2 uygulandığında ısı transferine maksimum katkısı %23.10 bulunmuştur.
- HNA hızının, 50 mm/s ve 150 mm/s karşılaştırıldığında termal iletkenliğin %20 arttığı gözlemlenmiştir.
- Isı aktarımında HNA akış hızının 200 m/s veya 250 mm/s olmasının 150 mm/s'ye göre anlamlı bir değişime neden olmadığı görülmüştür.
- Sistemdeki basınç düşüşünün önüne geçilmesi için hibritleşme için kullanılan malzemelerin, yüksek

- ısı iletim kapasitesine sahip fakat daha düşük konsantrasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- v. Bu çalışma hibrit nano akışkanların incelenmesine yönelik olmasına rağmen, farklı geometrilere sahip modeller için ek çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahmadlouydarab, M., Edadolahzadeh, M., Ali, H.M. 2020. Effects of utilizing nanofluid as working fluid in lab-scale designed DLGK to improve thermal absorption and efficiency. *Phys. A Stat. Mech. Appl.* 540, 123109. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123109>.
- Ambreen, T., Saleem, A. and Park, C.W. 2019. Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow characteristics of a nanofluid-cooled micro pin-fin heat sink using the Eulerian-Lagrangian approach. *Powder Technol.* 345, 509–520. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.042>.
- Babar, H., Ali, H.M. 2019. Air foil shaped pin fin heatsink: potential evaluation of ferric oxide and titania nanofluids. *Energy Convers. Manag.*, 202, 112-194. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08320-7>.
- Bayomy, A.M., Saghir, M.Z., 2017. Experimental study of using Al₂O₃-water nano fluid flow through aluminum foam heat sink: comparison with numerical approach. *Int. Journal of Heat Mass Transf.* 107, 181–203, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.037>.
- Bayomy, AM., 2017. Electronic cooling using ERG aluminum foam subjected to steady/ pulsating water and g-Al₂O₃-water nanofluid flows: experimental and numerical approach. PhD Thesis.
- Bumataria, R.K., Chavda, N., Panchal, H. Current research aspects in mono and hybrid nanofluid based heat pipe technologies. *Heliyon* 5, 01627, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01627>.
- Ho, C.J., Chiou, Y., Yan, W., 2019. Ghalambaz, M. Transient cooling characteristics of Al₂O₃- water nanofluid in a micro channel subject to a sudden-pulsed heat flux. *Int. J. Mech. Sci.* 151, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.017>.
- Karabulut, K., Buyruk, E., & Kılınc, F. (2018). Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması. *Mühendis ve Makina*, 59(690), 45-67.
- Karabulut, K., Alnak, D. E. (2021). Investigation of graphene oxide-distilled water nanofluids with consideration of heat transfer and flow structure for backward-facing step flow. *Journal of Engineering Thermophysics*, 30(2), 300-316. <https://doi.org/10.1134/S1810232821020119>.
- Karabulut, K., 2023. Heat transfer increment study taking into consideration fin lengths for CuO-water nanofluid in cross flow-impinging jet flow channels, *Thermal Science*, 6A, 4345-4360. <https://doi.org/10.2298/TSCI221203035K>.
- Karabulut, K., Buyruk, E., Kılınc, F., 2020. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 230. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02319-0>.
- Kahn, A., Ali, H.M., Nazir, R., Ali, R., Munir, A., Ahmad, B., Ahmad, Z., 2020. Experimental investigation of enhanced heat transfer of a car radiator using ZnO nanoparticles in H₂O ethylene glycol mixture. *J. Therm. Anal. Calorim.* 137, 3007–3021.
- Saghir Z. and Kilic G.A., 2024. Experimental Forced Convection Study Using a Triply Periodic Minimal Surface Porous Structure with a Nanofluid: Comparison with Numerical Modeling. *Applied Sciences*, 14(17), 7594. <https://doi.org/10.3390/app14177594>.
- Kimura K., Lipeles, 2006. A Fuzzy Controller Component. U. S. Patent 14, 860, 040, 14 December 2006.
- Lahari, M.L.R.C., Sessa, P.H.V., Talpa, S., Swamy, K.S.N., Krishnamurthy, N., Sharma, K., 2018. Investigation on heat transfer properties of water based TiO₂-ZnO nanofluids. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 455, 12092. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012092>.
- Plant, R.D., Hodgson, G.K., Impellizzeri S., Saghir, M.Z., 2020. Experimental and numerical investigation of heat enhancement using a hybrid nanofluid of copper oxide/aluminium nanoparticles in water. *J. Therm. Anal. Calorim.* 141, 1951–1968. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09639-2>.
- Saba, F., Ahmed, N., Khan, U., Waheed, A., Rafiq, M., Mohyud-Din, S., 2018. Thermophysical analysis of water based (CuAl₂O₃) hybrid nanofluid in an asymmetric channel with dilating/squeezing walls considering different shapes of nanoparticles. *Appl. Sci.* 8, 1549–1612. <https://doi.org/10.3390/app8091549>.
- Shi, X., Li, S., Wei, Y., Gao, J., 2018. Numerical Investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water based Al₂O₃ nanofluids in a microchannel. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 90, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.11.007>.
- Taylor, J. R. And Thompson, W., 1982. An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. Vol. 2, içinde (s. 193-200). Mill Valley, CA: University science books.
- Tijani, A.S., Sudirman, A.S.B., 2018. Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al₂O₃/CuO based nanofluid as a coolant for car radiator. *Int. Journal of Heat Mass Transf.* 118, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.083>
- Tilton, L. W. and Taylor, J. K., 1922. Accurate representation of the refractivity and density of distilled water as a function of temperature. *Phys. Rev.* 2(20), 249.
- Welsford, C. A., Delisle, C. S., Plant, R. D. And Saghir, M. Z., 2020. Effects of nanofluid concentration and channeling on the thermal effectiveness of highly porous open-cell foam metals: A numerical and experimental study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140, 1507-1517. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09166-9>.



PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BACTERIAL CELLULOSE BIOCOMPOSITES BASED ON *THYMUS SIPYLEUS* BOISS. EXTRACT

Nur KILINÇ¹, Dicle ÖZDEMİR KÜÇÜKÇAPRAZ^{2*}, Mustafa CÜCE³

¹ Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta, Türkiye

³ Giresun University, Şebinkarahisar School of Applied Sciences, Department of Food Technology, Giresun, Türkiye

Keywords

Bacterial
Cellulose,
Ex situ
Modification,
Thymus sipyleus
Boiss.,
Sustainable
Biomaterials,
Natural
Antibacterial
Agents.

Abstract

The aim of this study was to improve the antibacterial properties of bacterial cellulose (BC) produced by *ex situ* modification in Kombucha culture medium. Bioactive methanol extract from the plant *Thymus sipyleus* Boiss. was added to BC by *ex situ* modification to obtain a bioactive and cost-effective biocomposite. SEM and FTIR analyses confirmed the nanofibers, porous structure and chemical bonding of the extract with the BC nanofibers and revealed that the biocomposites were successfully produced. A significant decrease in water retention and swelling behavior was observed in the biocomposites. The antibacterial activity of the biocomposites was determined according to the AATC100-2004 method. The bactericidal activities of the biocomposites produced were compared with those of the gram-positive bacteria *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 and the gram-negative bacteria *Escherichia coli* ATCC 25922. Biocomposite T010 (0.10% extract) showed strong antibacterial activity, reducing *E. coli* by 84.6% and *S. aureus* by 97.54%. The results of this study show that the *T. sipyleus* extract can be used as an effective antibacterial agent at appropriate concentrations and that the BC biocomposite produced by *ex situ* modification has excellent antibacterial properties.

THYMUS SIPYLEUS BOISS. EKSTRAKTİ BAZLI BAKTERİYEL SELÜLOZ BIYOKOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Anahtar Kelimeler

Bakteriyel
Selüloz,
Ex situ
Modifikasyon,
Thymus sipyleus
Boiss.,
Sürdürülebilir
Biyomalzemeler,
Doğal
Antibakteriyel
Ajanlar.

Öz

Bu çalışmanın amacı Kombucha kültür ortamında *ex situ* modifikasyon ile üretilen bakteriyel selülozun (BC) antibakteriyel özelliklerini iyileştirmektir. *Thymus sipyleus* Boiss. bitkisinden elde edilen biyoaktif metanol özütü, BC'ye *ex situ* modifikasyonla eklenerek biyoaktif ve uygun maliyetli bir biyokompozit elde edilmiştir. SEM ve FTIR analizleri, nanofiberleri, gözenekli yapıyı ve özütün BC nanofiberleri ile kimyasal bağlanmasını doğruladı ve biyokompozitlerin başarıyla üretildiği kanıtlanmıştır. Biyokompozitlerde su tutma ve şişme davranışında önemli bir azalma gözlenmiştir. Biyokompozitlerin antibakteriyel aktivitesi AATC100-2004 yöntemine göre belirlenmiştir. Üretilen biyokompozitlerin bakterisidal aktiviteleri, gram pozitif bakteri *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 ve gram negatif bakteri *Escherichia coli* ATCC 25922 ile karşılaştırılmıştır. Biyokompozit T010 (%0,10 ekstrakt) güçlü antibakteriyel aktivite göstererek *E. coli*'yi %84,6, *S. aureus*'u ise %97,54 oranında azaltmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, *T. sipyleus* ekstraktının uygun konsantrasyonlarda etkili bir antibakteriyel ajan olarak kullanılabileceğini ve *ex situ* modifikasyonla üretilen BC biyokompozitinin mükemmel antibakteriyel özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Alıntı / Cite

Kılınç, N., Özdemir, Küçükçapraz, D., Cüce, M., (2025). Production and Characterization of Bacterial Cellulose Biocomposites Based on *Thymus sipyleus* Boiss. Extract, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(1), 165-176.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

N. Kılınç, 0000-0003-4494-5084
D. Özdemir Küçükçapraz, 0000-0003-0209-8323
M. Cüce, 0000-0001-7406-171X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.12.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	27.12.2024
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* Corresponding Author: diclekucukcapraz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1175

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BACTERIAL CELLULOSE BIOCOMPOSITES BASED ON *THYMUS SIPYLEUS* BOISS. EXTRACT

Nur Kılınç¹, Dicle Özdemir Küçükcapraz^{2†} and Mustafa Cüce³

¹ Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta, Türkiye

² Textile Engineering Department, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye

³ Department of Food Technology, Şebinkarahisar School of Applied Sciences, Giresun University, Giresun, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- Biocomposites of bacterial cellulose and *T. sipyleus* extract were successfully produced by *ex situ* modification.
 - Characterization analyzes confirmed the existence of the biocomposites produced.
 - The biocomposite structures showed excellent antibacterial activity at different concentrations.
-

Purpose and Scope

Preparation of a biocomposite with improved antibacterial properties by the *ex situ* modification technique of bacterial cellulose produced in a static culture medium with methanol extract from the plant *Thymus sipyleus* Boiss.

Design/methodology/approach

In the present study, *ex situ* modification of bacterial cellulose produced under static culture conditions with methanol extract of *T. sipyleus* plant was successfully performed. Antibacterial biocomposite structures were successfully produced and their characterization was investigated.

Findings

The T010 biocomposite produced showed 97,54% antibacterial activity against *S. aureus* bacteria in the antibacterial activity test according to the AATC100-2004 method. Depending on the amount of plant extract, the water holding capacity and swelling ratio decreased.

Originality

In the present study, BC biocomposites with antibacterial properties were prepared using bioactive *T. sipyleus* extract. *T. sipyleus* plant was used for the first time in *ex situ* modification studies with BC.

[†] Corresponding Author: diclekucukcapraz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1175

1. Introduction

Biomaterials have provided benefits to society for hundreds of years. The development of biomaterials in various fields is essential for sustainability. Owing to the structural uniqueness of biomaterials, their production, processing and functionalization have become simple processes with the latest developments in materials science. Cellulose, a polysaccharide that is insoluble in water, is the most common polymer in nature (Du *et al.*, 2018). While plants are the main source of cellulose, they can also be produced by many bacteria, such as those in the genus *Gluconacetobacter*, in the form of bacterial cellulose (BC) (Klemm *et al.*, 2006; Gupte *et al.*, 2021).

The BC layer is also referred to in scientific literature as a bacterial cellulose nonwoven surface or biononwoven layer (Ashjara *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2020). While BC has the similar structure to plant cellulose, it can be produced in pure form and does not contain impurities such as lignin, hemicellulose or pectin. This purity of BC offers a significant advantage over plant cellulose, as it does not use environmentally harmful chemicals (Cazón *et al.*, 2021). Several important factors affect bacterial cellulose production. These factors include temperature, pH, carbon sources, culture medium components, oxygen levels and the type of bacteria used. BC production can take place in different culture environments. Some of these include the Hestrin-Schramm (HS) culture medium (Meftahi *et al.*, 2015), the glucose, yeast extract and carbonate culture media, and the Kombucha culture media (Kilinc *et al.*, 2022).

Kombucha is a slightly sweet, slightly sour refreshing drink consumed worldwide. Kombucha is made from the infusion of tea leaves by fermenting a symbiotic culture of bacteria and yeasts that form the 'tea fungus'. A slippery layer of cellulose (bacterial cellulose) and sour broth are the two components of kombucha (İleri *et al.*, 2010). The bacterial cellulose layer was obtained by keeping this mixture at room temperature, preferably in an environment protected from light, for 1 to 3 weeks. Compared with other methods, the production of BC in static culture media is inexpensive and relatively simple and is the most used technique for obtaining BC under laboratory conditions. The resulting BC layer takes the form of a biofilm at the air-liquid interface (Kilinc and Özdemir Küçükçapraz, 2024).

BC has excellent properties, such as a large fibril size, high crystallinity, improved biocompatibility, good mechanics, high permeability, high fluid retention capacity and improved moldability (Brown, 1886; Khattak *et al.*, 2015). Because of its improved properties, BC is considered a promising biopolymer in various fields, such as textiles, medicine, food, electronics and layered construction (Boni *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2020; Cazón *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021; Kilinc *et al.*, 2022;). In the textile industry, it is used as temporary artificial skin, as a wound dressing for the treatment of burns and ulcers, and as an adsorbent in other textile products (Lin *et al.*, 2013). Despite the many beneficial properties of BC, its limited antibacterial activity limits its use in many areas (Fatima *et al.*, 2021). The synthesis and modification of hydrogels from BC has recently gained importance for various applications in different fields. Different modification techniques have been used to modify BC and increase its performance, leading to the production of composite structures. *Ex situ* modification is one of these methods (Stumpf *et al.*, 2018). *Ex situ* modification is performed mainly by absorption, which leads to the development of powerful hydrogen bonds between the adsorbed molecules and BC (Lin *et al.*, 2013). Although many studies have investigated the functionalization of BC with antimicrobial polymers and nanomaterials for various applications, research on the functionality of BC with bioactive agents of plant origin is limited (Fatima *et al.*, 20-21). In studies conducted with herbal extracts in the literature, the application of extracts imparts antimicrobial properties to the product (Kilinc *et al.*, 2015; Cüce *et al.*, 2019; Cuce, 2022; Cuce *et al.*, 2022). In the textile industry in particular, plant-based products used in environmentally friendly production are seen as one of the most important textile applications as people become increasingly health-conscious. For this reason, textile products with antibacterial properties are becoming increasingly popular (Korkmaz *et al.*, 2023).

The Lamiaceae family is one of the most widespread flowering plant groups and is known for its biodiversity and medicinal properties. It has high economic value because of its aromatic properties and ease of cultivation (Ndhala *et al.*, 2024). Each species contributes to overall bioactivity via a complex combination of bioactive compounds. These plants have been used for aromatherapy and antiseptic purposes since ancient times. *Thymus* species have volatile and nonvolatile extracts that are rich in phenolic compounds (Cüce and Basançelebi, 2021; Elbouny *et al.*, 2022). These extracts contain secondary metabolites that have strong antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, antiviral and anticancer properties (Ustuner *et al.*, 2019; Nilofar *et al.*, 2024; Ndhala *et al.*, 2024).

Rosmarinic acid has been identified as the main component of the methanol extract of *T. siphyleus*. This compound, an ester of caffeic acid, is widespread in plants of the Lamiaceae family. In addition, *T. siphyleus* contains phenolic compounds such as salvianolic acid, caffeic acid, and ferulic acid and flavonoids such as luteolin, galocatechin, isorhamnetin and quercetin. Flavonoids and phenolic compounds are secondary metabolites with aromatic rings that are notable for their antibacterial effects (Elansary *et al.*, 2020). In particular, carvacrol has been shown to inhibit the growth of microorganisms such as *E. coli*, *S. aureus* and *P. aeruginosa*. The high contents of carvacrol and thymol explain the high antimicrobial and antioxidant activities of these plants. *Thymus* species are often preferred in industry because they are rich sources of bioactive compounds (Nadeem *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019; Llorent-Martínez *et al.*, 2022).

Ul-Islam *et al.* (2021) reported that the addition of *aloe vera* gel to BC by an *ex situ* modification method only filled the gaps between the fibril networks without affecting the morphology of the structure. The BC/*Aloe vera* composite was found to increase mechanical strength and other properties without altering the structural morphology. Asanarong *et al.* (2020) produced a composite structure of BC by *ex situ* modification by crosslinking papain extract and glutaraldehyde for wound dressings. The results showed that the addition of glutaraldehyde enhanced the binding of papain to BC, the wound dressing exhibited antibacterial properties, and the resulting BC composite structure could be a promising biomaterial for biomedical applications. Barud *et al.* (2013) produced a biocomposite of BS and Polis extracts by *ex situ* modification. Owing to the caffeic acid and flavonoids contained in the propolis extract, the prepared BS/propolis composite structures presented antioxidant and antibacterial properties.

In this study, BC was modified *ex situ* with a methanol extract from *Thymus sipyleus* Boiss. The aim of this study was to produce biocomposites of bacterial cellulose and *T. sipyleus* (BCT) with low antibacterial activity. The biocomposites were prepared by immersing purified BC in *T. sipyleus* extract via the *ex situ* method. The obtained biocomposites were analyzed in detail with respect to their morphological and physicochemical properties. In addition, the antibacterial activity of the biocomposites against gram-positive *S. aureus* ATCC 25923 and gram-negative *E. coli* ATCC 25922 pathogens was evaluated. Biocomposites prepared from various plant extracts using bacterial cellulose have been prepared previously. However, the preparation of biocomposites using the plant *T. sipyleus* was performed for the first time and will shed light on the literature.

2. Materials and Method

2.1. Materials

The flower and leaf parts of *T. sipyleus* were collected in June and July 2024 in Giresun, Şebinkarahisar. The samples were weighed to calculate the yield rates. To prevent damage to the bioactive components in the plant structure during the drying phase, the samples were protected from direct sunlight in a well-ventilated room and stored until extraction.

2.2. Extraction Process of *T. sipyleus* Boiss.

The extraction process was performed via an ultrasonic bath (Isolab 1.3 L, Germany). The flower and leaf parts of *T. sipyleus* dried at room temperature were ground in a grinder (Fakir Aromatic, Germany). For ultrasonic extraction, 25 g of the ground herbal material was placed on a volumetric glass, and 250 ml of 80% methanol (CH₃OH) was added. The extraction was carried out in an ultrasonic water bath with distilled water at 34–35 °C for 12 h. Whatman No. 2 was used to filter the extraction. The solvent (CH₃OH) used for the extraction was evaporated under low pressure in a rotary evaporator at 35 °C (Heidolph Instruments GmbH & Co. KG, Germany) until no more CH₃OH was present. The efficiency of extraction was then calculated.

2.3. Bacterial Cellulose Production and Purification

Kombucha SCOBY (Bacteria and Yeast Symbiotic Culture) was purchased from a firm producing Kombucha cultures in Türkiye. The nitrogen source required for the production of the Kombucha culture was black tea (7.9 g). The black tea was boiled in 1 L of distilled water for 20 min. After boiling, 100 g of fructose was dissolved in the boiled tea as a carbon source. When the temperature of the prepared solution fell below 24 °C, it was transferred to a glass container sterilized with 70% ethanol solution. One hundred milliliters of 80% acetic acid was added to the container. The prepared mixture was stored for 10 days in a sterile environment at room temperature and protected from direct sunlight. Purification was performed to remove bacteria and other components in the structure of the bacterial cellulose layer obtained after 10 days. For the purification process, the BC layer was first incubated in 96% ethanol for 15 min. The BC was then transferred to a beaker containing 1 L of purified water and processed for 50 min at boiling temperature with constant stirring. The relevant literature reports that the purification of BC with pure water followed by treatment with 3% NaOH does not damage the structure if an effective purification process is desired. Therefore, BC was purified by treatment with 3% NaOH for 95 min at 25 °C and 70 rpm. To neutralize the purified BC, it was treated with acetic acid and distilled water for 30 min at 25 °C and 50 rpm, and the pH was adjusted to 3. The purified BC was stored at +4 °C for later use (Zeng, 2014; Han *et al.*, 2019; Kilinc *et al.*, 2022; Kilinc and Dicle Özdemir, 2024).

2.4. *Ex Situ* Development of BC-*T. sipyleus* Biocomposites

For the preparation of the *T. sipyleus* solution for *ex situ* production, 0.10% *T. sipyleus* extract was dispersed in a beaker with ethanol (70%, v/v). The mixture was sonicated for 20 min to achieve better dissolution and reduce the particle size (Siahaan *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2023). The same solution was also prepared as 0.15% *T. sipyleus*.

The cleaned BC layer (2x2 cm²) was immersed in the prepared solution. It was removed from the solution after being kept in an environment away from light for 30 h. Excess plant extract on the produced biocomposite was removed by washing with distilled water. Table 1 shows the codes and properties of the biocomposites produced in the study and used in the analyses.

Table 1. Sample Codes and Properties

Sample code	Properties
T010	Biocomposite produced using 0.10% extract
T015	Biocomposite produced using 0.15% extract
BC	Purified BC surface

2.5. Characterization

2.5.1. SEM and FTIR Analysis

SEM analyses were performed with a Fei Quanta 250 Feg instrument. The surface morphology of the samples was visualized by scanning electron microscopy (SEM). The chemical interactions between BC and the BC-*T. sipyleus* biocomposite (BCT) were investigated via Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. To understand the chemical structure of the produced biocomposites, FTIR spectra were measured between 4000 and 400 cm⁻¹ via the attenuated total reflection (ATR) technique.

2.5.2. Water Holding Capacity

The BC was dried at room temperature, and the T010 and T015 biocomposites at different concentrations were cut into 2 × 2 cm² pieces. The dry samples were kept in water for 1 h under static conditions at room temperature and weighed. The samples were then dried at room temperature for 24 h and weighed again. The WHC was then calculated via equation (1) (Ul-Islam *et al.*, 2023).

$$\text{WHC} [\%] = \frac{(W_w - W_d)}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

W_w = Wet weight of the sample

W_d = Dry weight of the sample

2.5.4. Swelling Ratio

To test the swelling rate, BC dried at room temperature was soaked in deionized water for 48 h and weighed after wiping off dripping water. The swelling rate is calculated using the following equation. (2) (Gao *et al.*, 2023).

$$\text{Swelling Ratio} [\%] = \frac{W_r - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

(W_r refers to the wet weight of the dried sample after rehydration, W_d refers to the weight of the dried sample)

2.6. Antibacterial Activity

For antibacterial activity, gram-positive *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 and gram-negative *Escherichia coli* ATCC 25922 strains were applied to plant extracts prepared with CH₃OH in an ultrasonic bath. The antibacterial properties of the BCT biocomposite and the BC produced by *ex situ* modification were quantitatively determined according to AATCC 100-2004 (Cuce, 2022). The bacterial colonies formed in Muller–Hinton agar (MHA) medium were counted. The decrease in bacterial count was calculated according to equation (3).

$$R [\%] = \frac{B - A}{B} \times 100 \quad (3)$$

R represents the percentage decrease, B represents the number of bacterial colonies at the beginning of the test (0 h), and A represents the number of colonies after 24 h of contact with the composite structures obtained via the *ex situ* modification method.

3. Results and Discussion

3.1. Development of BC-*T. sipyleus* Biocomposites

In this study, BC-based biocomposites will be obtained thanks to the positive properties of plant extracts. As a result of the *ex situ* modification process, biocomposite (T010) containing 0.10% *T. sipyleus* extract, biocomposite (T015) containing 0.15% *T. sipyleus* extract were obtained.

The surface chemistry of BC enables chemical interactions with different materials, and its unique network structure facilitates the impregnation of substances. Therefore, BC can serve as an ideal substrate for the production of bioactive materials with plant extracts (Fatima et al., 2021). Plant extracts contain many medically important compounds, such as flavonoids, phenols, alkaloids, chalcones, and amines. The aim of this study was therefore to develop an antibacterial biocomposite based on BC with plant extracts. Ultrasonic extraction is preferred because of its compliance with the concept of sustainable "green chemistry", as it allows extracts to be obtained in a short time, with high quality and purity, and requires the use of a minimal amount of solvent (Shirsath et al., 2021). The extract of *T. sipyleus* was obtained via ultrasonic extraction, with a yield of 18.42%.

The efficiency of the extraction process varies depending on the type of solvent and the method used (Cuce et al., 2022). The literature indicates that the methanol extract of *T. sipyleus* prepared via the Soxhlet method has an efficiency of 18.79%. In view of these results, the efficiency of the methanol extract prepared in the ultrasonic bath confirms the data in the literature (Polat et al., 2007).

In this study, BC-based biocomposites were obtained because of the positive properties of the plant extracts. In the *ex situ* modification process, a biocomposite (T010) containing 0.10% *T. sipyleus* extract and a biocomposite (T015) containing 0.15% *T. sipyleus* extract were obtained.

3.2. Characterization of Biocomposites

BC is known to have a porous structure in the form of a net-like fibril. This was confirmed by SEM images. As shown in the SEM images of the BC biocomposite structures prepared by the *ex situ* modification method with *T. sipyleus*, the *T. sipyleus* particles were successfully impregnated into the BC, and no deterioration of the network structure was observed (Kumar et al., 2023). The porous structure increases the penetration rate of solutions or adds plant extracts into the BC matrix (Kamal et al., 2022). In the structure of the T010 and T015 biocomposites, unlike the SEM image of BC, the number of oil molecules bound to the plant extract increased in a concentration-dependent manner. Furthermore, the biocomposites T010 and T015 exhibited a comparatively reduced porosity and a more compact, net-like structural configuration. This finding is interpreted as an indication that the plant extracts were bound to and penetrated into the BC fibers (Ul Islam et al., 2023). This result is also supported by the water holding capacity and swelling ratio results. The plant extract is expected to penetrate the BC surface and impart antibacterial properties to the biocomposite through further interaction (Hungund et al., 2016; Fernandes et al., 2020). Cross-sectional and surface SEM images of the T010 and T015 biocomposites and BC are shown in Figure 1.

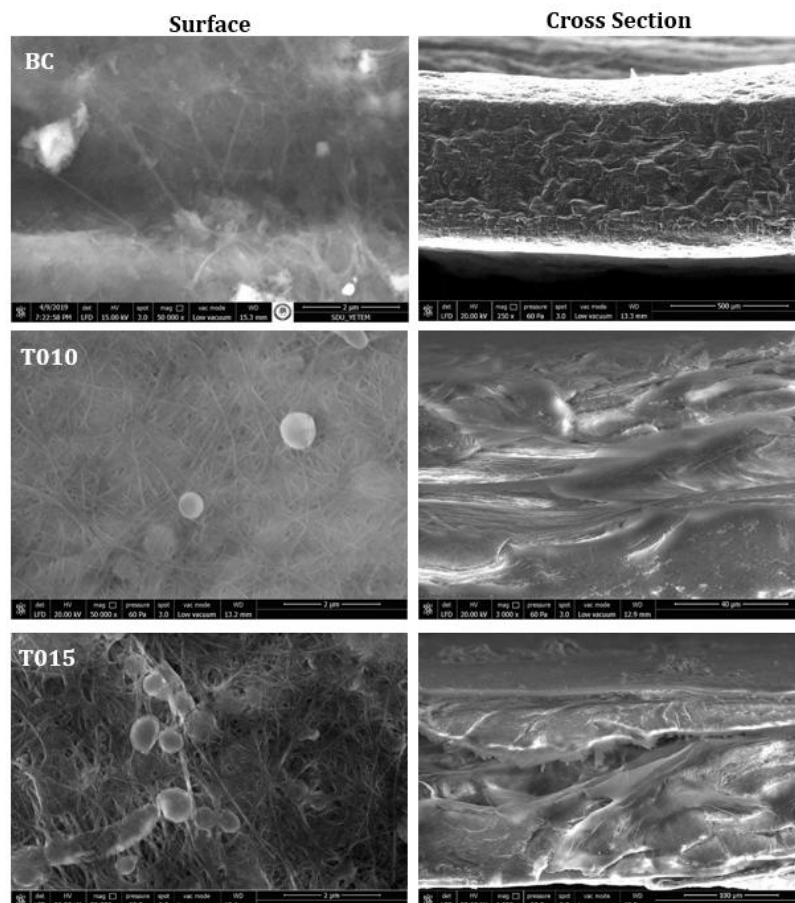


Figure 1. SEM Images of BC, T010 and T015

To investigate the presence of active biomolecules in the *T. sipyleus* extract of the biocomposites T010 and T015, the FTIR spectrum was analyzed. The C-O-C vibration peak can be identified in the fingerprint region about 1058 cm^{-1} (Ul Islam et al., 2023). The vibrations at $1050\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ in samples T015 and T010 are thought to be due to the presence of thymol and the C-N stretching vibrations of the amines. The vibrations between 1350 and 1450 cm^{-1} are indicative of the presence of -OH bonds, which are characteristic of phenolic compounds. The observation of characteristic C-OH stretching vibrations of C=O ester groups in the range of $1550\text{--}1560\text{ cm}^{-1}$ provides evidence that these compounds have been incorporated into the polymer matrix formed by BC (Razali et al., 2019; Nasr et al., 2022; Rigueto et al., 2024). The different FTIR peaks of the prepared samples are listed in Table 2 (Ul Islam et al., 2023; Bodea et al., 2022; Razali et al., 2019; Jiji et al., 2019; Sukhtezari et al., 2017).

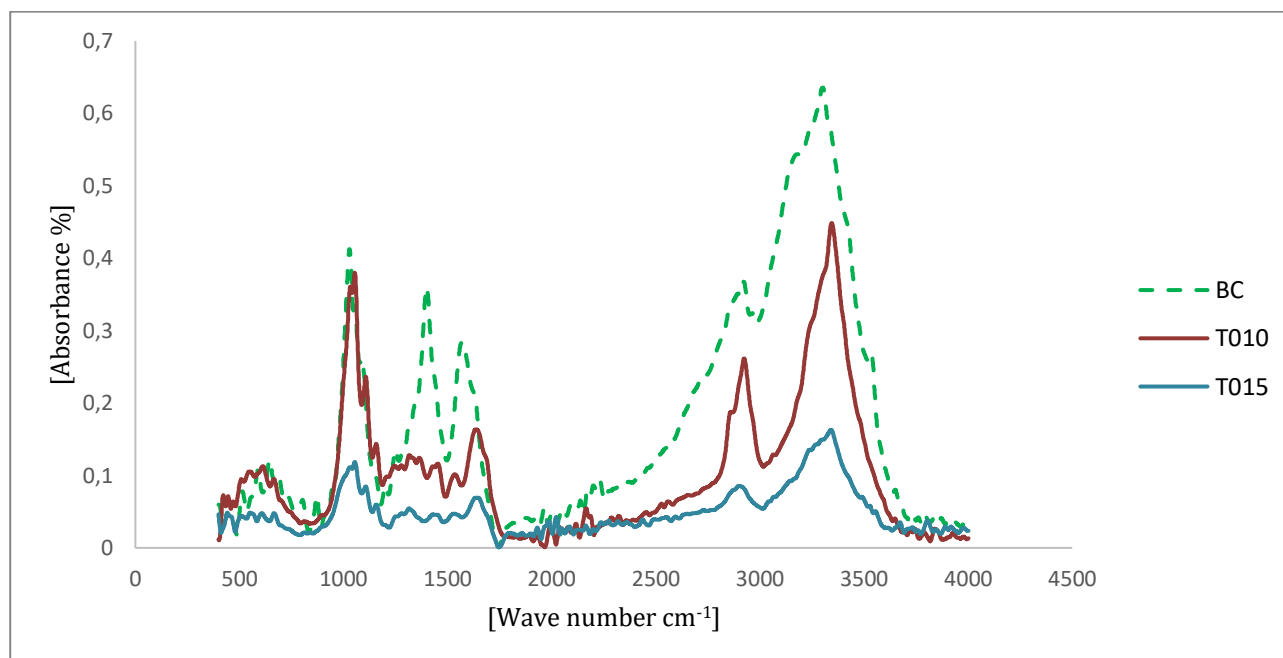


Figure 2. FTIR Spectrum of BC, T010 and T015

The absorption band observed in samples T015 and T010 in the range of $2940\text{--}2980\text{ cm}^{-1}$ is indicative of the C-H stretching of CH_2 groups, CH_3 and CH_2 in aliphatic compounds. This is consistent with the antisymmetric or symmetric stretching of CH and the bonding of CH_3 with oxygen (O) or nitrogen (N). This finding also suggests the presence of chlorophyll groups (Beldjilali et al., 2020). Figure 2 shows the FTIR spectra of BC, T010 and T015. The FTIR spectrum of BC shows the 1058 cm^{-1} peak, which corresponds to C-O-C stretching; the 1403 cm^{-1} peak, which corresponds to C-H stretching; the 1458 cm^{-1} peak, which corresponds to C-C stretching; the 2898 cm^{-1} peak, which corresponds to C-H stretching; and the 3307 cm^{-1} peak, which corresponds to strong H-bonding. These peaks are indicative of the presence of BC and its characteristic functional groups. The peak at 1403 cm^{-1} , which is attributed to C-H stretching, is a notable feature of the FTIR spectrum of BC. However, this peak disappeared when *T. sipyleus* extract was added (Fatima et al., 2021; Sukhtezari et al. 2017; Ashori et al. 2012). Furthermore, an additional peak corresponding to the aromatic COOH group appeared at 1647 cm^{-1} and 1651 cm^{-1} in T010 and T015, respectively, as the *T. sipyleus* extract contains various chemical components, such as flavonoids and phenolic compounds (Fatima et al., 2022). The peak observed at 3350 cm^{-1} can also be interpreted as the OH stretching of the phenolic/carboxylic group in the extract (Beldjilali et al., 2020). The adsorption band between 3200 and 3500 cm^{-1} present in all the spectra is attributable to the stretching vibrations within and between the O-H bonds of cellulose (alcohols, phenols and carboxylic acids) are also indicative of the strong hydrogen bonding of the hydroxyl groups of *T. sipyleus* with BC (Panggabean et al., 2024; Bodea et al., 2022; Jiji et al., 2019).

Table 2. FT-IR Spectra of BC, T010 and T015 Biocomposite

	O-H	C-H	C=O	COOH	C-C	C-N	C-O-C
BC	3307	2898	-	-	1458	-	1058
T010	3350	2944	1556	1647	1512	1068	1056
T015	3350	2980	1551	1651	1508	1095	1060

BC has strong pores and a hydrophilic surface structure, which results in a high water holding capacity. Fluid-based materials, particularly hydrophilic polymers, have the ability to absorb more than 100 times their own dry weight of water (Ul Islam et al., 2012). BC is known to form a network structure by interconnecting fibrils. Owing

to its network structure, BC has excellent mechanical and crystalline properties. Moreover, this network structure is the reason for the high porosity of BC (Ul Islam et al., 2013). The WHC and degree of swelling decreased in the T010 and T015 biocomposite structures. The WHC and degree of swelling directly decreased in response to increasing *T. sipyleus* concentration. It is hypothesized that the plant extract present in the prepared biocomposites adhered to the BC matrix, thereby closing the pores on the surface. With increasing extract concentration, the number of closed pores also increased, resulting in a significant decrease in the WHC and swelling ratio of T015. Figure 3a shows the WHC of BC, T010 and T015. Figure 3b shows the swelling ratios of BC, T010 and T015.

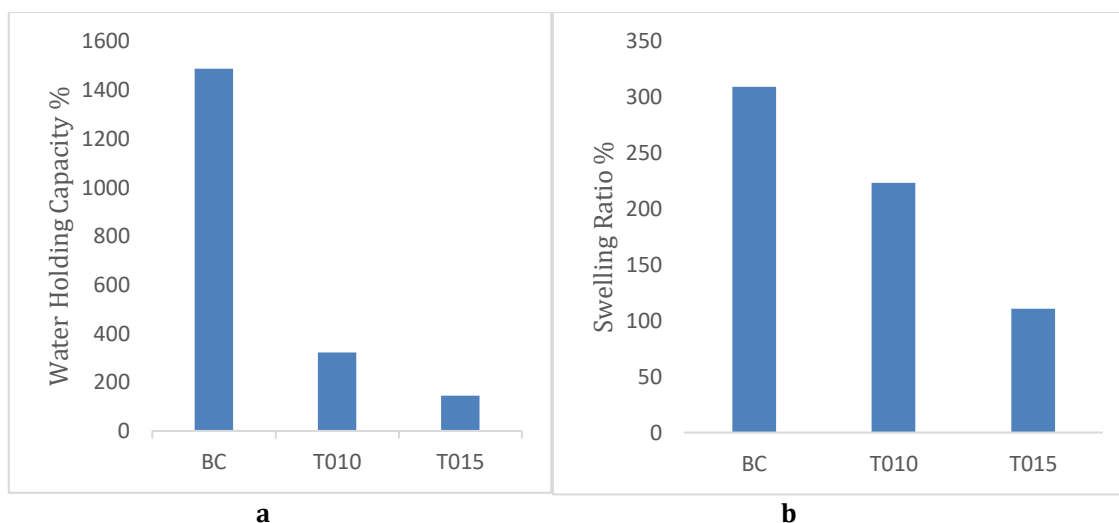


Figure 3. a) Water Holding Capacity of BC, T010 and T015, b) Swelling Ratio of BC, T010 and T015

3.3. Antibacterial Activity of BC and Biocomposites

Owing to the various phenolic compounds they contain, plant extracts play an important role because of their antibacterial properties. The literature reports that BC has no antibacterial activity and that phenolic compounds such as luteolin, caffeic acid, gallic acid, vanillic acid, kaempferol and p-hydroxybenzoic acid found in *Thymus* species have powerful antioxidant and antimicrobial activities. (Li et al., 2019; Ul Islam et al., 2023). In one study, *ex situ* modified with Bc and pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extracts and antibacterial activity tests for *E. coli* and *S. aureus* revealed %R values of 52% and 100%, respectively. The combination of Bc and pomegranate (*Punica granatum* L.) peel showed excellent antibacterial activity against *S. aureus* (Ul Islam et al., 2023). The results of the AATC100-2004 test for the antibacterial activity of BC confirm the data in the literature; the value for %R reduction is 0%. According to the AATC100-2004 antibacterial activity test, which was based on the percentage reduction in bacterial count, the percentage reduction rate of the *ex situ* modified T010 biocomposite was 84.6% for *E. coli* and 97.54% for *S. aureus*. The %R value of the T015 biocomposite was found to be 82.18% for *E. coli* and 84.45% for *S. aureus*. The results revealed that the E010 biocomposite had strong antibacterial activity against both *E. coli* and *S. aureus* strains. These findings indicate that the phenolic compounds in the *T. sipyleus* extract are more effective against *S. aureus* bacteria. In this study, increasing the concentration of *T. sipyleus* extract above 0.1% did not affect the antibacterial properties of the extract. Gram-negative bacteria are known to have an outer phospholipid membrane that is impermeable to hydrophobic (like phenolic) molecules. The antibacterial activity of the produced composites may have resulted in lower antibacterial activity against *E. coli* bacteria because *T. sipyleus* has developed resistance to plant extracts because of the outer phospholipid membranes of the bacteria (Ustuner et al., 2019). In this study, a 10% concentration was found to be the optimum value for a *T. sipyleus*-based biocomposite via *ex situ* modification with BC. The fact that the antibacterial effect did not increase at concentrations above 0.1% is probably due to saturation of the BC with the plant extract. Figure 4 shows the %R results from the antibacterial activity tests of the BC, T010 and T015 samples.

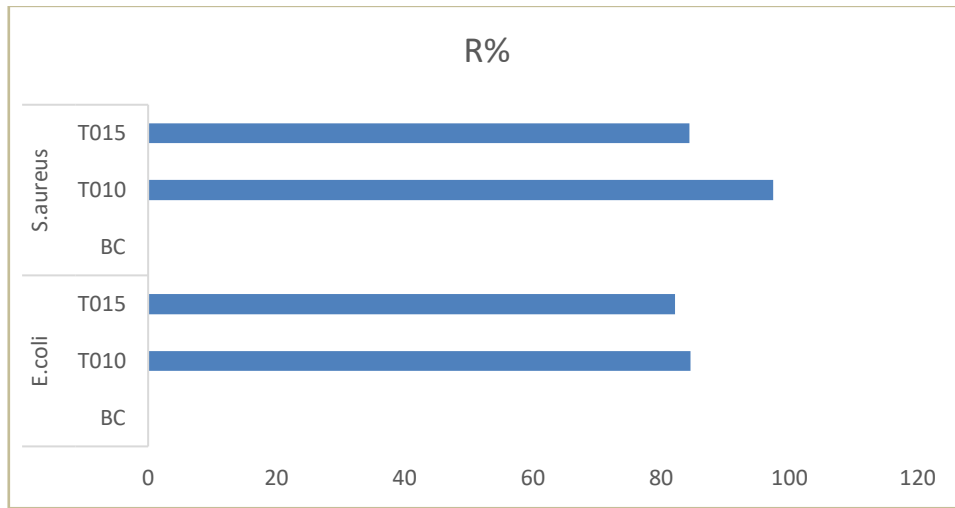


Figure 4. %R Results in AATC100-2004 Antibacterial Activity Test

The abundant porous structure of BC likely contributes positively to the development of antibacterial properties by trapping the plant extract. Figure 5 shows the AATC 100-2004 analysis of the BC and T010, T015 biocomposite structure against *E. coli*, whereas Figure 6 shows the AATC 100-2004 analysis against *S. aureus*.

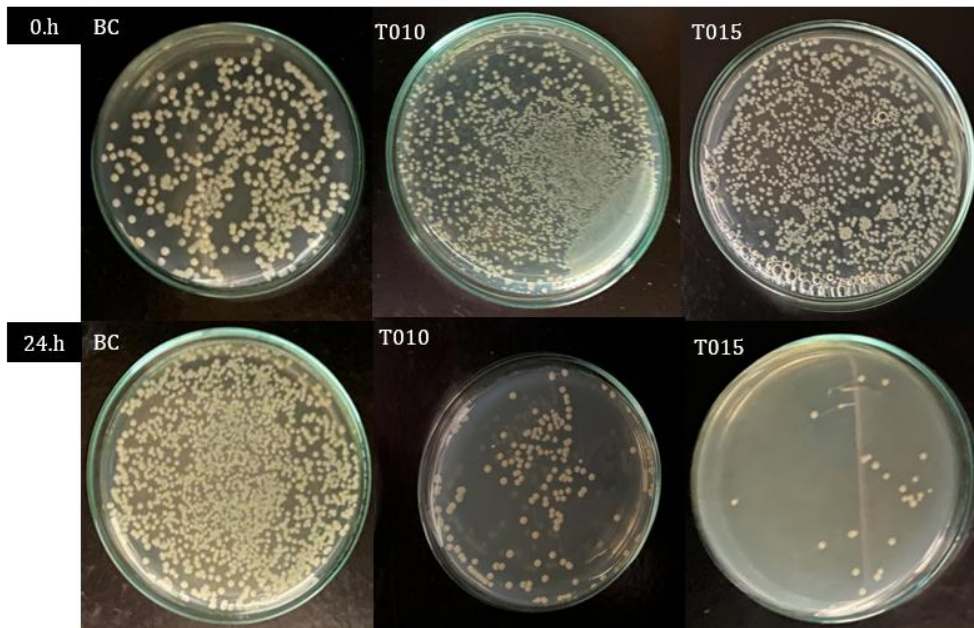


Figure 5. AATC 100 Analysis of BC, T010 and T015 Against *E. coli* at 0. h and 24. h

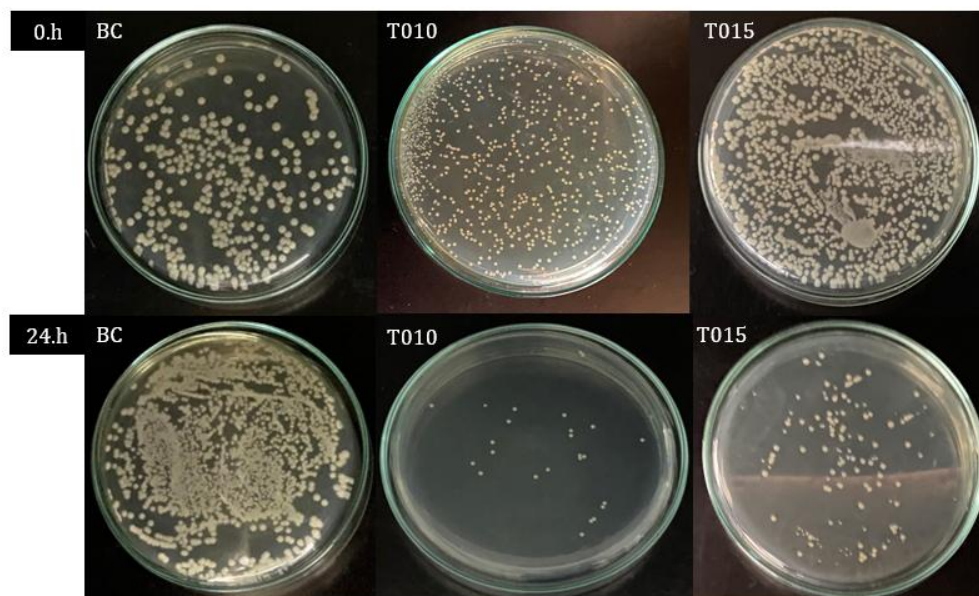


Figure 6. AATC 100 Analysis of BC, T010 and T015 Against *S. Aureus* At 0. H and 24. H

4. Conclusion

Owing to their easy availability, low price and medicinal benefits, plant extracts are known to be excellent supplements. This study was conducted to impart antibacterial properties to BC via the CH₃OH extract of *T. sipyleus*, as no similar study has been conducted with *T. sipyleus*. The BC-based antibacterial biocomposite enriched with *T. sipyleus* extract was prepared via an *ex situ* modification method. The results of the water holding and swelling ratio tests revealed that the ratio decreased with increasing extract concentration due to the closure of the pores in the BC with the *T. sipyleus* plant extract. The results of the FTIR and SEM analyses also proved that the extract was successfully incorporated into the BC matrix. The T010 obtained from the prepared biocomposites showed excellent antibacterial activity against both *S. aureus* (97.54%) and *E. coli* (84.6%). The high WHC of BC significantly increased the uptake of plant extracts, thus resulting in high antibacterial activity. The fact that the *T. sipyleus* plant extract used at a concentration greater than 0.1% did not positively increase the antibacterial activity suggests that greater antibacterial effects can be achieved with lower amounts of plant extract in future studies. On the basis of these effects, it is assumed that the biocomposites obtained can be used in the textile industry, especially in medical textiles, in products where an antibacterial effect is required and that they can lead to the development of new sustainable biocomposites.

Acknowledgement

“This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK) under the Grant Number 223M224. The authors thank to TUBITAK for their support.”

“This study is based on the doctoral thesis of the first author (Kılınc N.) under the supervision of the second and third authors (Özdemir Küçükcapraz D. and Cüce M.) at Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta, Türkiye.”

“In this study, the necessary permits for the plant used were obtained from the General Directorate of Nature Conservation and National Parks of the Ministry of Agriculture and Forestry of the Republic of Türkiye. The authors thank to the relevant institution for their support”

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Asanarong, O., Quan, V. M., Boonrungsiman, S., Sukyai, P., 2020. Bioactive Wound Dressing Using Bacterial Cellulose Loaded with Papain Composite. Morphology, Loading/Release And Antibacterial Properties. *European Polymer Journal*, 143, 110224.
- Ashjaran, A., Yazdanshenas, M., Rashidi, A., Khajavi, R., Rezaee, A., 2013. Overview of Bio Nanofabric from Bacterial Cellulose. *Journal of the Textile Institute*, 104, 121–31.

- Ashori, A., Sheykhnazari, S., Tabarsa, T., Shakeri, A., Golalipour, M., 2012. Bacterial Cellulose/Silica Nanocomposites: Preparation and Characterization. *Carbohydrate Polymers*, 90 (1), 413-418.
- Barud, H. D. S., de Araújo Júnior, A. M., Saska, S., Mestieri, L. B., Campos, J. A. D. B., De Freitas, R. M., Berretta, A. A., 2013. Antimicrobial Brazilian Propolis (EPP-AF) Containing Biocellulose Membranes as Promising Biomaterial for Skin Wound Healing. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, (1), 703024.
- Beldjilali, M., Mekhissi, K., Khane, Y., Chaibi, W., Belarbi, L., Bousalem, S., 2020. Antibacterial and Antifungal Efficacy of Silver Nanoparticles Biosynthesized Using Leaf Extract of *SITU algeriensis*. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30 (6), 2126-2133.
- Bodea, I. M., Cătunescu, G. M., Pop, C. R., Fiț, N. I., David, A. P., Dudescu, M. C., Beteg, F. I., 2022. Antimicrobial Properties of Bacterial Cellulose Films Enriched With Bioactive Herbal Extracts Obtained by Microwave-Assisted Extraction. *Polymers*, 14 (7), 1435.
- Boni, B. O. O., Lamboni, L., Bakadia, B. M., Hussein, S. A., Yang, G., 2020. Combining Silk Sericin and Surface Micropatterns in Bacterial Cellulose Dressings to Control Fibrosis and Enhance Wound Healing. *Engineered Science*, 10, 68-77.
- Brown, A.J., 1886. XLIII. On an Acetic Ferment which forms Cellulose. *Journal of the Chemical Society*, 49, 432-439.
- Cazón, P., Vázquez, M., 2021. Improving Bacterial Cellulose Films by *Ex-Situ* and *In-Situ* Modifications. A review. *Food Hydrocolloids*, 113, 106514.
- Chen, J., Chen, C., Liang, G., Xu, X., Hao, Q., Sun, D., 2019. *In Situ* Preparation of Bacterial Cellulose with Antimicrobial Properties from Bioconversion of Mulberry Leaves. *Carbohydrate Polymers*, 220, 170-175.
- Cuce, M., 2022. Investigation of color, fastness, and antimicrobial properties of wool fabrics dyed with *Rosa canina* leaf extract. *Journal of Natural Fibers*, 19, 823-834.
- Cuce, M., Kilinc, M., Kilinc, N., 2019. Investigation of Color and Antimicrobial Properties of Wool Fabrics Dyed with Polygonum Cognatum Natural Dye Extracts. 'In International 19 May Innovative Scientific Approaches Congress, Samsun, Turkey', 1, 1211-24.
- Cuce, M., Kilinc, M., Kilinc, N., Tekin, A., Kut, D., 2022. Color, Fastness, and Antimicrobial Properties of Wool Fabrics Dyed with *Helichrysum arenarium* Subsp. *aucheri* Extract. *Journal of Natural Fibers*, 19 (3), 797-809.
- Cüce, M., Basançebebi, O., 2021. Comparison of Volatile Constituents, Antioxidant and Antimicrobial Activities of *Thymus leucotrichus* (Lamiaceae) Stem and Leaves Essential Oils from Both Natural Resources and *In Vitro* Derived Shoots. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 24 (5), 1097-1112.
- Du, R., Zhao, F., Peng Q., Zhou, Z., Han, Y., 2018. Production and Characterization of Bacterial Cellulose Produced by *Gluconacetobacter xylinus* Isolated from Chinese Persimmon Vinegar. *Carbohydrate Polymers*, 194, 200-207.
- Elansary, H. O., Szopa, A., Kubica, P., Ekiert, H., Klimek-Szczykutowicz, M., El-Ansary, D. O., Mahmoud, E. A., 2020. Polyphenol Profile and Antimicrobial and Cytotoxic Activities of Natural *Mentha× piperita* And *Mentha longifolia* Populations In Northern Saudi Arabia. *Processes*, 8, 1-17.
- Elbouny, H., Ouahzizi, B., Bouhlali, E.D.T, Sellam, K., Alem, C., 2022. Pharmacological, Biological and Phytochemical aspects Of *Thymus munbyanus* Boiss. & Reut. *Plant Science Today*. 9, 399-404.
- Fatima, A., Yasir, S., Khan M. S., Manan S., Ullah M. W., Ul-Islam M., 2021. Plant Extract-Loaded Bacterial Cellulose Composite Membrane for Potential Biomedical Applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6, 26-32.
- Fatima, A., Yasir, S., Ul-Islam, M., Kamal, T., Ahmad, M. W., Abbas, Y., Yang, G., 2022. Ex Situ Development and Characterization of Green Antibacterial Bacterial Cellulose-Based Composites for Potential Biomedical Applications. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1-15.
- Fernandes, I. D. A. A., Maciel, G. M., de Oliveira, A. L. M. S., Miorim, A. J. F., Fontana, J. D., Ribeiro, V. R., Haminiuk, C. W. I., 2020. Hybrid Bacterial Cellulose-Collagen Membranes Production in Culture Media Enriched with Antioxidant Compounds from Plant Extracts. *Polymer Engineering & Science*, 60, 2814-2826.
- Gao, G., Niu, S., Li, T., Zhang, Y., Zha, X., Shi, Z., Ma, T., 2023. Fabrication of Bacterial Cellulose Composites with Antimicrobial Properties by *In Situ* Modification Utilizing the Specific Function-Suspension Containing Water-Insoluble Magnolol. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124329.
- Gupte, Y., Kulkarni, A., Raut, B., Sarkar, P., Choudhury, R., Chawande, A., Dasgupta, S., 2021. Characterization of Nanocellulose Production by Strains of *Komagataeibacter* sp. Isolated from Organic Waste and Kombucha. *Carbohydrate polymers*, 266, 118176.
- Han, J., Shim, E., Kim, H. R., 2019. Effects of Cultivation, Washing, and Bleaching Conditions on Bacterial Cellulose Fabric Production. *Textile Research Journal*, 89, 1094-1104.
- Hungund, B., Siddhan, P., Basavaraj, H., 2016. Biosynthesis of Bacterial Cellulose and Imparting Antibacterial Property Through Novel Bio-Agents Biosynthesis of Bacterial Cellulose Imparting Antibacterial Property Through Novel Bio-Agents. *Research Journal of Biotechnology*, 11, 86-93.
- İleri, T., Taşçı, F., Şahindokuyucu, F., 2010. Kombucha ve Sağlık Üzerine Etkileri. *Uludag University Journal of the Faculty of Veterinary Medicine*, 29, 69-77.
- Jiji, S., Udhayakumar, S., Rose, C., Muralidharan, C., Kadirvelu, K., 2019. Thymol Enriched Bacterial Cellulose Hydrogel As Effective Material for Third Degree Burn Wound Repair. *International journal of biological macromolecules*, 122, 452-460.
- Kamal, T., Ul-Islam, M., Khan, S. B., Bakhsh, E. M., & Chani, M. T. S., 2022. Development of plant extract impregnated bacterial cellulose as a green antimicrobial composite for potential biomedical applications. *Industrial Crops and Products*, 187, 115337.
- Khattak, W.A., Khan, T., Ul-Islam, M., 2015. Production, Characterization and Physico-Mechanical Properties of Bacterial Cellulose from Industrial Wastes. *Journal of Polymers and the Environment*, 23, 45-53.
- Kilinc, M., Ay, E., Kut, D., 2022. Thermal, Chemical and Mechanical Properties of Regenerated Bacterial Cellulose Coated Cotton Fabric. *Journal of Natural Fibers*, 19, 7834-7851.
- Kilinc, M., Canbolat, S., Merdan, N., Dayioglu, H., Akin, F., 2015. Investigation of The Color, Fastness and Antimicrobial Properties of Wool Fabrics Dyed with the Natural Dye Extracted from The Cone of *Chamaecyparis lawsoniana*. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2152-2159.

- Kilinc, N., Özdemir, Küçükçapraz, D., 2024. Production of Bacterial Cellulose Based on Bio Nonwoven / Nonwoven Composites for Medical Textile Applications. *Textile and Apparel*, 33, 357-365.
- Klemm, D., Schumann, D., Kramer, F., Heßler, N., Hornung, M., Schmauder, H. P., Marsch, S., 2006. Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application. In 'Polysaccharides II' (Ed(S): Klemm D.), Springer, Germany, Vol. 1, 49-96.
- Korkmaz, G., Kılınç, M., Kılınç, N., Kut, Y. D. 2023. The Role of Surface Modification Methods for Sustainable Textiles. In *Roadmap to Sustainable Textiles*. IntechOpen.
- Kumar, M., Kumar, V., Saran, S., 2023. Efficient Production of Bacterial Cellulose Based Composites Using Zein Protein Extracted from Corn Gluten Meal. *Journal of Food Science and Technology*, 60, 1026-1035.
- Li, X., He, T.; Wang, X., Shen, M., Yan, X., Fan, S., Wang, L., Wang, X., Xu, X., Sui, H., 2019. Traditional Uses, Chemical Constituents and Biological Activities of Plants from the Genus *Thymus*. *Chemistry Biodiversity*, 16, e1900254.
- Li, Y., Guo, J., Li, M., Tang, Y., Murugadoss, V., Seok, I., Luo, Y., 2021. Recent Application of Cellulose Gel in Flexible Sensing a Review. *ES Food Agroforestry*, 4, 9-27.
- Lin, W. C., Lien, C. C.,- Yeh, H. J., Yu, C.M., Hsu, S., 2013. Bacterial Cellulose and Bacterial Cellulose-Chitosan Membranes for Wound Dressing Applications. *Carbohydrate Polymers*, 94, 603-611.
- Llorent-Martínez, E. J., Ruiz-Medina, A., Zengin, G., Ak, G., Jugreet, S., Mahomoodally, M. F., Chiavaroli, A. 2022. New Biological and Chemical Evidences of Two Lamiaceae Species (*Thymbra capitata* and *Thymus sipyleus* Subsp. *rosulans*): *in Vitro*, *in Silico* and *ex Vivo* Approaches. *Molecules*, 27(24), 9029.
- Meftahi, A., Khajavi, R., Rashidi, A., Rahimi, M. K., Bahador, A., 2015. Effect of Purification on Nano Microbial Cellulose Pellicle Properties. *Procedia Materials Science*, 11, 206-211.
- Nadeem, M., Imran, M., Aslam Gondal, T., Imran, A., Shahbaz, M., Muhammad Amir, R., Wasim Sajid, M., Batool Qaisrani, T., Atif, M., Hussain, G., 2019. Therapeutic Potential of Rosmarinic Acid: A Comprehensive Review. *Applied Science*, 9, 3139.
- Nasr, AM., Mortagi, YI., Elwahab, NHA., Alfaifi, MY., Shati, AA., Elbehairi, SEI., Elshaarawy, RFM., Kamal, I., 2022. Upgrading the Transdermal Biomedical Capabilities of Thyme Essential Oil Nanoemulsions Using Amphiphilic Oligochitosan Vehicles. *Pharmaceutics* 14 (7), 1350.
- Ndhkala, A. R., Işık, M., Kavaz Yüksel, A., Dikici, E., 2024. Phenolic Content Analysis of Two Species Belonging to the Lamiaceae Family: Antioxidant, Anticholinergic, and Antibacterial Activities. *Molecules*, 29 (2), 480.
- Nilofar, N., Zengin, G., Acar, M., Bouyayha, A., Youssra, A., Eldahshan, O., Fahmy, N., 2024. Assessing the Chemical Composition, Antioxidant and Enzyme Inhibitory Effects of *Pentapleura subulifera* and *Cyclotrichium glabrescens* Extracts. *Chemistry, Biodiversity*, 2 (2), e202301651.
- Panggabean, H., Ahmad, S. T., Sukardi, S., Yahfizham, Y., Thahir, M. T., 2024. Bacterial Cellulose Powder as a Filler in a Matrix Composite from Oil Palm Trunk. *Journal of Fibers and Polymer Composites*, 3 (1), 33-40.
- Polat, Z. A., Tepe, B., Vural, A. 2007. *In Vitro* Effectiveness of *Thymus sipyleus* subsp. *sipyleus* sar. *sipyleus* on *Acanthamoeba castellanii* and Its Cytotoxic Potential on Corneal Cells. *Parasitology research*, 101, 1551-1555.
- Razali, NA, Conte, M, McGregor, J., 2019. The Role of Impurities in the La₂O₃ Catalysed Carboxylation of Crude Glycerol. *Catalysis Letters*, 149:1403-1414.
- Riguetto, C. V. T., de Vasconcelos, G., Rosseto, M., Krein, D. D. C., Oliveira, F., Freitas, C. P., Pizzutti, I. R., 2024. Composite Films from Steam-Exploded Gelatin and Thyme Essential Oil: Production, Characterization and Application as Coatings. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-13.
- Shirsath, S. R., Sonawane, S. H., Gogate, P. R., 2021. Intensification of Extraction of Natural Products Using Ultrasonic Irradiations a Review of Current Status. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 53, 10-23.
- Siahaan, R. C., Sitorus, M., Mulia, R., Gea, S., 2020. *In vitro* Investigation of Bacterial Cellulose/Turmeric Extract (Bc-Te) Nanocomposite for Burn Wound Dressing. '1st International Conference on Chemical Science and Technology Innovation. Indonesia', 1, 297-300.
- Song, J. E., Cavaco-Paulo, A., Silva C., Kim, H. R., 2020. Improvement of Bacterial Cellulose Nonwoven Fabrics by Physical Entrapment of Lauryl Gallate Oligomers. *Textile Research Journal*, 90,166-178.
- Stumpf, T.R., Yang, X., Zhang, J., Cao, X., 2018. *In Situ* and *Ex Situ* Modifications of Bacterial Cellulose for Applications in Tissue Engineering. *Materials Science and Engineering*, C 82, 372-383.
- Sukhtezari, S., Almasi, H., Pirsas, S., Zandi, M., Pirouzifard, M., 2017. Development of Bacterial Cellulose Based Slow-Release Active Films by Incorporation of *Scrophularia striata* Boiss. Extract. *Carbohydrate Polymers*, 156, 340-350.
- Ul-Islam, M, Ha, JH, Khan, T, Park, JK., 2013. Effects of Glucuronic Acid Oligomers on the Production, Structure and Properties of Bacterial Cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 92:360-366.
- Ul-Islam, M., Ahmad, F., Fatima, A., Shah, N., Yasir, S., Ahmad, M. W., Ullah, M. W., 2021. *Ex Situ* Synthesis and Characterization of High Strength Multipurpose Bacterial Cellulose-*Aloe vera* Hydrogels. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 601988.
- Ul-Islam, M., Alhajaim, W., Fatima, A., Yasir, S., Kamal, T., Abbas, Y., Yang, G., 2023. Development of Low-Cost Bacterial Cellulose-Pomegranate Peel Extract-Based Antibacterial Composite for Potential Biomedical Applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 123269.
- Ul-Islam, M., Khan, T., Park, J. K., 2012. Water Holding and Release Properties of Bacterial Cellulose Obtained by *In Situ* and *Ex Situ* Modification. *Carbohydrate Polymers*, 88, 596-603.
- Ustuner, O., Anlas, C., Bakirel, T., Ustun-Alkan, F., Diren Sigirci, B., Ak, S., Akpulat, H.A., Donmez, C., Koca-Caliskan, U., 2019. *In Vitro* Evaluation of Antioxidant, Anti-Inflammatory, Antimicrobial and Wound Healing Potential of *Thymus sipyleus* Boiss. subsp. *rosulans* (Borbas) Jalas. *Molecules*, 24, 3353.
- Wei, J, Wang, B, Li, Z., 2020. A 3D-Printable TEMPO-Oxidized Bacterial Cellulose/Alginate Hydrogel with Enhanced Stability Via Nanoclay Incorporation. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116207.
- Zeng, M., 2014. Bacterial Cellulose: Fabrication, Characterization and Biocompatibility Studies. Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de química, Facultat de Ciències, Doctoral Dissertation, Barselona.



DETERMINATION OF OLIVE OIL PURITY BY S PARAMETER

Güllühan IRMAK^{1*}, Emin SAPMAZ¹, Atalay KOCAKUŞAK¹, Selçuk HELHEL¹

¹ Akdeniz University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Antalya, Türkiye

Keywords

*Oil Adulteration,
Pure Oil,
Mixed Oil,
Olive Oil,
Sunflower Oil,
Electromagnetic Analysis,
Helical Antenna.*

Abstract

Vegetable oils are one of the products used in our daily lives, and the originality and purity of the oil used is important. Olive oil is highly preferred by people. Mixing different oils such as canola oil, sunflower oil, soybean oil, and other seed oils into olive oil to reduce its cost reduces its purity and leads to fraud. It is very difficult to detect these oils mixed with olive oil, and to understand whether the olive oil is pure or not when viewed visually. For the quality of the oil, values such as fluidity, base number, refractive index, acid numbers, and density must be measured, and analyzed. Extensive laboratory environments are required to control these chemical changes in oil. Instead of these laboratory environments, an easy-to-install, practical, and cost-effective electromagnetic analysis method has been proposed to determine the purity of oil. The S parameters of olive oil, sunflower oil and a mixture of the two were measured with a helix antenna between 2-4 GHz. Pure olive oil was determined by evaluating the reference S_{11} value of the antenna, and the change in S_{11} value, and resonance frequency shift when pure oil and impurity oil were present in the container. Due to mixed oil, a 12.5MHz frequency shift toward lower frequencies is observed, which shows that the proposed system can differentiate standard oil from non-standard.

ZEYTİNYAĞI SAFLIĞININ S PARAMETRESİYLE BELİRLENMESİ

Anahtar Kelimeler

*Yağ Tağşişi,
Saf Yağ,
Karışım Yağ,
Zeytin Yağı,
Ayçiçek Yağı,
Elektromanyetik Analiz,
Helix Anten.*

Öz

Bitkisel yağlar günlük hayatımızda kullandığımız ürünlerden biri olup, kullanılan yağın orijinalliği ve saflığı önemlidir. Zeytinyağı insanlar tarafından oldukça fazla tercih edilmektedir. Kanola yağı, ayçiçek yağı, soya yağı ve diğer tohum yağları gibi farklı yağların zeytinyağına karıştırılarak maliyetinin düşürülmesi saflığını azaltır ve sahtekarlığa yol açar. Zeytinyağına karışan bu yağları tespit etmek ve gözle bakıldığında zeytinyağının saf olup olmadığını anlamak oldukça zordur. Yağın kalitesi için akışkanlık, baz numarası, kırılma indisi, asit sayısı, yoğunluk gibi değerlerin ölçülüp analiz edilmesi gerekir. Yağdaki bu kimyasal değişimlerin kontrol edilebilmesi için geniş laboratuvar ortamlarına ihtiyaç vardır. Bu laboratuvar ortamları yerine, yağın saflığının belirlenmesi için kurulumu kolay, pratik ve uygun maliyetli bir elektromanyetik analiz yöntemi önerilmiştir. Zeytinyağı, ayçiçek yağı ve bu ikisinin karışımından oluşan S parametreleri 2-4 GHz arası helis anten ile ölçülmüştür. Saf zeytinyağı, antenin referans S_{11} değeri ve S_{11} değerindeki değişim değerlendirilerek belirlenmiştir. Karışık yağ nedeniyle, daha düşük frekanslara doğru 12.5MHz'lik bir frekans kayması gözlemlenmiştir, bu da önerilen sistemin standart yağı standart olmayandan ayırt edebildiğini göstermektedir.

Alıntı / Cite

Irmak, G., Sapmaz, E., Kocakuşak, A., Helhel, S., (2025). Determination of Olive Oil Purity by S Parameter, a, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(1), 177-184.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Irmak, 0009-0006-4088-1713
E. Sapmaz, 0009-0000-8324-4809
A. Kocakuşak, 0000-0002-2457-4426
S. Helhel, 0000-0002-1401-3297

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.05.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	09.11.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	08.01.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: gulluhanrmk@gmail.com, +90-539-690-2507

DETERMINATION OF OLIVE OIL PURITY BY S PARAMETER

Güllühan IRMAK^{1†}, Emin SAPMAZ¹, Atalay KOCAKUŞAK¹, Selçuk HELHEL¹

¹ Akdeniz University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Antalya, Türkiye

Highlights

- A preliminary study was carried out to determine oil purity without the need for a complex laboratory environment and instruments.
- Helix antenna was designed to measure the mixing effect of oils.
- Oil adulteration was detected by looking at S_{11} parameters there is a 12.5 MHz resonance frequency difference between olive oil and mixed oil.

Graphical Abstract

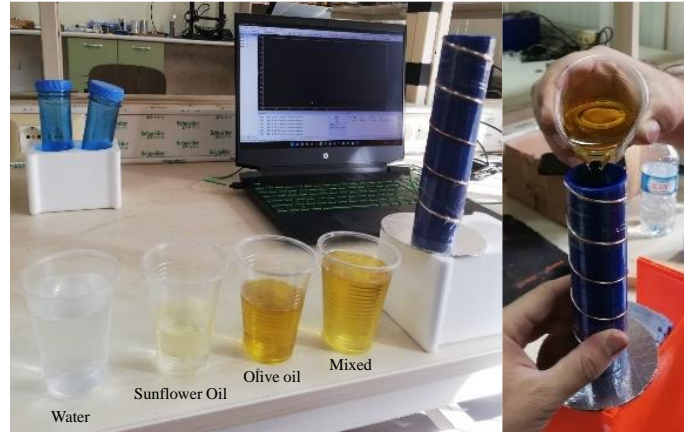


Figure. Measurement Setup

Purpose and Scope

Mixing different types of oils and liquids with pure oils causes problems in human health and economy. Preliminary studies have been carried out to develop an accessible, short, and easy analysis method to solve this problem.

Design/methodology/approach

In the system considered for the purity measurement of oils, a method that is simple and does not require complex analysis has been considered. In the proposed study, the change in the S parameters of the oils was observed with the container placed in a helix antenna operating between 2-4 GHz.

Findings

Using a helical antenna operating at 2-4 GHz specifically designed for fraud detection, an investigation was conducted to determine whether olive oil was a mixture. Initially, S_{11} parameters were measured with a Vector Network Analyzer (VNA) for sunflower oil, followed by olive oil, and then a mixture of the two oils. The resonance frequencies of the oils at S_{11} values were found to be different, indicating a distinction between the S_{11} parameter of the mixed oil and that of pure olive oil.

Practical implications

The resonance frequency shift in the S parameter with the helix antenna used was a preliminary study on oil purity, and the resonance differences of pure olive oil and mixed oil were obtained. In practice, it is thought that it can contribute to economical systems that can be developed to eliminate the need for advanced laboratory environments, devices, and sensors in terms of application. This will make it easier for the consumer to access pure oil. In future studies, with the method to be developed, it will be tried to predict which oil is the mixed oil and what percentage of the mixture it is.

Originality

There are studies on the purity of materials in various laboratories, but this study is thought to be a very accessible study in terms of applicability and ease.

[†] Corresponding author: gulluhanrmk@gmail.com, +90-539-690-2507

1. Introduction

The escalation in human population has also increased consumption, and the limited world resources, and increased competition between companies have also led to rise in imitation of products. Due to the demand for olives, which have been produced and consumed since ancient times, their value in world trade is growing day by day. Olive oil production varies from year to year and is limited, so its price is quite high compared to other oils, this high price causes olive oil to be adulterated with other cheap oils, especially in producing countries, and it is considered the most adulterated food in the world (Diraman and Tügen, 2022). Hippocrates, the father of medicine, called olive oil "the great healer" and Homer, the famous poet of ancient Greece, called it "liquid gold" (Diraman and Tügen, 2022). Increasing health awareness in the world has increased the tendency towards pure foods, and olive and olive oil trade has gained importance in world trade (Ağır et al., 2018). Adulteration plays a deceptive role in unfair competition, making a low quality food product look like high quality in terms of health, adulteration has worse consequences, and has a very important ethical dimension, especially negatively affecting babies, young children, the elderly, and patients, creating a cycle of malnutrition that affects all humanity and generations (İçyer and Durak, 2019). Consumer awareness and demand for pure products in a healthy way also necessitate controls in olive oil production. Natural olive oil is obtained from the olive tree using unique techniques, only mechanically, without compromising its purity, and can be consumed without undergoing any refining process. In this case, the refined and pomace olive oil available in the market is not pure olive oil. Pure olive oil is adulterated by adding seed oils (rapeseed, sunflower, soybean, cotton, corn, peanut, mustard, sesame, poppy, etc.) or vegetable refined blend oils (oils such as hazelnut oil, avocado oil, etc.) (Türkmen and Ataseven, 2020). Identifying these impure olive oils is important for the consumer. It is important to perform these analyzes economically and quickly, without the need for advanced laboratories and test environments. There are testing devices such as spectrometry, but they are expensive and difficult to access. Spectra obtained with this method contain the vibrations (wavenumber) of molecular bonds in the mid-infrared region 4000 to 400 cm^{-1} , since each component has its own fingerprint region, samples with different molecular bonds can be detected with different vibration frequencies (İçyer and Durak, 2019). When the literature was examined, the electrical properties of sunflower oil were obtained in real and imaginary parts of the electrical conductivity value at different temperatures between 5 MHz and 0.5 MHz (Ulrych and Mentlik, 2016). Temperature-dielectric spectroscopy of flaxseed, sunflower, mustard, rapeseed, and olive oil at 25 – 70°C and 25 Hz– 1 MHz frequency was obtained and a mechanism for hardening was proposed (Agaev et al., 2020). In another adulteration study, the dielectric properties of binary oil mixtures at different ratios were examined in the frequency range of 101 Hz to 1 MHz, and the results showed that as the concentration of oils increased, the dielectric spectrum of the binary mixture of olive oil added with other oils also increased (Lizhi, 2010). In addition, in this study, the relative dielectric constant of olive oil at 1 MHz was shown to be $3.041 \pm 1.6e04$ and $3.049 \pm 3.1e04$, varying depending on the olive species. However, the dielectric constant of sunflower oil was reported as $3.037 \pm 2.0e04$ (Lizhi, 2010). In another study, the obtained results demonstrated the feasibility of detecting adulterations of olive oil with percentages of at least 10% of sunflower and red palm oils (Xu, 2014). A rapid and simple luminescence method combined with advanced chemometric tools has been developed to characterize and classify edible vegetable oils with good predictive ability (Domínguez, 2019). In addition, a capacitive probe study was conducted based on the fluidity change in the oil to show the effects of changes in the quality of frying oil on human health (Liu et al., 2019). Besides vegetable-based edible oils, there are studies in the literature that analyse industrial oils (Yıldırım and Gözel, 2023), alcohols (Akgöl, 2018), or water mixtures of chemicals such as acetone with special targets using antenna-based sensors (Hossain et al., 2024). As expected in all of the studies, the frequency with the lowest reflection aka resonant frequency, shifts depending on the mixture of the relevant substances. In this context, when compared with this study, it is seen that different structures designed with similar hypotheses give compatible results.

Nowadays, with the developing technology, information can be obtained about the characterization of many simple or complex substances by using electromagnetic methods. Each substance has its own electrical characteristics. The identity information of substances as electrical characteristics is carried on their electrical permittivity and magnetic permeability values. In the literature, it has been observed that the relative dielectric constant for olive oil varies between 2.92 and 3.05 at 2.50 GHz levels and between 25 – 180°C (Delgado et al., 2021). Depending on the magnetic permeability and electrical permittivity values, the reflection coefficient and transmission coefficient values of the substances are calculated. The scattering parameter carries these transmission coefficient and reflection coefficient values. For this reason, material characterization can be determined based on the scattering parameter. In this paper, when the olive oil placed inside the antenna and whose purity was measured was mixed, that is, its purity was impaired, its dielectric properties changed, and this change caused a shift in the resonance frequency.

In this study, pure water, sunflower oil, olive oil and a 50% mixture of sunflower and olive oil were placed in the container inside the helical antenna and scattering parameters were measured with VNA. According to these measurement results, the purity of the oil was determined depending on the resonance frequency shift in the S_{11}

parameters. In this preliminary study, it is predicted that the proposed method to understand the purity of the oil will be accessible, easy to apply and economical.

2. Material and Method

Helix antennas are antennas mounted on the ground plane surface, wrapped in a helix from one or more wires. In this study, a ground plane surface-mounted helical antenna operating in single-wire angular mode was constructed. Geometric parameters of helix antenna as shown Figure 1 usually turn N , diameter D , each turn space S . L , C , L_0 , L_n where Helix antenna total length, circumference, each turn length, wire total length are given in the following equations (1)-(4). Pitch angle (α) which is a line tangent to the helix antenna wire and a plane perpendicular to the helix axis is given equation (5).

$$L = NS \quad (1)$$

$$C = \pi D \quad (2)$$

$$L_0 = \sqrt{S^2 + C^2} \quad (3)$$

$$L_n = NL_0 \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{S}{C}\right) \quad (5)$$

In axial mode helix design for circular polarization circumference C of the helix must be in $3/4 < C/\lambda_0 < 4/3$ range (with $C/\lambda_0 = 1$ near optimum), and the spacing about $S \cong \lambda_0/4$. The pitch angle is usually $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ (Balanis, 2012). Although as a ground plane like cupped ground plane, conical ground plane, a flat ground plane is generally used. Flat ground plane diameter is at least $\lambda_0/2$ (Kraus, 1988). (λ_0 is given operating wavelength.) In axial mode the dimensions of the helix are not critical. Therefore, parameters can be adjusted according to the desired bandwidth to get better results.

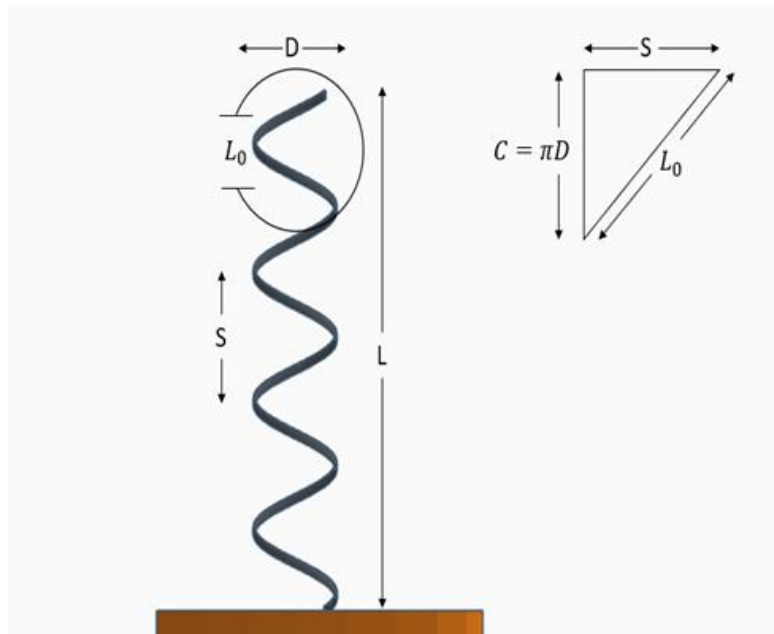


Figure 1. Helical Antenna With Geometric Parameter

The terminal resistance of the helix antenna is between 100 and 200 ohms. Since the resistance of the supply line is generally 50 ohms, impedance mismatch occurs. The purely resistive input impedance given equation (6) (Balanis, 2012).

$$R \cong 140 \left(\frac{C}{\lambda_0}\right) \quad (6)$$

In order to ensure impedance matching by eliminating the inductive reactance that occurs due to the structure of the helical antenna, a cylindrical balun with a height of $\lambda_0/8$ and a diameter of 5 mm was designed between the ground plane and the pin. The half-power beamwidth which is accurate to about $\pm 20\%$, the directivity and the axial ratio are given in the following equations (7)-(9) (Balanis, 2012).

$$HPBW(\text{degrees}) \cong \frac{52\lambda_0^{\frac{3}{2}}}{C\sqrt{NS}} \quad (7)$$

$$D_0(\text{dimensionless}) \cong 15N \frac{C^2 S}{\lambda_0^3} \quad (8)$$

$$AR = \frac{2N + 1}{2N} \quad (9)$$

According to the given equations, the helix antenna operating between 2 GHz - 4 GHz was realized by adjusting the parameters to be at the optimum level in the simulation environment. The parameters of the antenna are given in Table 1.

Table 1. Parameters Of Helix Dimensions

PARAMETERS OF HELIX	DIMENSION
D (diameter of helix)	39,47 mm
C (circumference of helix)	124 mm
S (spacing between turns)	31 mm
N (number of turns)	5
α (pitch angel)	14°
Ground diameter	93 mm
Balun diameter	5 mm
Balun height	20 mm
HPBW	55°
Directivity	9.96 dB

$$f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} \lambda_0} \quad (10)$$

The propagation of an electromagnetic wave within the material is affected by the dielectric properties of the material and the frequency of the wave is found from the given equation (10). As seen in the equation, changing the frequency also affects the wavelength. In this case, S_{11} of the antenna is also affected because in the given equation, C/λ_0 should be approximately 1 for optimum operation of the helix, where C is circumference of helix, λ_0 is wavelength. And since this value will change, shifts in the S_{11} parameter of the antenna will occur.

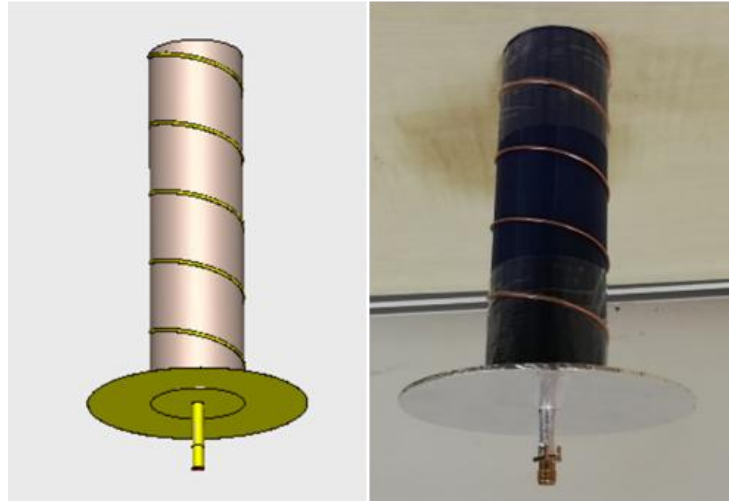


Figure 2. Designed And Realized Helix Antenna.

A helix antenna was preferred since a portable container can be placed in the middle of the helix. In this study, the modes of the antenna are not the subject of study, but the axial mode helix selection was chosen to have a container size that can be placed. A container that can be printed from a 3D printer in a simulation environment was added to the design to guide the winding of the helix antenna and to serve as a container into which olive oil can be poured. This designed and realized antenna are shown in Figure 2. When the S_{11} results of the helix antenna and the results obtained with the container added to this antenna are evaluated, while the scattering parameter of the antenna decreases by approximately 10 dB in the majority of the results, there is a slight shift in the resonance frequencies and the amplitude is improved. S_{11} results of the actual measurement taken with this design are given in Figure 3. The S_{11} parameter of the helix antenna produced with the container was measured with Libre VNA. As seen in Figure 3, despite of the losses caused by the manufacturing error, the S_{11} values are like the results obtained in the simulation.

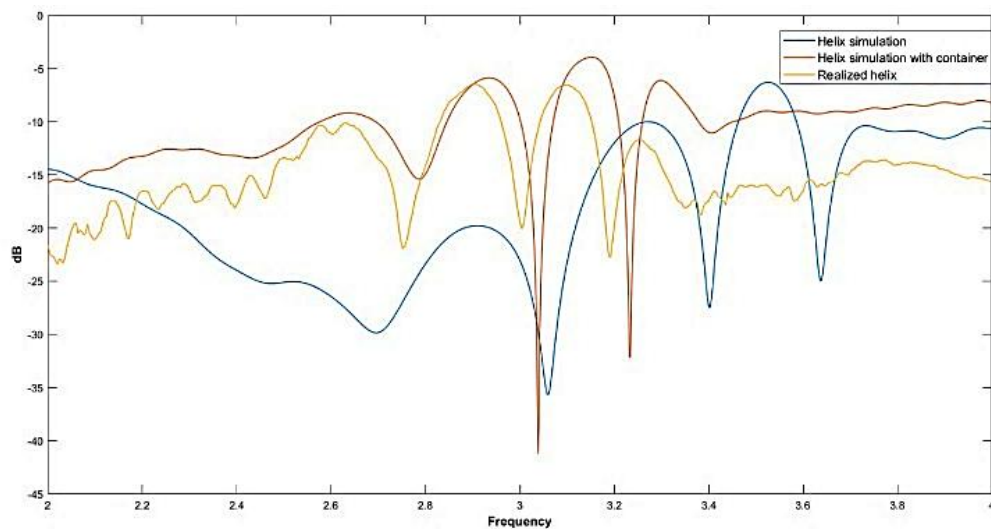


Figure 3. Helix Antenna S_{11} Parameters

Although the designed helix works best in the 2.3 GHz-3.1 GHz frequency band, it operates in the 2 GHz-4 GHz band. (except 3.45-3.58GHz). Various measurements were taken with VNA to determine the purity of olive oil with the designed antenna. These measurements were taken in equal volumes of pure water, pure sunflower oil, pure olive oil and 50% mixed olive oil and sunflower oil, respectively. Pictures of these measurement studies are shown in Figure 4.

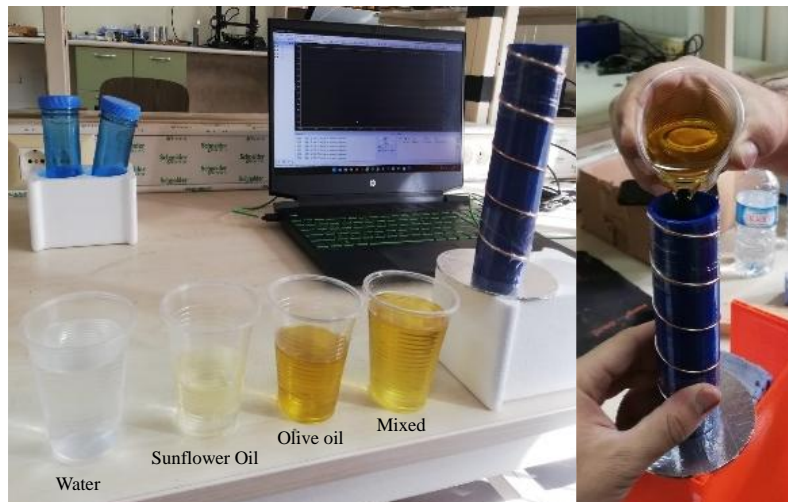


Figure 4. Measurement Setup

3. Results

Oil measurements were carried out with VNA in situations created to detect counterfeiting in olive oil. First, pure water was measured. Then, sunflower oil and then olive oil were measured. Then, olive oil and sunflower oil were mixed and measured. The frequency-dependent change of S_{11} parameters of individual oils were obtained, and then these results were plotted according to frequency, as seen in Figure 5. In this figure, the horizontal axis is frequency, and the vertical axis is dB. As seen in Figure 5, the resonance frequencies of the oils are different. At the 2.62 GHz which is not a resonance frequency of antenna, the resonance frequency that occurred after oil was lowest in mixed oil and the S_{11} parameter was -28.40 dB. At 2.63 GHz, the resonance frequency of sunflower oil occurs and the S_{11} parameter is -33.37 dB. The resonance frequency of pure olive oil was at 2.64 GHz and its S_{11} was -48.82 dB. Here it is clearly seen that different S_{11} values. Different resonance frequencies have occurred between the pure olive oil and the mixed oil. It has been observed that oils shift the resonance frequency of the antenna to the left, and there is a 12.5 MHz difference between the resonance frequency of the mixed oil and the resonance frequency of the pure oil.

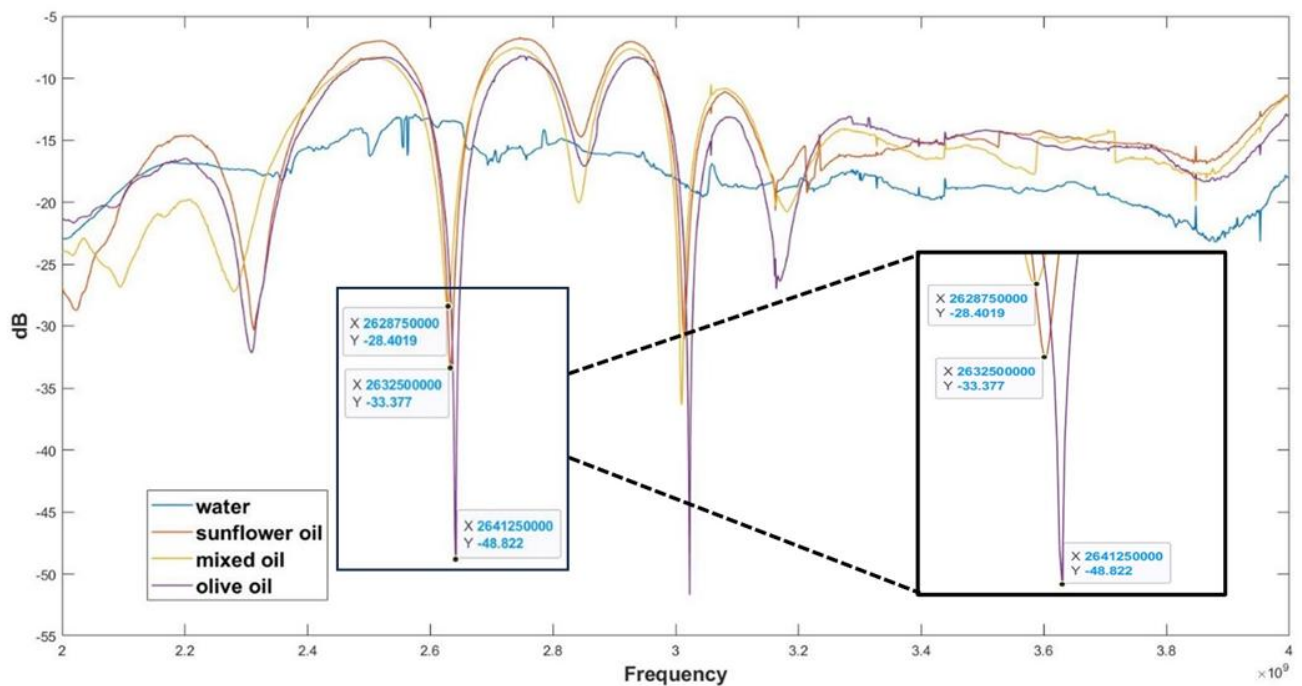


Figure 5. Measurement S_{11} Results.

4. Discussion and Conclusions

Due to limited oil resources and increasing demand for oil, olive oil counterfeiting has risen recently. Detecting this fraud is essential for the financial situation and health of the consumer. It was determined whether olive oil was a mixture with the container placed in a helical antenna operating at 2-4 GHz designed for fraud detection. First, sunflower, olive, and impure oil were obtained by mixing the two. S_{11} parameters were reached with VNA, and according to the results, the resonance frequencies of the oils at S_{11} values were different. This shows that the S_{11} parameter of the mixed oil is different from pure olive oil. According to the results obtained, the resonance frequency of pure olive oil was 2641.25 MHz, the resonance frequency of sunflower oil was 2632.50 MHz, and the resonance frequency of the oil that was a mixture of the two was 2628.75 MHz. It can be seen from here that there is a difference of 12.5 MHz between the resonance frequencies of pure olive oil and mixed oil. The resonance of olive oil is shifted to the left by 12.5 MHz.

In summary, these differences can help determine whether it is pure or not. Since it was desired to examine the limit conditions and an observable difference between the mixture and pure olive oil, the mixture ratio was chosen as half. In future work, oils other than sunflower will be added to olive oil, and dielectric studies will be carried out on them. Based on the differences, predicting which oil is added is envisaged.

Acknowledgement

Thanks to the Akdeniz University EMUMAM Directorate for using their facilities.

References

- Agaveva, S.G., Baidaa, A.A., Georgievb, O.V., Maiorovaa, O.O., and Mozyreva, A.G., 2020. Dielectric Spectroscopy of Vegetable Oils. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 93(5), 748-756.
- Ağır, M., Boran, C., Özden, F., and Artukoğlu, M. M., 2018. Zeytinyağında Tüketici Tercihleri Üzerine Bir Araştırma: İzmir İli Dikili İlçesi Örneği. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 55(4), 81-90.
- Akgöl, O., 2018. PCB Dairesel Yama Anten Tabanlı Etanol ve Metanol Algılayıcı Tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 287-296.
- Balanis, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2012.
- Dıraman, H., and Tüğen, A., 2022. Helal Bir Gıda Kaynağı Olarak: Natürel Zeytinyağlarında Taklit ve Tağşiş Tespit Çalışmaları. *Helal ve Etik Araştırmalar Dergisi*, 4 (2), 43-68.
- Domínguez, R.G., Sayago, A., Morales, M.T., and Recamales, A.F., 2019. Assessment of Virgin Olive Oil Adulteration by a Rapid Luminescent Method. *Foods*, 8(8), 287.
- Hossain, K., Dang, Y., and Cheffena, M., 2024. Nanosilver Inkjet-Printed CPW-Fed Flexible Antenna Sensor for Contactless Liquid Acetone/Water Detection. *IEEE Sensors Journal*, 24(7), 9933-9945.
- İçyer, N.C., and Durak, M.Z., 2019. Bitkisel Yağlarda Tağşiş Belirleme Metotları: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi. *Helal ve Etik Araştırmalar Dergisi*, 1(2), 138-149.
- Kraus, J.D., *Antennas*. McGraw-Hill, 1988.
- Liu, M. et al., 2019. Frying Oil Evaluation by a Portable Sensor Based on Dielectric Constant Measurement. *Sensors*, 19(24), 5375.
- Lizhi, H., Toyoda, K., Ihara, I., 2010. Discrimination of Olive Oil Adulterated with Vegetable Oils Using Dielectric Spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 96 (2), 167-171.
- Peñaloza-Delgado, R., Olvera-Cervantes, J. L., Sosa-Morales, M. E., Kataria, T. K., and Corona-Chávez, A., 2021. Dielectric characterization of vegetable oils during a heating cycle. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1480-1487.
- Türkmen, S., and Ataseven, Y., 2020. Türkiye’de Taklit ve Tağşiş Yapılan Gıdalara İlişkin Yasal Düzenlemelerin ve Uygulamaların Değerlendirilmesi. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 65-75.
- Ulrych, J., and Mentlik, V., 2016. Dielectric properties of sunflower, rapeseed and commonly used mineral oil. 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 1-4.
- Xu, Z., Morris, R.H., Bencsik, M, and Newton, M.I., 2014. Detection of Virgin Olive Oil Adulteration Using Low Field Unilateral NMR. *Sensors*, 14, 2028-2035.
- Yıldırım, M., and Gözel, M. A., 2023. Asimetrik Eş-Düzlemsel Şerit Beslemeli Anten İle Motor Yağ Seviye Ve Kullanım Ömrü Tespiti. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 11(3), 904-915.



GÖMÜLÜ SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI: KLİMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN FAN YÜKÜ UYGULAMASI

Buğra ER¹, Okan BİNGÖL^{2*}

¹ KORMAS, TOSB, Kocaeli, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar KelimelerÖz

Gömülü SMSM, Sensörsüz Kontrol, Zıt-EMK Gözlemcisi, Motor Sürücü Tasarımı. Gömülü sabit mıknatıslı senkron motorlar (GSMSM), verimlerinin yüksek olması, yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları, düşük bakım gerektirmeleri, hızlı tepki süreleri ve yüksek dinamik performansına sahip olmalarından dolayı fan, pompa ve iklimlendirme gibi endüstriyel uygulamalarda son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu motorların kontrolü için gerçek zamanlı konum ve hız bilgisi sensörlerden elde edilmektedir. Sensörlerin maliyeti, ağırlıkları ve hacimleri, güvenilirliği ve dayanımları gibi durumlardan dolayı gömülü SMSM larda sensörsüz kontrol yöntemleri araştırmacılar için ilgi odağı haline gelmiştir. Bu çalışmada, araçlardaki klima sistemlerinde kullanılmak üzere gömülü sabit mıknatıslı senkron motorların performansını ve verimini artırmak için hem motor sürücü tasarımı hem de motorun sensörsüz kontrolüne ait uygulama gerçekleştirilmiştir. Gömülü SMSM' un hız kontrolünde alan yönlendirmeli kontrol yöntemi kullanılmıştır. Düşük maliyet, dayanıklılık ve iyi performans elde edebilmek için Luenberger tipi sensörsüz kontrol yöntemi kullanılmıştır. Akım ve gerilim bilgileri kullanılarak Zıt-EMK yöntemi ile gömülü SMSM' un rotor konumu ve hız bilgisi elde edilmiştir. Gömülü SMSM klasik iki-seviyeli inverter tarafından beslenmiştir. İnverterdeki yarıiletken güç anahtarların kontrolü için uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniği kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen sensörsüz kontrol tekniğinin gömülü SMSM' ları için endüstriyel fan uygulamalarında yüksek performans gösterdiğini doğrulamaktadır.

INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVER DESIGN: FAN LOAD APPLICATION USED IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

Keywords

Interior PMSM, Sensorless Control, Back-Emf Observer, Motor Drive Design.

Abstract

Interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) have gained significant popularity for industrial applications such as fans, pumps, and air conditioning system, owing to their high efficiency, power density, low maintenance, quick response, and dynamic performance. For controlling these motors, real-time position and speed data are typically obtained via sensors. However, the associated costs, added weight, increased volume, and potential reliability issues have driven interest in sensorless control methods for IPMSMs. This study aims to enhance the performance and efficiency of an IPMSM designed for automotive air conditioning systems, in which involves the implementation of both motor driver design and sensorless control. The field-oriented control (FOC) method is employed for the speed control of the IPMSM. To maintain low costs and ensure durability and high performance, a Luenberger-type sensorless control method is used. The rotor position and speed information are derived using the Back-EMF method, based on current and voltage data. The IPMSM is driven by a conventional two-level inverter, with the SVPWM technique managing the semiconductor power switches. Experimental results confirm that proposed sensorless control technique of IPMSMs conducted the high performance in industrial fan applications.

Alıntı / Cite

ER, B., Bingöl, O., (2025). Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Driver Design: Fan Load Application Used in Air Conditioning Systems, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(1), 185-201.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Er, 0000-0002-3982-5654
O. Bingöl, 0000-0001-9817-7266

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.07.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	04.10.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	08.01.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: okanbingol@isparta.edu.tr, +90-246-214-67-57

INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVER DESIGN: FAN LOAD APPLICATION USED IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

Buğra ER¹, Okan BİNGÖL^{2†}

¹ Kormas, TOSB, Kocaeli, Turkey

² Electrical-Electronics Engineering, Technology Faculty, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Turkey

Highlights

- Developed sensorless control for interior PMSMs using a back-EMF observer.
 - Improved efficiency and dynamic response in motor drives.
 - Validated through simulations and experimental setups.
 - Reduced system cost and complexity in industrial applications.
-

Purpose and Scope

The aim of this study is to develop and validate sensorless control methods for permanent magnet synchronous motors (PMSMs), with a particular focus on a back-EMF observer-based technique. The scope encompasses the mathematical modeling, simulation, and experimental validation of these methods across different industrial applications.

Design/methodology/approach

This research employs a comprehensive methodology, beginning with the transformation of PMSM's three-phase (abc) system to a two-phase (dq) reference frame. A Luenberger observer-based back-EMF observer is designed and tested through simulations and experimental setups to estimate rotor position and speed without mechanical sensors.

Findings

The findings indicate that the proposed sensorless control strategies offer high efficiency, reduced torque ripple, and improved dynamic response compared to traditional sensor-based methods. The results validate the effectiveness of the back-EMF observer in various operational conditions.

Research limitations/implications

The research is limited to specific types of interior PMSMs and control hardware. Future studies should explore the application of these techniques to other motor types and configurations to enhance generalizability.

Practical implications

The implementation of sensorless control techniques can reduce the cost and complexity of motor drive systems, leading to more robust and maintenance-free industrial applications.

By improving the efficiency and reliability of motor control systems, the research contributes to energy savings and sustainability, benefiting industries and society at large.

Originality

This study offers a novel approach to interior PMSM control by integrating a back-EMF observer into sensorless FOC systems, providing a cost-effective and efficient alternative to traditional sensor-based methods.

[†] Corresponding author: okanbingol@isparta.edu.tr, +90-246-214-67-57

1. Introduction

Permanent magnet synchronous motors (PMSM), which combine the best features of conventional direct current and alternating current motors, are becoming increasingly popular in the AC adjustable drive field due to the quick advancements in control technology, power electronics, converters, microprocessors, sensors, and permanent magnetic materials (Krishnan, 1987; Volpato et al., 2021; Zhang, 2022; Saleh et al., 2023). As PMSMs' rotors are made of magnets rather of windings, they may obtain the excitation flux without the need for an external excitation source. They also have a simpler construction than the typical motors used in the industry because they don't include parts like brushes and collectors that are present in direct current motors (Aydoğmuş & Sunter, 2012; Wang et al., 2019; Saleh et al., 2023).

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely used in a wide range of industrial applications where low-to-medium power positioning is required. Robotics, machine tools, healthcare, Heating, Ventilation & Air Conditioning (HVAC), home appliances, electric/hybrid cars, renewable energy systems, transportation, and the aerospace and defense sectors are some of these applications (Yan et al., 2019; Ullah et al., 2022). According to Krishnan (1987), Elmas and Ustun (2008), Song et al. (2016), Saleh et al. (2023), compact design, high torque-to-weight and torque-to-inertia ratios, high power factor, high efficiency, smooth torque at high and low speeds, quick acceleration and deceleration, low noise, low maintenance requirements, and no rotor losses are some of the benefits of PMSMs. Other benefits include these advantages.

For these doubly excited electric machines, the synchronous speed of rotation is determined by the number of poles on the motor and the frequency of voltage applied to the stator windings. In synchronous motors, the stator magnetic field is produced by a three-phase AC voltage source supplied to the stator windings, while the rotor magnetic field is produced by permanent magnets installed on the rotor (Aydoğmuş and Sunter, 2012).

The two types of PMSMs are identified by the placement of the permanent magnets on the rotor: Surface PMSMs (SPMSMs) and Interior PMSMs (IPMSMs). In SPMSMs, permanent magnets are placed on the rotor's exterior, whereas in IPMSMs, they are integrated into the rotor (Sen, 1990, Wang et al., 2019, Jung et al., 2023). SPMSMs and IPMSMs are more efficient than conventional motors because they use permanent magnets rather than rotor windings. IPMSMs have reluctance torque in addition to magnetic torque, which makes them more efficient than SPMSMs. The same magnetic volume is intended for both SPMSMs and IPMSMs. Despite having nearly identical stator structures to other motors, SPMSMs and IPMSMs are more expensive because their rotor structures are made of different materials. The permanent magnets in SPMSMs become dislodged due to large centrifugal forces applied at high speeds. Because stainless steel keeps the permanent magnets from moving under centrifugal forces, SPMSMs are more expensive than IPMSMs. As a result, in recent years, academics, scientists, and engineers have become increasingly interested in IPMSMs because of their reduced cost, strong starting torque, quick response times, and good dynamic performance (Murakami et al., 1999, Noguchi, 2007, Rahman et al., 2008, Genduso et al., 2010). The cross-sections of SPMSM and IPMSM motors are displayed in Figure 1.

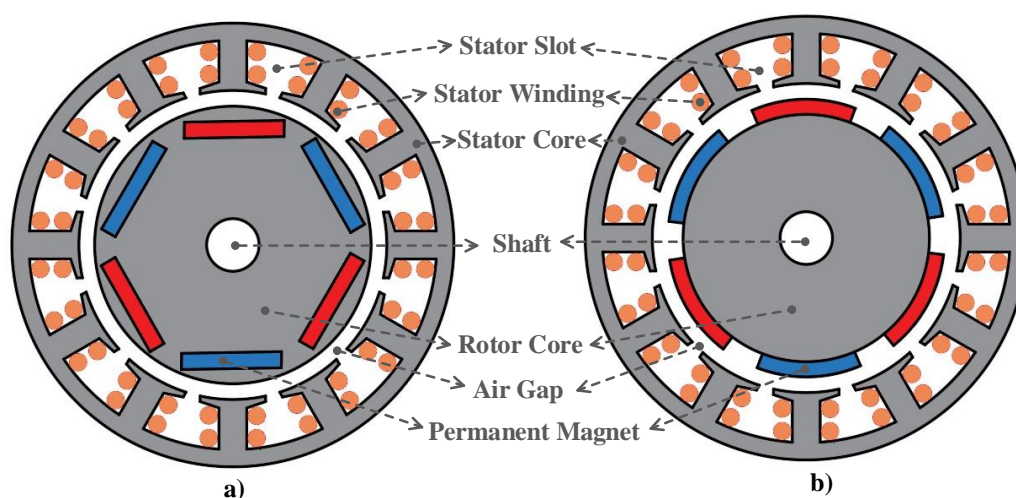


Figure 1. Cross-Sections Of Motors A) IPMSM B) SPMSM

One popular vector control method for permanent magnet synchronous motors (PMSMs) is the field-oriented control (FOC) method (Krishnan, 1987; Ullah et al., 2022; Zhang Z, 2022; Vidlak, 2022). To establish motor control, this method entails utilizing the d-q axis transformation to convert the three-phase motor equations into a two-dimensional vector plane (Sen, 1990; Güngör et al., 2010; Wang et al., 2019; Saleh et al., 2023).

Typically, sensors such as photoelectric encoders and Hall effect sensors are mounted on the rotor shaft to obtain real-time rotor position and speed information in PMSMs. However, the inclusion of these sensors adds complexity, cost, weight, and volume to the motor and driver system, while reducing reliability and robustness. To overcome these challenges, researchers have focused on developing sensorless control methods to achieve low-cost, durable, and high-performance PMSMs (Wang et al., 2019; Volpato et al., 2021; Genduso et al., 2010; Song et al., 2016; Zhang, 2022; Saleh et al., 2023). Sensorless control aims to derive rotor position and speed information from measured electrical quantities such as voltage and current (Piippo et al., 2009; Genduso et al., 2010). To get real-time rotor position and speed data in PMSMs, sensors like Hall effect sensors and photoelectric encoders are typically installed on the rotor shaft. Nevertheless, the motor and driver system's complexity, cost, weight, and volume are increased with the addition of these sensors, at the expense of their robustness and reliability. In order to address these issues and produce low-cost, long-lasting, and high-performing PMSMs, researchers have concentrated on creating sensorless control techniques (Wang et al., 2019; Volpato et al., 2021; Genduso et al., 2010; Song et al., 2016; Zhang, 2022; Saleh et al., 2023). By measuring electrical parameters like voltage and current, sensorless control seeks to extract information about the rotor's location and speed (Piippo et al., 2009; Genduso et al., 2010). Numerous sensorless control methods for PMSMs are extensively studied in the literature.

Two general approaches can be used for sensorless rotor position estimation in PMSMs (Song et al., 2016; Volpato et al., 2021). Among these is the saliency-based sensorless control approach, which works well at low speeds and determines position via motor reluctance through high-frequency injection (Zhang G. et al., 2017; Vidlak, 2022). Saliency-based techniques are further separated into two categories: fundamental PWM excitation-based (Zhang H. et al., 2020) and signal injection-based (Zhang X. et al., 2017). Some of the widely used methods are Zero Sequence Current Derivatives Measurements (Hind et al., 2017), Rotating Signal Injection (Kim et al., 2016), Pulsating Signal Injection (Luo, 2016), Zero Voltage Vector Injection (Wang G. et al., 2018), and Indirect Flux Detection by On-line Reactance Measurement (Schroedl, 1996).

The model-based sensorless control method, which computes the PMSM's flux or electromotive force in direct proportion to rotor position, is employed for high-speed ranges (Wang G. et al., 2019). Several notable techniques have been proposed (Aydoğmuş and Sunter, 2012; Ni et al., 2017; Wang G. et al., 2019; Volpato et al., 2021; Zhang Z, 2022). These include the Kalman Filter (Borsje et al., 2005), Extended Kalman Filter (Quang N. K., 2014), Luenberger Observer (Henwood et al., 2012), Sliding Mode Observer (Kim H. et al., 2011), Model Reference Adaptive Systems (Abo-Khalil et al., 2021), Artificial Neural Network-based Observer (Tan et al., 2021), and Fuzzy Logic Systems (Yan et al., 2019).

One popular sensorless control method for PMSMs is the Back EMF method (Genduso et al., 2010; Wang and Blaabjerg, 2012; Zhang Z, 2022; Vidlak, 2022). Using motor current and voltage data, this method determines the voltages induced in the stator windings by the magnets. Rotor position and speed data are then obtained (Wang Q. et al., 2019).

Reducing the harmonic components of voltage and current at voltage-fed inverters' output is essential in PMSM systems. These harmonics can be reduced by using a variety of PWM techniques at high switching frequencies (Liang et al., 2014; Bingol and Elmas, 2017). Due to its effective use of the input DC bus voltage, smaller switching losses, and fewer harmonic components in the output voltage, the Space Vector PWM approach has become more and more popular among them (Yan et al., 2019; Huang et al., 2023).

In this work is developed a sensorless control application for vehicle air conditioning systems using an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). The IPMSM was selected because to its great dynamic performance, quick response times, high starting torque, and inexpensive cost. The IPMSM's speed was managed using the field-oriented control approach. A sensorless control approach of the Luenberger type was used to achieve low cost, durability, and good performance. The Back EMF technique was utilized to ascertain the IPMSM's rotor position and speed using current and voltage data. A traditional two-level inverter that used the SVPWM approach to regulate the inverter's semiconductor power switches provided power to the IPMSM.

There are seven sections in this research, starting with the introduction. The IPMSM's mathematical model is presented in Section 2. The control architecture of the sensorless FOC controller with the Luenberger-type Back EMF observer is explained in Section 3. The use of Space Vector PWM to regulate a traditional two-level inverter is described in Section 4. The PMSM driver's design is given in Section 5. The findings of the experiment are shown in Section 6. Conclusions are given in Section 7.

2. Mathematical Model

Mathematical models have been developed for the two-phase dq and three-phase abc systems in order to understand the field-oriented control of a PMSM (Sen, 1990; Güngör et al., 2010; Wang et al., 2019; Saleh et al.,

2023). The analogous circuit for the stator windings of a three-phase, star-connected IPMSM is depicted in Figure 2. Figure 2 shows the induced back-EMF in the stator windings as e_a , e_b , and e_c .

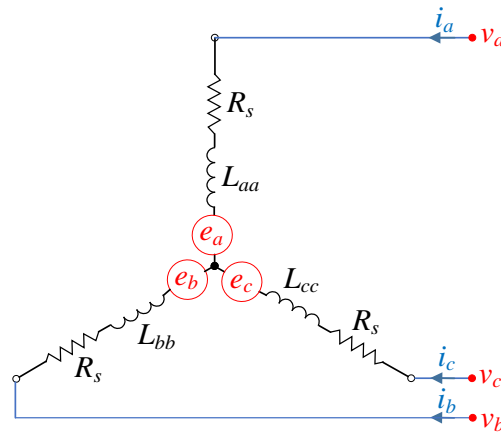


Figure 2. Three-Phase Equivalent Circuit Of IPMSM Stator Windings

In a three-phase, star-connected IPMSM with a rotor connected to a permanent magnet, the stator windings have a 120° phase difference, and the phase windings are assumed to be balanced. The stator voltages of the IPMSM in matrix form are shown in Equation 1 (Vidlak, 2022).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

The stator phase voltages in this case are v_a , v_b , and v_c ; the stator winding resistances are $R_a = R_b = R_c = R_s$; the stator phase currents are i_a , i_b , and i_c ; and the stator flux linkages are ψ_a , ψ_b , ψ_c .

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_m \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} represent the self-inductances of the phase windings, $L_{ab} = L_{ba}$, $L_{bc} = L_{cb}$, $L_{ac} = L_{ca}$ represent the mutual inductances between the phase windings, ψ_m is the magnetic flux of the permanent magnet, and θ_e is the electrical position of the rotor. By applying the Clarke and Park transformations to the three-phase voltages (Equation 1) and flux linkages (Equation 2), the dq reference frame is obtained.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

Here, the stator voltage's dq components are represented by v_d and v_q . ω_e is the electrical angular speed of the rotor; ψ_q and ψ_d are the dq components of the equivalent magnetic flux; and i_d and i_q are the dq components of the stator current.

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \psi_m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Here, L_d and L_q are the dq components of the synchronous inductance. Substituting the equivalent magnetic flux components ψ_q and ψ_d from Equation 4 into Equation 3 yields Equation 5.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -L_q \\ L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \omega_e \psi_m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

The electromagnetic torque is given by Equations 6 and 7.

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \tag{6}$$

Here, p is the number of pole pairs.

$$T_e = J \frac{d}{dt} \omega_e + T_L + B\omega_e \tag{7}$$

Here, J is the moment of inertia, B is the coefficient friction, T is the electromechanical torque, T_L is the load torque, and p is the motor's pole count. The IPMSM parameters are displayed in Table 1.

Table 1. Parameters Of IPMSM.

Parameter	Value
Rated speed	3100 d/d
Rated power	180 W
Rated voltage	26 V
Rated current	7 A
Pole pairs	4
Stator resistance	0.0282124 Ω
Stator winding factor	0,866025
PM material	N35H

3. Sensorless FOC With Luenberger-Type Back-EMF Observer

Figure 3 shows the block design of the sensorless FOC with a back-EMF observer of the Luenberger type.

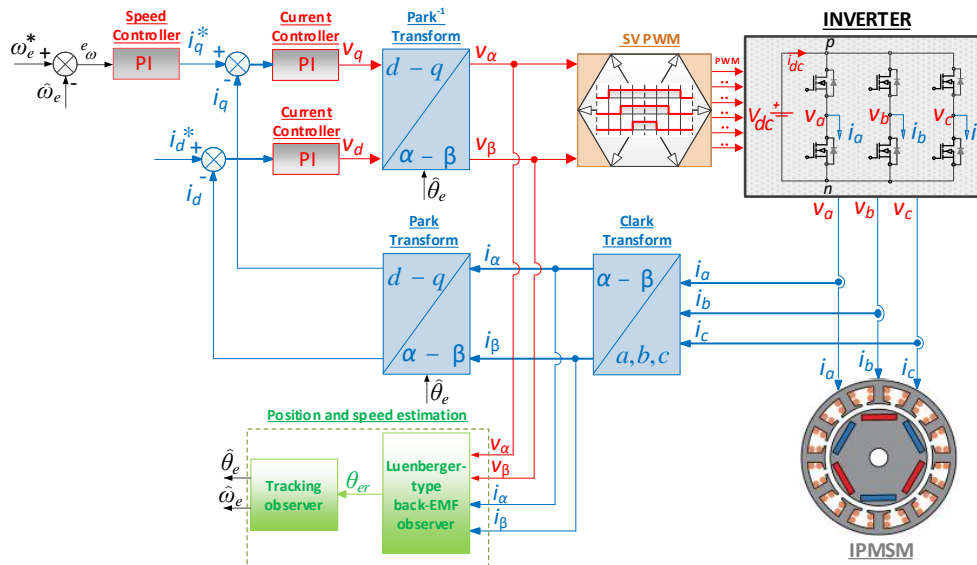


Figure 3. Block Diagram Of The Sensorless FOC Using A Back-EMF Observer Of The Luenberger Type

The saliency-based sensorless control approach is effective at low or zero speed ranges, but increases losses, torque ripples, and acoustic noise because of the injected signal. Furthermore, the maximum output voltage of the inverter may be limited by the injected signal at high operating speeds. Consequently, it is advised to only employ model-based techniques above a particular speed and to reserve the usage of injected signal-based approaches for low and zero-speed ranges (Wang G. et al., 2019). EMF and flux data can be directly computed in the model-based sensorless control method utilizing either open-loop or closed-loop techniques. Because of closed-loop estimation's high accuracy and resilience, it is recommended. For the purpose of estimating position and speed, accurate EMF or flux measurement is essential (Wang G. et al., 2019). EMF or flux can be measured when the observer error is close to zero, which enables precise position and speed calculation. In order to increase estimation accuracy, a position/speed observer is traditionally recommended. proportional-integral (PI) type

Luenberger observer can be used to force the position error signal to zero in order to get position/speed information (Wang G. et al., 2019).

The sensorless method's main goal is to calculate the back-EMF voltage in order to determine the rotor position. It is possible to rewrite Equation 5 as Equation 6.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d s & R_s + L_q s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \psi_m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

In this equation, "s" signifies the Laplace operator. The mathematical model in the dq reference frame alone cannot determine the rotor position. To estimate the position error θ_{er} , the $\gamma\delta$ reference frame, which lags behind the dq reference frame, is obtained. The reference frames are shown in Figure 4.

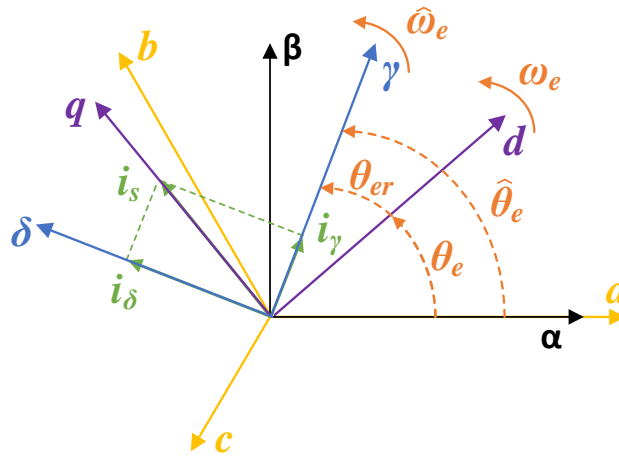


Figure 4. Reference Frames Of IPMSM

Equation 8 can be rearranged as shown in Equation 9.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d s & R_s + L_q s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + E_{ex} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Equation 10 defines E_{ex} , as the extended EMF (EEMF) term.

$$E_{ex} = \omega_e [(L_d - L_q)i_d + \psi_m] - (L_d - L_q)\omega_e i_q \quad (10)$$

The voltage equations from Equation 9 are converted from the dq reference frame to the $\gamma\delta$ reference frame, as shown in Equation 11.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d s & R_s + L_q s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (11)$$

Here, e_γ and e_δ are the components of the EEMF in the $\gamma\delta$ reference frame.

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{er}) \\ \cos(\theta_{er}) \end{bmatrix} + (\hat{\omega}_e - \omega_e)L_d \begin{bmatrix} -i_\delta \\ i_\gamma \end{bmatrix} \quad (12)$$

Here, $\hat{\omega}_e$ is the estimated rotor speed. The second portion of Equation 12 can be disregarded under the steady-state condition if there is no inaccuracy between the estimated and real rotor speeds, $\hat{\omega}_e$ and ω_e , respectively. The estimated $\gamma\delta$ components of the EEMF can be expressed as in Equation 13.

Here, $\hat{\omega}_e$ represents the estimated rotor speed. Under steady-state conditions, the second term in Equation 12 can be disregarded, assuming the error between the estimated rotor speed $\hat{\omega}_e$ and the actual rotor speed ω_e is negligible. Thus, the estimated $\gamma\delta$ components of the back-EMF can be written as in Equation 13.

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\gamma \\ \hat{e}_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{er}) \\ \cos(\theta_{er}) \end{bmatrix} \tag{13}$$

θ_{er} , the estimated rotor position error, can be obtained using the arctan function as shown in Equation 14.

$$\theta_{er} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta} \right) \tag{14}$$

The tracking observer, which includes a back-EMF observer, is a crucial part of sensorless FOC. If the observer output has an estimation error θ_{er} , a structure is needed to force this error to zero ($\theta_{er} = 0$) (Vidlak, 2022). This criterion can be satisfied by the PLL observer, which offers zero displacement between the calculated $\gamma\delta$ and dq reference frames. The estimated position $\hat{\theta}_e$ and speed $\hat{\omega}_e$ are the PLL observer's outputs. The schematic of the back-EMF and tracking observer, which includes the PLL mechanism, is displayed in Figure 5.

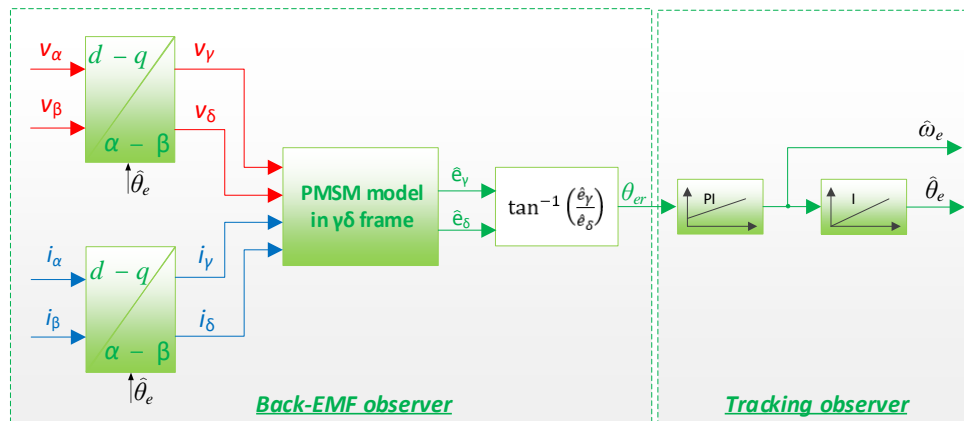


Figure 5. Diagram Of The Tracking Observer And Back-EMF Using The PLL Mechanism

4. Space Vector PWM

Three-phase systems can be transferred to two-phase planes (α - β) with a 90° phase difference between them. Space vector PWM modulation is based on the space vector representation of voltages in the (α - β) plane (Broeck et al., 1988). Additionally, space vector PWM modulation can be used to generate output voltages in three-phase voltage-source inverters by sequentially switching the basic space vectors. The three-phase voltages of the machine are represented as the space vector reference voltage (v_{ref}) in the (α - β) planes. This situation is mathematically expressed in Equation 15.

$$v_{ref} = v_\alpha + jv_\beta = (2/3)(v_a e^{j0} + v_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + v_c e^{-\frac{j2\pi}{3}}) \tag{15}$$

In classical two-level inverters, the level of the output voltage waveform consists of two levels, with each phase leg having two switches, making a total of six switches in the inverter. These switches are turned on or off sequentially throughout the period. The three-phase two-level voltage-source inverter is shown in Figure 6. The voltages v_a , v_b and v_c are applied to the stator phase windings of the IPMSM.

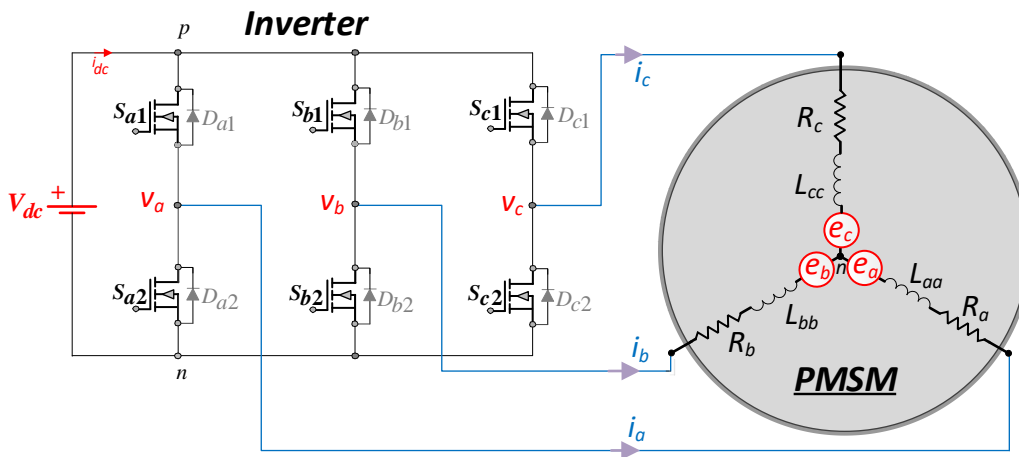


Figure 6. Three-Phase Two-Level Voltage-Source Inverter

Each phase (leg) of the inverter has two semiconductor power switches ($S_{a1} - S_{a2}$, $S_{b1} - S_{b2}$ and $S_{c1} - S_{c2}$). When one switch is on, the other must be off. The inverter can have three switching variables (a, b, and c). The total number of switching states in a two-level inverter is ($n^3 = 2^3 = 8$). In the switching states (S_{ax}, S_{bx}, S_{cx}) shown in Table 2, '1 or p' indicates the upper switch of a phase leg is on, and '0 or n' indicates the lower switch of a phase leg is on.

Table 2. Switching States Of The Two-Level Voltage-Source Inverter

Voltage Vector	Switch State					
	S_{ax}		S_{bx}		S_{cx}	
v0	0	n	0	n	0	n
v1	1	p	0	n	0	n
v2	1	p	1	p	0	n
v3	0	n	1	p	0	n
v4	0	n	1	p	1	p
v5	0	n	0	n	1	p
v6	1	p	0	n	1	p
v7	1	p	1	p	1	p

Figure 7 shows the space vector voltage representation of the two-level, three-phase voltage source inverters on the (α and β) plane.

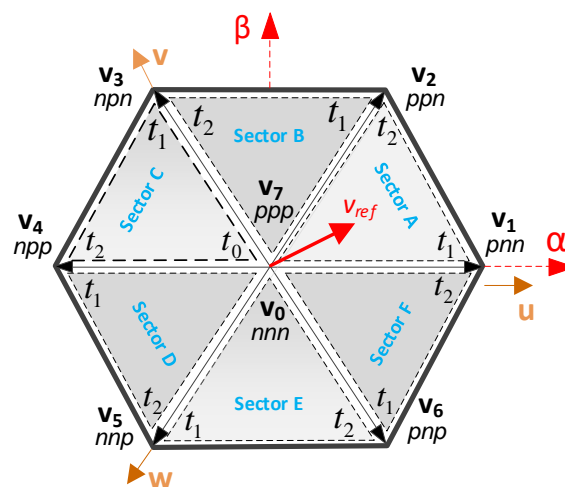


Figure 7. The Three-Phase, Two-Level Inverter's Space Vector Voltages

The reference voltage vector for Sector A is shown in Figure 8.

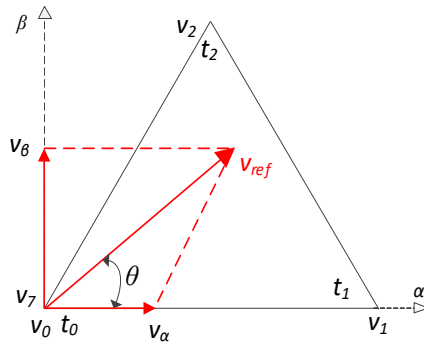


Figure 8. Reference Voltage Vector For Sector A

The durations of the voltage vectors can be found using Equations 16 and 17.

$$v_{ref}T_s = v_1t_1 + v_2t_2 + v_0t_0 \tag{16}$$

$$T_s = t_1 + t_2 + t_0 \tag{17}$$

Here, v_1, v_2, v_0 are the voltage vectors in Sector A, T_s is the sampling time, t_1, t_2, t_0 are the switching times of the voltage vectors v_1, v_2, v_0 respectively, and v_α, v_β are the real and imaginary parts of the v_{ref} voltage vector. The three-phase PWM waveforms for Sector A are shown in Figure 9. Symmetric waveforms are used for the switching sequence in each sector.

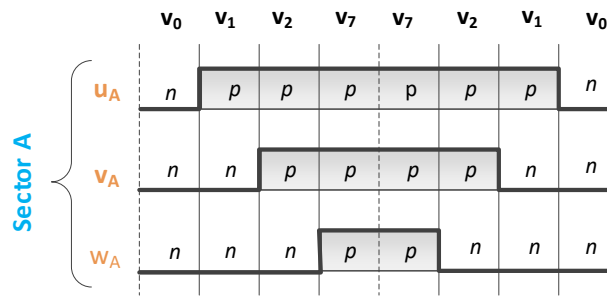


Figure 9. Three Phase PWM Waveforms Of Sector A

5. IPMSM Driver Circuit

Enhancing the effectiveness and performance of IPMSMs is largely dependent on the design and control of the motor driver. The motor driver board includes a microcontroller, power module, gate drivers, hardware protection circuits, current sensing circuits, and voltage sensing circuits. Component selection and board design directly affect the driver outputs.

5.1. Microcontroller

The performance of microcontroller-based controllers is critical in controlling the dynamics such as speed, position, or torque of electric machines (Ravigan et al., 2017). The STSPIN32F0251 microcontroller provides ADC and PWM outputs. In this study, based on a 48MHz controller frequency, a 14MHz ADC frequency and a 48MHz clock for the PWM in the APB structure were chosen. Data sampled during an ADC module sampling period is processed and used for the PWM module output. ADC and PWM must be synchronized to operate at the same speed.

The STSPIN32F0251 has six PWM modules within one counter structure. PWM techniques are commonly employed in motor control applications to regulate the output voltage's frequency and amplitude. The controller frequency, processed through the PSC (Prescaler), is applied to the motor as the switching frequency. CCR (capture compare register) and ARR (auto reload register) are used to control the PWM duty cycle.

5.2. Power Modules

The power module design, shown in Figure 10, uses the FDD86567 MOSFET from ONSEMI. The FDD86567 can handle 60V and 100A at 25°C, with an internal resistance of 3.2mΩ. Each phase uses two MOSFETs in a half-bridge configuration. During gate charging, a 12Ω resistor is used, while a 1N4148 is used during discharging.

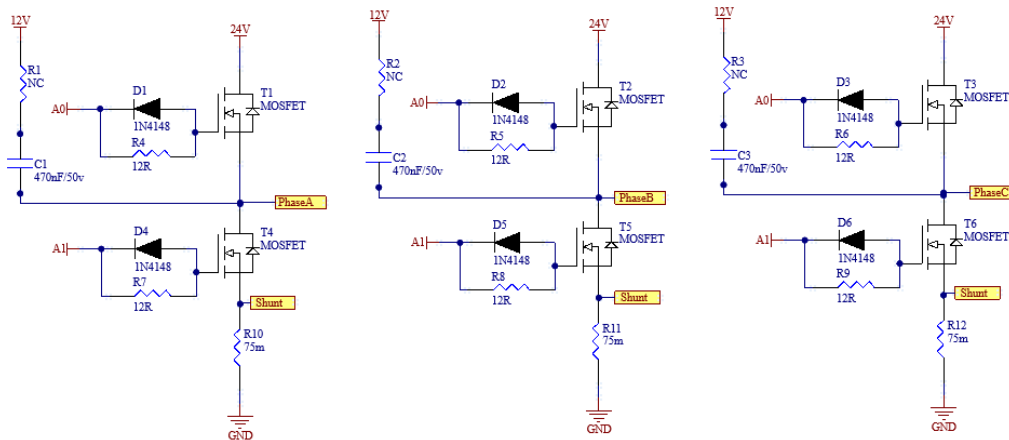


Figure 10. Power Module Design

5.3. Gate Driver Circuit

The driver circuit is a critical component that transfers control signals to the power circuit, ensuring proper switching of the power circuit. The gate drivers integrated within the STSPIN32F0251 microcontroller are used to drive the switching elements. The gate driver circuit is shown in Figure 11. The half-bridge structure control for each phase is provided by the Bootstrap method. The value of the Bootstrap capacitor directly affects the torque and voltage of the motor.

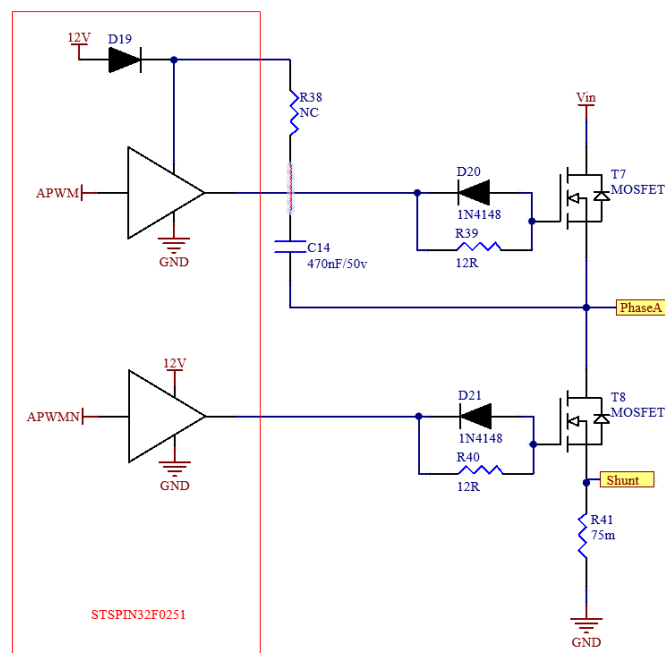


Figure 11. Gate Driver Circuit

The microcontroller contains a diode for the bootstrap structure. Externally, a Bootstrap capacitor, suitable for the motor's nominal operation, is used to keep the high side MOSFET gate voltage higher than the source voltage. This voltage difference allows the high side MOSFET to turn on.

5.4. Hardware Protection Circuits

Hardware protection circuits are designed to monitor and protect the motor's power supply. The motor controller

measures the power line voltage in real-time using a voltage divider. This voltage ensures the power line voltage remains within set limits and automatically takes protective measures in low or high voltage situations.

With the temperature and voltage sensing circuits, the instantaneous bus voltage and temperature of the motor driver can be monitored through resistors. The input voltage here is one of the voltage references used. Temperature measurement applications are carried out using thermistors (NTC) placed close to the phases or switching elements. The schematics for the temperature and voltage sensing circuits are shown in Figure 12.

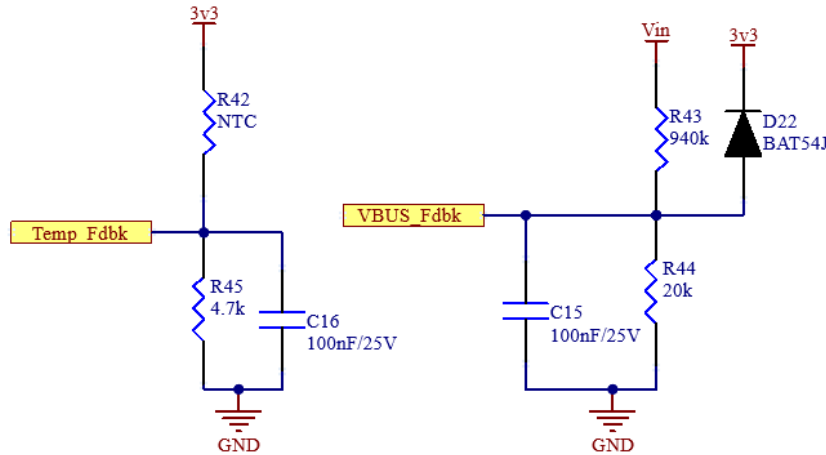


Figure 12. Temperature and Voltage Reading Circuits

Hardware protection circuits protect the motor controller from undesirable situations and potential risks in the power circuits. They safeguard the motor from potential faults such as overcurrent, overvoltage, and overheating, ensuring safe and stable operation.

5.5. Current Control Circuits

Current control circuits are designed to monitor and control the operating current of the motor. The motor driver senses the three-phase winding currents using a shunt resistor. This current value, proportional to the selected resistor tolerance and quality, can measure large currents with high accuracy and low power consumption. Thus, the motor's current values are monitored in real-time, and desired current levels are adjusted.

The voltage generated by the current passing through the shunt resistor is amplified by an opamp. The opamp structure limits and filters the current signal in the 0-3V range. Along with hardware filters, software filters are also used to process the ADC value read, and the phase current is measured. Each phase uses 75mΩ, 2W resistors for current measurement. This value is read by the microcontroller. Current parameters in the Clark Park transformation and observer are obtained. Figure 13 shows the circuit for the current sensing.

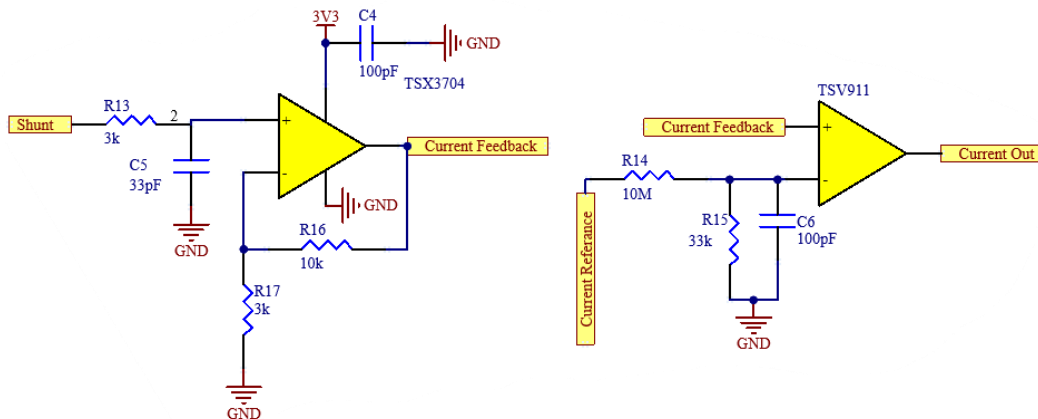


Figure 13. Current Sensing Circuit

5.6. Voltage Control Circuits

The initial back-EMF detection technique enables sensorless rotor position determination during motor startup. Zero-crossing points occur in the motor phase signal. Various hardware filters are used to read and interpret the phase voltage. The obtained value is read by the microcontroller. Voltage parameters in the Clark Park transformation and observer are obtained. The voltage sensing circuits are shown in Figure 14.

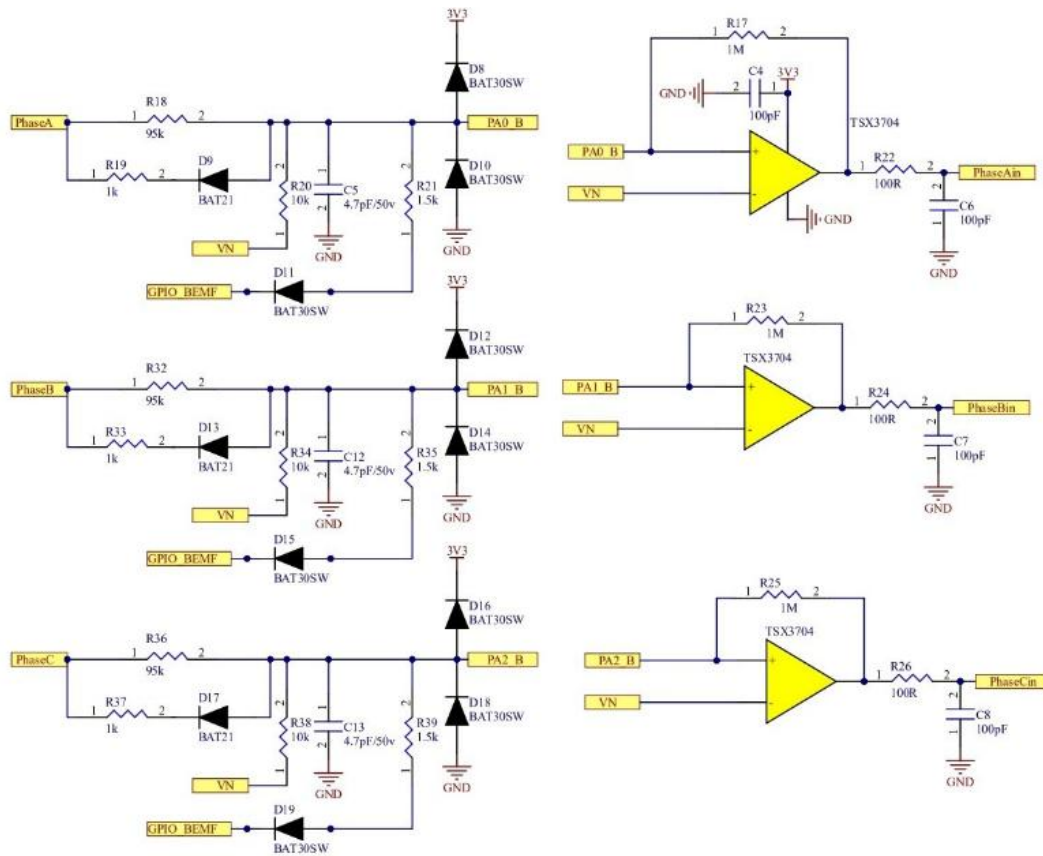


Figure 14. Voltage Sensing Circuit

The signal taken from the phase output is connected to 3V via a diode to prevent and limit interference. Here, the diodes, capacitors, and resistors applied to the input signal from the GND and 3V lines act as filters. These passive components also limit the voltage and current of the signal. The signal is filtered with the help of diodes and capacitors to receive the maximum voltage of the signal diode. The TSX3701 opamp structure amplifies it to 0-3V, making it readable by the microcontroller. The back EMF signal is detected between the motor phases. Zero crossing points are observed in this signal, and it is processed to control the phase voltage using the DGM. ADC, DGM, and other modules are initiated simultaneously with the start of the algorithm. Each phase undergoes the same processing, but the EMF signal is common to each phase. This point is one of the references used by the processor when reading analog signals.

5.7. PCB Design

The PCB layout of the motor controller prioritizes the arrangement of significant circuit units and key components. These are positioned according to the signal flow direction as indicated in the main block diagram. Main components such as the power supply and the microprocessor are given priority on the control board. The microprocessor's minimum system circuit, sampling circuit, and power supply circuit on the control board are organized separately. Additionally, the PCB design considers the problem of electromagnetic compatibility (EMC). All components are used in surface-mounted device (SMD) packages, ensuring small size, light weight, and easy storage. The TO252-DPAK package is specifically chosen for the MOSFET to gain a size advantage. In the PCB design, filter and decoupling capacitors are used to maintain the power integrity of electronic systems and limit noise.

Figure 15 shows the motor control board. In section 1 of the board, the filter circuit is located. For many applications, PI and L type filters can be preferred. At this stage, it is anticipated that the use of capacitors in addition to motor power will be sufficient. In section 2 of the board, the regulator and microcontroller circuit is

located. Regulators reduce the voltage to provide power to the microcontroller and gate drives of the switching elements. In section 3 of the board, MOSFET switching elements are located within the power layer. PWM signals from the microcontroller are applied to the motor. In section 4 of the board, there is a circuit design necessary for performing the operations required for rotor position estimation via phase voltage signals. In section 5 of the board, the current sensor is located. The last two sections are used to determine the rotor position and provide the appropriate drive based on this position. Table 3 presents the sections of the motor control board.

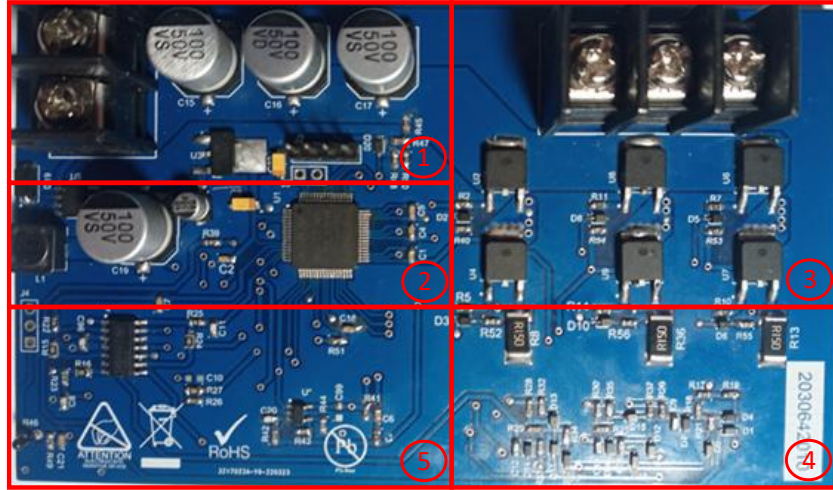


Figure 15. Motor Control Board

Table 3. Sections of the motor control board

No	Hardware
1	Filter circuit
2	Regulator circuit and MCU
3	Power layer
4	Back EMF detection circuit
5	Current sensing circuit

6. Experimental Result and Discussion

The experimental setup was designed to evaluate the motor's performance under various conditions. The torque device test of the driver encompasses a test where the torque produced by the motor under various loads is measured. The axial fan load test of the driver evaluates how the motor behaves under an axial fan load. The axial fan serves as a load to determine how the motor operates under different loads and to assess the motor's performance. During this test, the motor was operated under the axial fan load, and the torque and speed values produced by the motor under these conditions were measured. The experimental setup is shown in Figure 16. Tests were conducted on the torque device and on the axial fan for field applications for the IPMSM driver. Table 4 lists the equipment used in the experimental setup.

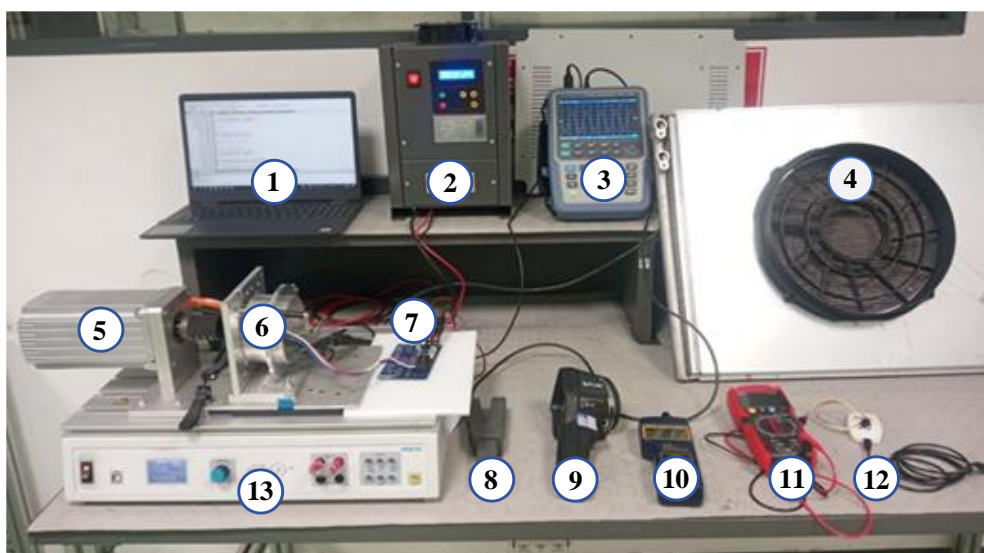


Figure 16. Experiment Setup

Table 4. Equipment Used In Experiment Setup System

No	Hardware
1	Computer
2	Power Supply
3	Oscilloscope
4	Axial Fan
5	Torque Meter
6	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM)
7	IPMSM Control Board
8	Current Probe
9	Thermal Camera
10	Tachometer
11	Multimeter
12	Programmer
13	TP 1410 Motor Test Platform

The Festo TP1410 Motor Test Platform and DriveLab software shown in the experimental setup allow for the examination of electric motors under various loads. This setup supports the automatic recording of motor characteristics, determination of static load parameters, and simulation of different load models. Specifically, it can start with load configurations that include various load models such as pumps, fans, and dynamic loads. This enables a detailed analysis of motor performance. Typical tests involve starting from the nominal load to the maximum load and the instantaneous engagement of different loads. During this process, key data such as motor speed, source current (i_{dc}), and applied torque can be monitored. Figure 17 shows the speed, torque, and current graphs.

In this study, a fan load was selected on the load device, taking fan load applications as a reference. In fan applications, the motor starts together with the fan load. Therefore, the tests started under load, and the minimum torque was determined. In fan applications, proportional speed control or step control is performed. In this study, the motor was tested at three different speed values: 1000 rpm during the (2-12)s time interval, 2000 rpm during the (12-22)s time interval, and 3000 rpm during the (22-35)s time interval. The nominal fan load was 0.3 Nm, and the maximum fan load was 0.7 Nm. During the test, the motor operating under a 0.3 Nm load was exposed to a maximum load of 0.7 Nm at 1000 rpm during the (5-10)s time interval, at 2000 rpm during the (15-20)s time interval, and at 3000 rpm during the (25-30)s time interval. During the process of adding and removing loads, instantaneous current and speed data were obtained in Excel format using the Festo DriveLab application. The obtained Excel data was then plotted using Matlab.

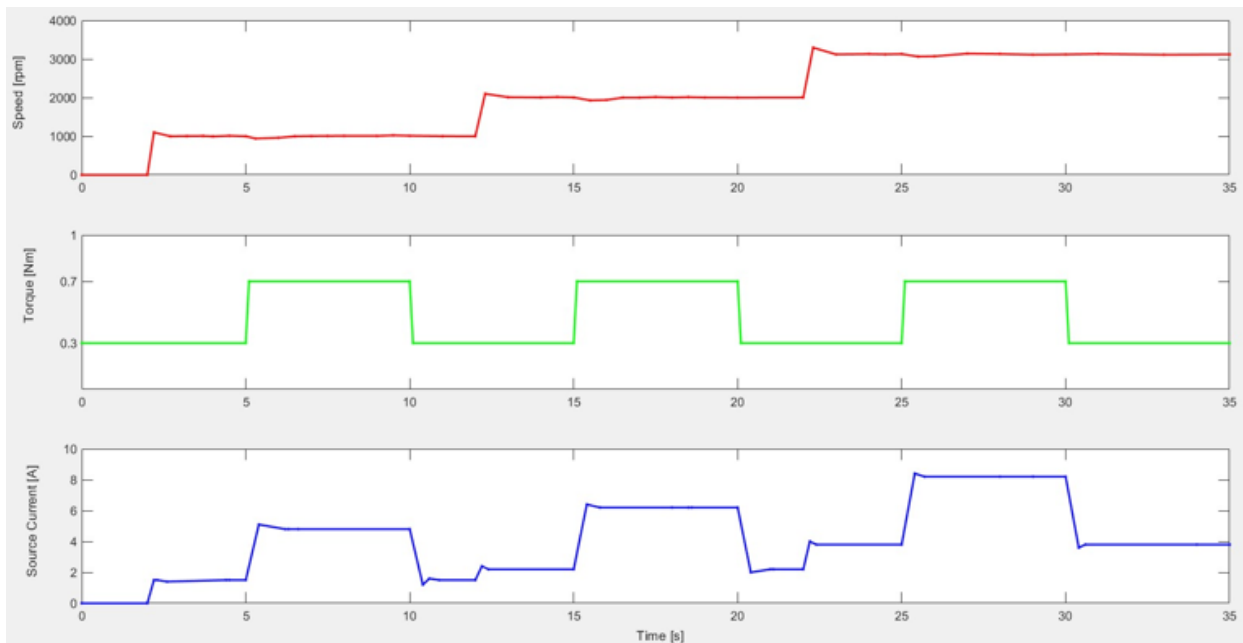


Figure 17. Experimental Results Of IPMSM; A) Speed B) Torque C) Source Current

5. Conclusions

In this study, an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) was used for automotive climate control systems due to its low cost, high starting torque, fast response times, and high dynamic performance. To enhance the motor's performance and efficiency, a motor driver design was implemented. The motor driver board includes a microcontroller, power module, gate drivers, hardware protection circuits, current reading circuits, and voltage reading circuits. The design and component selection of the motor driver board directly affect its performance. Besides the motor driver design, control methods are also crucial for the motor's performance. In this study, a Luenberger-type sensorless control method was employed. The motor was powered by a space vector PWM-based two-level inverter. Experimental results showed that IPMSMs exhibit high performance for industrial fan applications.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to Kormas Electric Motor for their unwavering support during the design and production of this study.

Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Abo-Khalil, A. G., Eltamaly, A. M., Alsaud, M. S., Sayed, K., & Alghamdi, A. S. (2021). Sensorless control for PMSM using model reference adaptive system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(2), e12733.
- Aydogmus, O., & Sünter, S. (2012). Implementation of EKF based sensorless drive system using vector controlled PMSM fed by a matrix converter. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 736-743.
- Borsje, P., Chan, T. F., Wong, Y. K., & Ho, S. L. (2005, May). A comparative study of Kalman filtering for sensorless control of a permanent-magnet synchronous motor drive. In *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005. (pp. 815-822).
- Broeck HW, Skudelny HC, Stanke GV. "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 24 (1), 142-150, 1988.
- Elmas, C., & Ustun, O. (2008). A hybrid controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor drive. *Control Engineering Practice*, 16(3), 260-270.
- Genduso, F., Miceli, R., Rando, C., & Galluzzo, G. R. (2010). Back EMF sensorless-control algorithm for high-dynamic performance PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6), 2092-2100.
- Güngör, B., Özgenel, M.C., & Demirbaş, Ş. (2010). Dynamic analysis of vector controlled permanent magnet synchronous motor driven with SPWM inverter. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 25(3), 569-577.

- Huang, Q., Huang, Q., Guo, H., & Cao, J. (2023). Design and research of permanent magnet synchronous motor controller for electric vehicle. *Energy Science & Engineering*, 11(1), 112-126.
- Jung, W. S., Lee, H. K., Lee, Y. K., Kim, S. M., Lee, J. I., & Choi, J. Y. (2023). Analysis and Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors According to Rotor Type under the Same Design Specifications. *Energies*, 16(3), 1306.
- Kanchan RS, Baiju MR, Mohapatra KK, Ouseph PP, Gopakumar K. "Space vector PWM signal generation for multilevel inverters using only the sampled amplitudes of reference phase voltages". *Electric Power Applications*, IEE Proceedings, 152 (2), 297-309, 2005.
- Kim, S. I., Im, J. H., Song, E. Y., & Kim, R. Y. (2016). A new rotor position estimation method of IPMSM using all-pass filter on high-frequency rotating voltage signal injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10), 6499-6509.
- Krishnan, R. (1987). Selection criteria for servo motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-23(2), 270-275.
- Luo, X., Tang, Q., Shen, A., & Zhang, Q. (2015). PMSM sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into estimated fixed-frequency rotating reference frame. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(4), 2294-2303.
- Murakami, H., Honda, Y., Kiriya, H., Morimoto, S., & Takeda, Y. (1999, October). The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor. In *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370) (Vol. 2, pp. 840-845)*. IEEE.
- Ni, R., Xu, D., Blaabjerg, F., Lu, K., Wang, G., & Zhang, G. (2017). Square-wave voltage injection algorithm for PMSM position sensorless control with high robustness to voltage errors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(7), 5425-5437.
- Noguchi, T. (2007). Trends of permanent-magnet synchronous machine drives. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2(2), 125-142.
- Piippo, A., Hinkkanen, M., & Luomi, J. (2009). Adaptation of motor parameters in sensorless PMSM drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 203-212.
- Quang, N. K., Hieu, N. T., & Ha, Q. P. (2014). FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended Kalman filters. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 6574-6582.
- Rahman, M. A., Milasi, R. M., Lucas, C., Araabi, B. N., & Radwan, T. S. (2008). Implementation of emotional controller for interior permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(5), 1466-1476.
- Saleh, S. A., Ozkop, E., Nahid-Mobarakeh, B., Rubaai, A., Muttaqi, K. M., & Pradhan, S. (2023). Survivability-Based Protection for Electric Motor Drive Systems-Part II: Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 59(3), 2760 - 2771.
- Schroedl, M. (1996, October). Sensorless control of AC machines at low speed and standstill based on the "INFORM" method. In *IAS'96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting (Vol. 1, pp. 270-277)*.
- Sen, P. C. (1990). Electric motor drives and control-past, present, and future. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(6), 562-575.
- Song, X., Fang, J., Han, B., & Zheng, S. (2016). Adaptive compensation method for high-speed surface PMSM sensorless drives of EMF-based position estimation error. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1438-1449.
- Ullah, K., Guzinski, J., & Mirza, A. F. (2022). Critical review on robust speed control techniques for permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation. *Energies*, 15(3), 1235.
- Vidlak, M., Makys, P., & Gorel, L. (2022). A Novel Constant Power Factor Loop for Stable V/f Control of PMSM in Comparison against Sensorless FOC with Luenberger-Type Back-EMF Observer Verified by Experiments. *Applied Sciences*, 12(18), 9179.
- Volpato Filho, C. J., Xiao, D., Vieira, R. P., & Emadi, A. (2021). Observers for high-speed sensorless pmsm drives: Design methods, tuning challenges and future trends. *IEEE Access*, 9, 56397-56415. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3072360.
- Wang, G., Valla, M., & Solsona, J. (2019). Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives—A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5830-5842. Digital Object Identifier 10.1109/TIE.2019.2955409.
- Wang, Q., Wang, S., & Chen, C. (2019). Review of sensorless control techniques for PMSM drives. *IEEJ Transactions on electrical and electronic engineering*, 14(10), 1543-1552.
- Wang, Z., Lu, K., & Blaabjerg, F. (2012). A simple startup strategy based on current regulation for back-EMF-based sensorless control of PMSM. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3817-3825.
- Yan, H., Xu, Y., Cai, F., Zhang, H., Zhao, W., & Gerada, C. (2018). PWM-VSI fault diagnosis for a PMSM drive based on the fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(1), 759-768.
- Zhang, G., Wang, G., & Xu, D. (2017). Saliency-based position sensorless control methods for PMSM drives-A review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 3(2), 14-23.
- Zhang, H., Zhang, G., Shen, W., Wang, G., & Xu, D. (2020, November). Fundamental PWM Excitation Based Low-Speed Sensorless Control Method for PMSM Drives. In *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) (pp. 833-838)*.
- Zhang, X., Li, H., Yang, S., & Ma, M. (2017). Improved initial rotor position estimation for PMSM drives based on HF pulsating voltage signal injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(6), 4702-4713.
- Zhang, Z. (2022). Sensorless Control of Synchronous Machines Using Fundamental Back-EMF Voltage-A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(9), 10290-10305.



REVISITING BODE'S IDEAL LOOPS: INTEGRAL SQUARE ERROR OPTIMALITY OF BODE'S IDEAL LOOPS AND BODE'S IDEAL LOOP INVERSE CONTROLLER DESIGN

Bariş Baykant ALAGÖZ¹, Furkan Nur DENİZ², Cemal KELEŞ^{2*}

¹Inonu University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Malatya, Türkiye

²Inonu University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Malatya, Türkiye

Keywords

*Optimality,
Robustness,
Uncertain Systems,
Control Design,
Fractional Order
Control,
Bode's Ideal Loop.*

Abstract

Bode's ideal loop models have been utilized in control system designs to obtain performance robustness for the Direct Current (DC) gain variations. However, effects of crossover frequency and fractional order on control optimality of Bode's ideal loop reference models have not been sufficiently discussed, and it may raise a question of whether a control system design based on Bode's ideal loop reference model is optimal. In this regard, this study revisits Bode's ideal loops to investigate Integral Square Error (ISE) optimality of Bode's ideal loops. For this purpose, the ISE optimality of Bode's ideal loop is theoretically investigated by using Parseval's theorem, and an ISE optimality condition is suggested in terms of crossover frequency and fractional order. Then, a generic controller family, which achieves an exact matching with the characteristics of the ISE optimal Bode's ideal loop, was implemented for inverse fractional-order control of a class of minimum phase fractional order plant models. The authors present a numerical experiment on an ISE optimal Bode's ideal loop inverse (OBILI) controller, and the ISE optimality and performance robustness of the designed control system were investigated for closed-loop control of a heat furnace system model via Monte Carlo simulations.

BODE İDEAL DÖNGÜLERİNE YENİDEN BAKIŞ: BODE İDEAL DÖNGÜLERİNİN İNTEGRAL KARESEL HATA OPTİMALLIĞI VE BODE İDEAL DÖNGÜ TERS KONTROLÖR TASARIMI

Anahtar Kelimeler

*Optimallik,
Dayanıklılık,
Belirsiz Sistemler,
Kontrol Tasarımı,
Kesirli Dereceli Kontrol,
Bode'nin İdeal Döngüsü.*

Öz

Bode ideal döngü modelleri, Doğru Akım (DA) kazanç değişimleri için performans dayanıklılığı elde etmek amacıyla kontrol sistemi tasarımlarında kullanılmıştır. Bununla birlikte, geçiş frekansı ve kesir derecenin Bode ideal döngü referans modellerinin kontrol optimallığı üzerindeki etkileri yeterince tartışılmamıştır ve bu, Bode ideal döngü referans modeline dayanan bir kontrol sisteminin optimal olup olmadığı sorusunu gündeme getirebilir. Bu bağlamda, bu çalışma, Bode ideal döngülerinin İntegral KareSEL Hata (ISE) optimallığını araştırmak için Bode ideal döngülerini yeniden ele almaktadır. Bu amaçla Bode ideal döngünün ISE optimallığı Parseval teoremi kullanılarak teorik olarak araştırılmış ve geçiş frekansı ve kesir derece açısından bir ISE optimallik koşulu önerilmiştir. Daha sonra, ISE optimal Bode ideal döngünün karakteristikleri ile tam bir eşleşme sağlayan bir genelleştirilmiş kontrolör ailesi, minimum faz kesir dereceli sistem modellerinin bir sınıfının ters kesir dereceli kontrolü için uygulanmıştır. Yazarlar, ISE optimal Bode ideal döngü ters (OBILI) kontrolörü üzerinde nümerik bir deney sunmuştur ve tasarlanan kontrol sisteminin ISE optimallığı ve performans dayanıklılığı, Monte Carlo simülasyonu ile bir ısı fırını sisteminin kapalı döngü kontrolü için araştırılmıştır.

Alıntı / Cite

Alagöz, B.B., Deniz, F.N., Keleş, C., (2025). Revisiting Bode's Ideal Loops: Integral Square Error Optimality of Bode's Ideal Loops and Bode's Ideal Loop Inverse Controller Design, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(1), 202-220.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. B. Alagöz, 0000-0001-5238-6433
F. N. Deniz, 0000-0002-2524-7152
C. Keleş, 0000-0002-6818-7970

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	13.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	12.10.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	08.01.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* Corresponding author: cemal.keles@inonu.edu.tr, +90-422-377-4797

REVISITING BODE'S IDEAL LOOPS: INTEGRAL SQUARE ERROR OPTIMALITY OF BODE'S IDEAL LOOPS AND BODE'S IDEAL LOOP INVERSE CONTROLLER DESIGN

Bariş Baykant ALAGÖZ¹, Furkan Nur DENİZ², Cemal KELEŞ^{2†},

¹Inonu University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Malatya, Türkiye

²Inonu University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Malatya, Türkiye

Highlights

- This study revisits Bode's ideal loop and considers control performance limitations.
- Integral Square Error (ISE) optimality of Bode's Ideal Loop is discussed.
- An ISE optimal Bode's Ideal Loop inverse controller design scheme is illustrated.
- This generic controller allows optimal and robust closed loop system designs.

Purpose and Scope

The manuscript revisits the Bode's ideal loop reference model in aspects of ISE optimality and performance robustness and introduces an optimal Bode's ideal loop reference model based fractional order control system design for control robustness against parametric perturbation of the system model. It addresses elements of robust control according to the model based control design approaches. It introduces an easy-to-design ISE optimal Bode's ideal loop inverse (OBILI) controller for the control of a class of fractional order plant models.

Design/methodology/approach

Bode's ideal loops have been utilized in control system designs as a reference model in order to obtain a performance robustness for the gain variations of the control systems. However, control optimality of Bode's ideal loop reference models has not been sufficiently discussed in previous works. An investigation on whether Bode's ideal loop reference model is optimal in terms of the closed loop control error can be useful for controller design domain. This study firstly investigates the control optimality of Bode's ideal loops in terms of the Integral Square Error (ISE) and suggests a generic controller family that allows an exact matching of the control system characteristics with the characteristics of the ISE optimal Bode's ideal loop.

Findings

We firstly introduce an ISE optimal Bode's ideal loop inverse (OBILI) controller for the control of a class of fractional order plant models. The ISE optimality of the fractional order control system can inherently be achieved in the controller design task. This reference model based design approach significantly facilitates the optimal fractional order control system design with robustness assets of Bode's ideal loops.

Originality

We revisit the Bode's Ideal Loops and deeply discuss the robust control performance limitations of feedback control loops. Thus, we contributed to the brief discussion of Åström paper on the performance limitations of control loops in terms of control robustness and optimality. A design example of the proposed OBILI controller is illustrated for the optimal and robust closed loop control of a heat furnace system model. Rigorous robustness analysis is carried out by means of Monte Carlo simulations for parametric system uncertainties. Thus, the robust control performance improvements associated with the Bode's ideal loop based design is shown by using statistical performance assessments.

† Corresponding author: cemal.keles@inonu.edu.tr, +90-422-377-4797

1. Introduction

Robust control performance is essential for practical control system applications. Parametric variations, external disturbance, and measurement noise can deteriorate the real-world performance of the controllers that are designed theoretically optimal according to a nominal mathematical model of the controlled systems. Even if a control system is designed optimally, several factors (e.g., limitations of mathematical modeling, non-ideality in the realization of system elements, uncertainty in operation conditions, and system faults) can lead to deterioration of theoretically ensured control optimality in real-world control applications. To maintain practical control optimality in real-world control systems, a robust performance design paradigm plays an important role. Therefore, robust control has turned into a prominent topic of control engineering (Faisal et al., 2021; Zhou et al., 1998). The fractional order control works have aimed to resolve issues associated with the robustness of control system performance. Thus, the consideration of Bode's ideal loop in control (Åström, 2000; R. Barbosa et al., 2004; R. S. Barbosa et al., 2004; Bode, 1945; Bower & Schultheiss, 1961; Horowitz, 1963) and a closely related property of the phase response flatness, so-called iso-damping property (Y. Chen et al., 2005; Y. Q. Chen et al., 2006; J.-H. Cho & Hwang, 2007; Feliu-Batlle & Castillo-García, 2014) emerged as a central concern in optimal fractional order control system design problems (Li & Chen, 2008; Luo & Chen, 2009; Saha et al., 2010). The frequency domain loop shaping design methodologies have been utilized in the realization of the iso-damping property in fractional order control systems by providing flatness of phase response characteristics of open loop transfer function at the vicinity of the crossover frequency (Luo & Chen, 2009; Saha et al., 2010; Vinagre et al., 2003). To achieve the phase flatness objective, the following constraint has been popularly employed in optimal fractional order controller design problems (Luo & Chen, 2009):

$$\left(\frac{d\angle L(j\omega)}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} \cong 0, \quad (1)$$

where the function $L(j\omega)$ stands for the frequency response of the open loop transfer function of a closed-loop fractional order proportional integral derivative (FOPID) control system. This classical negative feedback control loop involves a controller function $C(j\omega)$ and the controlled system function $G(j\omega)$, where the open loop transfer function is simply expressed in the form of $L(j\omega) = C(j\omega)G(j\omega)$. As in Eqn. 1, the phase response of the $L(j\omega)$ is denoted by $\angle L(j\omega)$. The crossover frequency ω_c is calculated according to the angular frequency ω that satisfies the condition of $|C(j\omega_c)G(j\omega_c)| = 1$.

Previously, the robust control performance limitations of feedback control loops were progressively discussed on the basis of a transfer function formalism of negative feedback control loops by Horowitz's book (Horowitz, 1963) and Åström in a tutorial paper (Åström, 2000). Åström stated that the properties of the open loop transfer function $L(j\omega)$ impose some limitations in terms of control robustness. Since the real processes mainly have control responses in the low frequency part of the frequency spectrum, their closed-loop control systems are designed to work in the low frequency region, and therefore all features linked with the control performance can be characterized according to the spectral properties within the low frequency region. Specifically, Åström emphasized that major properties associated with the control performance were characterized around the crossover frequencies of the control system (Åström, 2000). In the loop shaping design of control systems, the phase and gain crossover frequencies are mainly considered: The phase crossover frequency (ω_{pc}) of a system is the frequency at which the phase of the system first reaches $-\pi$ rad (-180°) and the gain crossover frequency (ω_c) is defined as the frequency where the amplitude of the open loop transfer function becomes a value of 1 (Bolton, 2004). As a major control property, the stability of the control system is guaranteed with positive phase and gain margins that can be calculated according to the phase and amplitude response characteristics of the open loop transfer function at the crossover frequencies (Bolton, 2004; Doyle et al., 1990; Wang et al., 2009).

Another useful control property related with the crossover frequency has emerged as the flatness of phase response characteristic of open loop transfer functions around the gain crossover frequency and this design property was considered as iso-damping property and utilized for system robustness in the loop shaping designs (Y. Chen et al., 2005; Feliu-Batlle & Castillo-García, 2014). However, its origin has traced back to Bode's works on feedback amplifiers, where it was discussed as the ideal cut-off characteristic to design robust amplifier circuits for DC gain variations (Åström, 2000; Bode, 1945; Doyle et al., 1990). In its historical progress, Bower and Schultheiss (Bower & Schultheiss, 1961), Horowitz (Horowitz, 1963), and (Alagoz et al., 2013) considered this property from a control point of view. Then, Åström presented a comprehensive investigation of Bode's ideal loop transfer function to discuss the robustness limitations of classical negative feedback control loops (Åström, 2000). Then, the terms of Bode's ideal loop transfer function have been phrased for control systems, and the phase response flatness of the open loop transfer function at crossover frequency has been investigated in more detail for control system design (Åström, 2000). Afterward, Bode's ideal loop was considered as a reference model in order to tune controller parameters to improve the time response of closed-loop control systems (Alagoz et al.,

2013; Doğruer et al., 2017; Saidi et al., 2015; Zhang et al., 2020). Recently, Bode's ideal loop transfer function has been preferred as a reference transfer function model to achieve phase flatness and performance robustness in loop shaping design (Fergani, 2022; Li et al., 2020; Sahoo & Mishra, 2021; Zheng et al., 2020; Zhuo-Yun et al., 2020).

This study aims to revisit discussions on the control performance robustness of Bode's ideal loop and extend these discussions to address the control optimality of Bode's ideal loop reference models. In this manner, parameters of the Bode's ideal loop are studied to figure out an optimal reference model. Thus, a control system design based on Bode's ideal loop reference model can inherently achieve the ISE optimality. For this purpose, ISE performance of the closed-loop control error is considered in the frequency domain as the total spectral energy of the control error by using Parseval's theorem, and then the total spectral energy of the control error is numerically minimized to determine the optimal crossover frequency and the fractional order parameters of the Bode's ideal loop reference models.

To demonstrate the benefits of the optimal Bode's ideal loop reference model for the optimal and robust controller design, we present an ISE optimal Bode's ideal loop inverse (OBILI) controller design example for the control of a class of minimum phase fractional order plant models. A numerical experiment is conducted to investigate optimal and robust control of a fractional order heat furnace system model. Monte Carlo simulations are conducted to show performance improvements of the ISE-OBILI controller in the on to performance of an optimal FOPID controller design.

2. Analyses on Bode's Ideal Loops

2.1. Preliminary Knowledge: Effects of Bodes Ideal Loop Parameters on System Stability and Robustness

The open loop transfer function of Bode's ideal loop is defined as

$$L(s) = \left(\frac{\omega_c}{s}\right)^\alpha, \quad (2)$$

where the parameter ω_c denotes crossover frequency and the parameter α stands for the fractional order of Bode's ideal loop (Åström, 2000; Bode, 1945). It is indeed a fractional order system model. The closed-loop transfer function of this system model is widely expressed in the form of

$$T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)} = \frac{\omega_c^\alpha}{s^\alpha + \omega_c^\alpha}. \quad (3)$$

Interest in Bode's ideal loops has grown in the field of fractional order control topic for the last two decades because Bode's ideal loop has been considered as a reference model for the robust performance control system design tasks. To understand the underlying reasons of why the fractional order control community has preferred Bode's ideal loop for a reference response of the robust control systems, one should consider the frequency response of Bode's ideal loops in Figure 1.

Figure 1 depicts the Bode diagram of Bode's ideal loop that is composed by drawing phase and magnitude responses of the open loop transfer function. The figure illustrates the effects of the parameters ω_c and α on the frequency responses in log-log scales. The magnitude response of Bode's ideal loop is written by

$$20\log_{10}|L(j\omega)| = 20\alpha \log_{10}\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right) = -20\alpha \log_{10}(\omega) + 20\alpha \log_{10}(\omega_c). \quad (4)$$

The phase response of Bode's ideal loop is written by

$$\angle L(j\omega) = -\frac{\pi}{2}\alpha. \quad (5)$$

Some important remarks associated with phase and amplitude responses of Bode's ideal loops for system engineering can be summarized:

(i) The magnitude response is a linear curve in the log-log graph and the slope of the magnitude curve is -20α dB/dec in this graph. The slope of the magnitude curve is adjustable only by the fractional order α . (According to Figure 1, the slope of magnitude curve can be expressed geometrically as $-\frac{20\alpha \log_{10}(\omega_c)}{\log_{10}(\omega_c)} = -20\alpha$ dB/dec). This demonstrates the independence of the magnitude slope from the crossover frequency ω_c . Therefore, a change in the crossover frequency, which implies the change in the DC gain of Bode's ideal loop, does not affect the slope of

the magnitude curve and the associated properties. Besides, by considering Eqn. 5, it is evident that the phase response of Bode's ideal loop is also independent of the crossover frequency ω_c . These are the mathematical origins of the performance robustness of Bode's ideal loops for the crossover frequency variations. Therefore, with consideration of Eqn. 2, a change in the open loop gain of Bode's ideal loop is possible by altering only the crossover frequency ω_c , and this alteration does not affect the phase response and accordingly the phase margin that is $\varphi_m = -(\pi/2)\alpha + \pi$ (Bode, 1945). This effect validates the claims that have been suggesting that phase margin is independent of the open loop gain variation of Bode's ideal loop. Consequently, one concludes that the Bode's ideal loop is robust stable for any change in the crossover frequency.

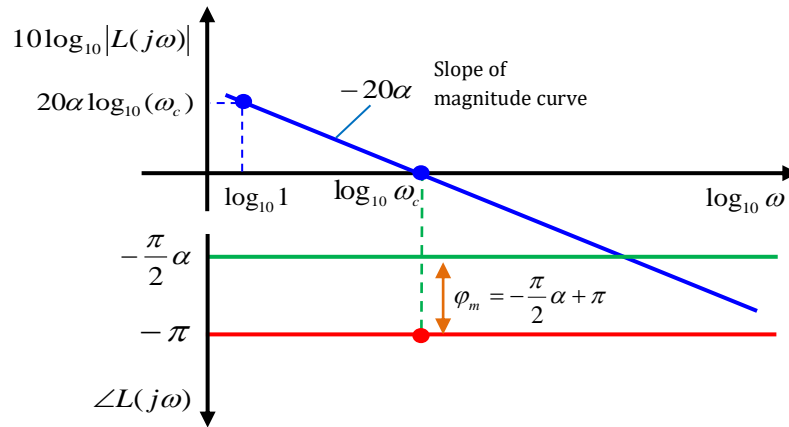


Figure 1. Bode diagram drawing of the Bode's ideal loop in logarithmic scales and illustrations of some important characteristic points related to control system performance

(ii) When the phase margin $\varphi_m = -(\pi/2)\alpha + \pi$ is considered, it is evident that Bode's ideal loop is always stable because of presenting a positive phase margin in the fractional order range of $0 \leq \alpha < 2$. Therefore, the range $0 \leq \alpha < 2$ guarantees the robust stability of Bode's ideal loops (Bode, 1945).

To validate these conclusions in frequency response plots, magnitude responses, phase responses and phase margins of Bode's ideal loops are drawn for $\omega_c = 10$, $1 \leq \omega \leq 100$ and different values of α in the range of $[0,2]$ with 0.1 increments in Figure 2. The figure clearly shows that Bode's ideal loop is stable for $0 \leq \alpha < 2$ because of having a positive phase margin in this range.

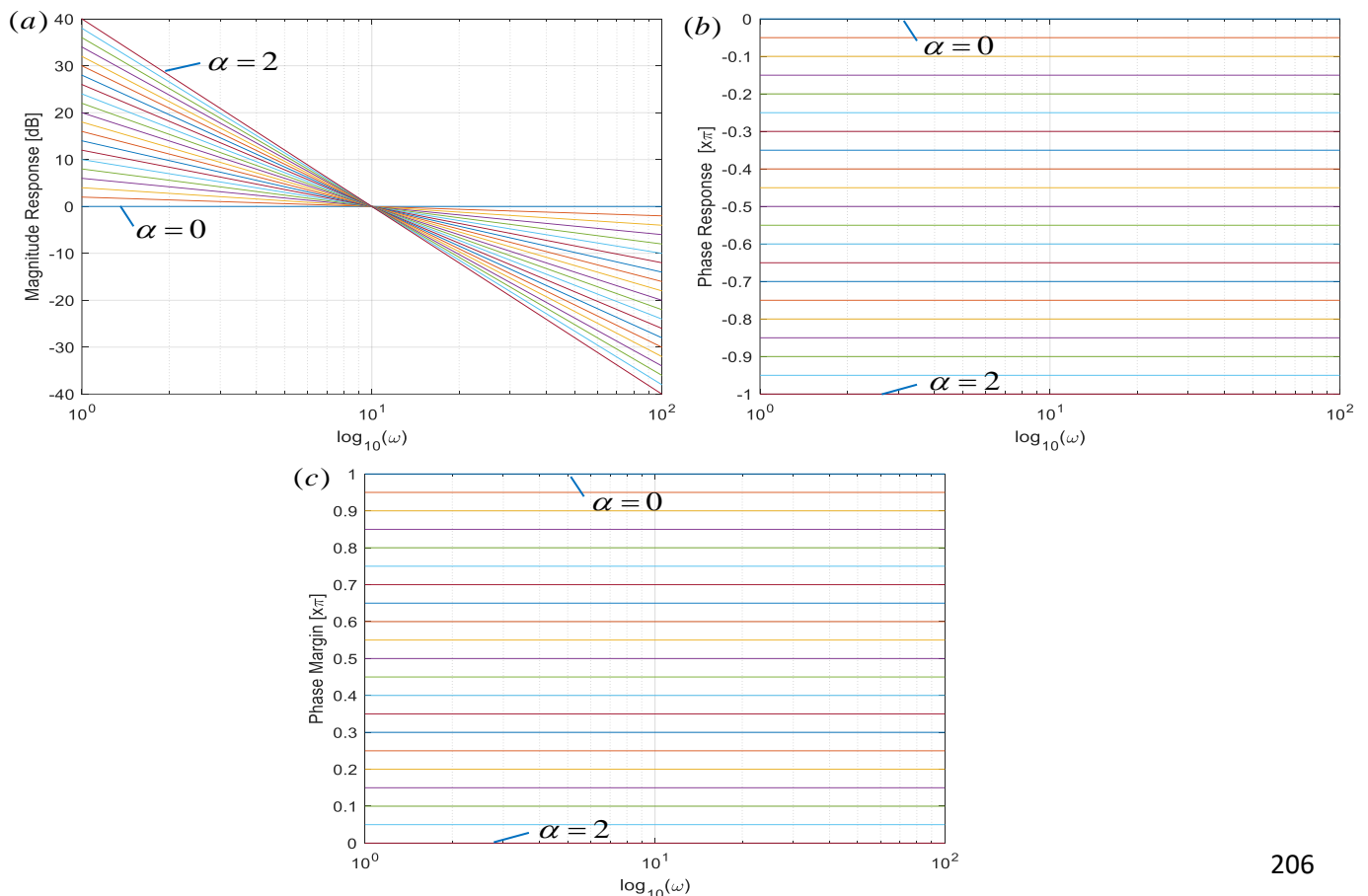


Figure 2. Magnitude responses (a), phase responses (b) and phase margins (c) of the Bode’s ideal loops for various $\alpha \in [0,2]$ at $\omega_c = 10$

To show the effects of the crossover frequency ω_c , Figure 3 shows magnitude responses and phase responses of Bode’s ideal loop for $\alpha = 1$ and various values of ω_c in the range [1,100] with 10 rad/sec increments. One can observe that there isn’t any geometrical dependence between the phase response curve and the magnitude response curve in the case of the constant fractional order. For this reason, any change in ω_c , namely the DC gain of the open loop Bode’s ideal loop, does not affect the phase response and the phase margin of the system according to Figure 3(b). This property may give a degree of freedom for tuning the parameter ω_c without concerning the stability of Bode’s ideal loop in controller design efforts. In addition, this property confirms the insensitivity of the phase response to the gain variation.

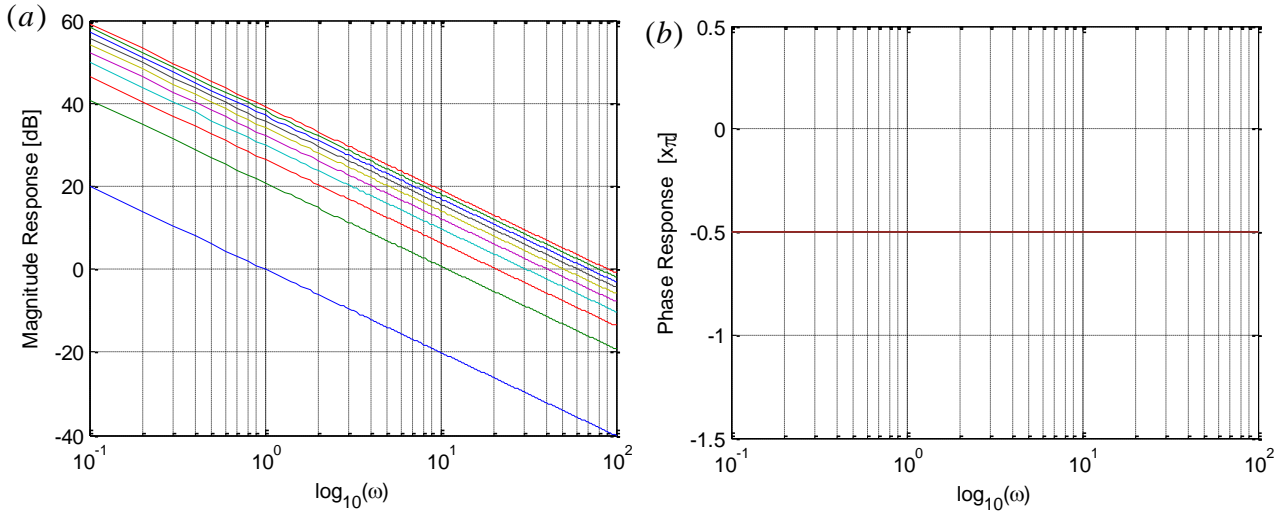


Figure 3. Magnitude responses (a) and phase responses (b) of Bode’s ideal loops for $\alpha = 1$ and various values of ω_c in the range of [1,100] (These figures confirm that phase response is independent of ω_c)

2.2. Integral Squared Error Optimality of Bode’s Ideal Loop

Bode’s ideal loops have been used as a reference model in control system tuning problems (Alagoz et al., 2013; Doğruer et al., 2017; Yumuk et al., 2019; Zhang et al., 2020) because of expectations of their robust control assets that have been elaborated in the previous section. Although it has been utilized in many works, the control optimality of Bode’s ideal loop reference models has not been adequately discussed. This section is particularly devoted to investigate the ISE performance optimality of Bode’s ideal loops. In this aspect, we consider the ISE control performance of closed-loop Bode’s ideal loop reference models and numerically solve the associated optimization problem in order to determine the optimal parameters of Bode’s ideal loop, which minimize the integral of the square error. The aim of this effort is to figure out a Bode’s ideal loop configuration (fractional order and crossover frequency values) that can simultaneously offer two features: (i) ISE optimality in time response, (ii) robustness for the gain variation (crossover frequency) of Bode’s ideal loop reference model.

This effort can facilitate the solution of optimal controller design problems because ISE optimality will have been inherently provided by using the ISE optimal Bode’s ideal loop reference model. Thus, there will be no need for solving an additional ISE optimality problem for the controller tuning when the time and frequency responses of the designed control system entirely resemble the response of the ISE optimal Bode’s ideal loop reference model.

Let us express the error function of the closed-loop Bode’s ideal loop by considering Eqn. 2 in the Laplace transform of $e(s) = R(s) - T(s)R(s)$, where the closed-loop transfer function is $T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)}$, one can write

$$e(s) = \frac{1}{1+L(s)}R(s) = \frac{1}{1+(\frac{\omega_c}{s})^\alpha}R(s), \tag{6}$$

where $R(s)$ represents the input of the closed-loop transfer function of the Bode’s ideal loop. The ISE is commonly calculated by using the closed-loop control error signal $e(t)$ when a unit step input signal $r(t) = u(t)$ is applied to the input of the control loop. (Laplace transform of unit step input $r(t) = u(t)$ is $R(s) = \mathcal{L}\{u(t)\} = 1/s$) In the case of simulation or experimental data, the finite time ISE (Åström, 2000) was then used in the form of

$$E_T = \int_0^T e(t)^2 dt. \quad (7)$$

This formulation of the ISE is useful for performance analyses of the simulation or experimental data that was obtained for a finite observation period T . However, the selection of the observation period influences the results of finite time ISE calculations. An absolute ISE definition, which can be independent of the observation period, is written by

$$E_\infty = \int_{-\infty}^{+\infty} e(t)^2 dt. \quad (8)$$

By using the Parseval's theorem, E_∞ can be expressed in the frequency domain as (Kealy & O'dwyer, 2003; Merrikh-Bayat, 2012)

$$E_\infty = \int_{-\infty}^{+\infty} e(t)^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |e(j\omega)|^2 d\omega, \quad (9)$$

where $e(j\omega) = e(s)|_{s=j\omega}$ are used in Eqn. 9, then the absolute ISE of Bode's ideal loop can be written as

$$E_\infty = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_c}{j\omega}\right)^\alpha} \frac{1}{j\omega} \right|^2 d\omega. \quad (10)$$

Finally, the ISE optimal Bode's ideal loop parameter can be found by solving the following optimization problem:

$$\min E_\infty(\omega_c, \alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_c}{j\omega}\right)^\alpha} \frac{1}{j\omega} \right|^2 d\omega \quad (11)$$

We solved this optimization problem by using Brute force search. The Brute force search method searches all evenly sampled solutions from a low dimensional search space. The Brute force search is a useful and proven search technique when there is a need for a discrete performance mapping within the search space. Thus, one can explore all optimal points within the sampled finite search spaces, and previously, it was effectively used in the fractional order control system stabilization tasks (Alagoz, 2018; Matušů et al., 2018). In the current application, for sampled values of ω_c and α parameters in a finite search range, the absolute ISE of Bode's ideal loop was numerically calculated by using the numerical integral function of the Matlab program. For the consistent numerical calculation of Eqn. 11, the numerical integral was performed for a sufficiently large range of the angular frequency ($[-10^{10}, 10^{10}]$) compared to the sampling ranges of ω_c and α parameters. Thus, the accuracy of the numerical integration in Eqn. 11 can be maintained. (The Matlab code for the numerical calculation of Eqn. 11 is also provided in the Appendix section.)

Figure 4 shows the distribution of $E_\infty(\omega_c, \alpha)$ in the ranges $\omega_c \in [1, 10000]$ with 10 rad/sec increments and $\alpha \in [0, 2]$ with 0.1 increments. The figure depicts an ISE performance mapping of closed-loop Bode's ideal loops. In the figure, the minimum ISE was obtained 5.10^{-4} and the optimal model parameters were found $\omega_c^* = 1000$ and $\alpha^* = 1$. The same computations were carried out by increasing the range of ω_c and results are listed in Table 1. Results reveal that the optimal value of the fractional order is $\alpha^* = 1$ and optimal values of crossover frequency go consistently to the highest ω_c frequencies that are the upper boundary of the search range of ω_c . According to these numerical results, one can easily infer that the optimal value of the crossover frequency goes to the infinite frequency, $\omega_c^* \rightarrow \infty$, in the case that the Brute search range of ω_c expands to infinity. Consequently, the conditions $\alpha^* = 1$ and $\omega_c^* \rightarrow \infty$ are sufficient to ISE optimality of Bode's ideal loops. By considering these findings, the open loop transfer function of the ISE optimal Bode's ideal loop can be expressed by using the condition $\alpha^* = 1$ and $\omega_c^* \rightarrow \infty$ as

$$L^*(s) = \left(\frac{\omega_c}{s}\right) \Big|_{\omega_c^* \rightarrow \infty}. \quad (12)$$

Then, a transfer function of the optimal ISE Bode's ideal loop can be written by

$$T^*(s) = \frac{\omega_c^*}{s + \omega_c^*} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c^*} s + 1} \Big|_{\omega_c^* \rightarrow \infty}. \quad (13)$$

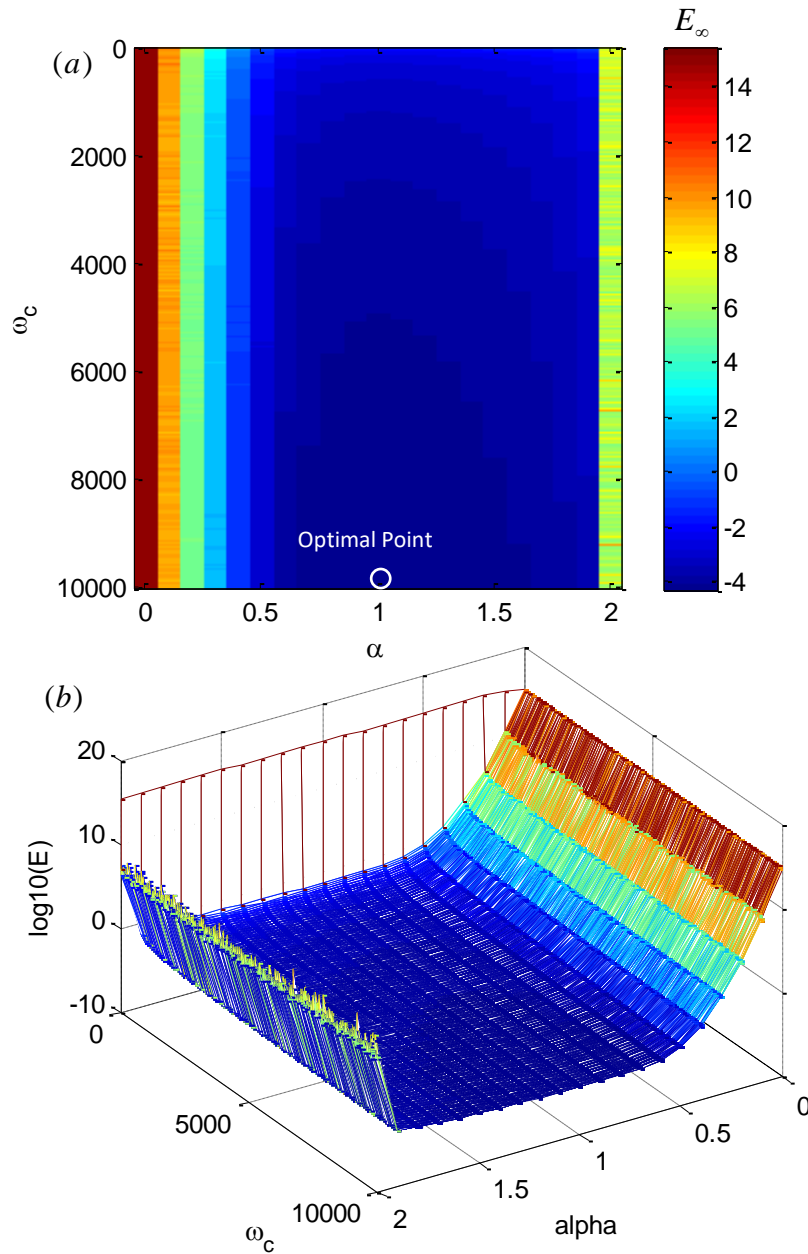


Figure 4. Logarithmic scale distribution $E_\infty(\omega_c, \alpha)$ in the ranges $\omega_c \in [1, 10000]$ with 10 rad/sec increment and $\alpha \in [0, 2]$ with 0.1 increments ((a) top view and (b) side view)

According to Eqn. 13, the optimal ISE Bode's ideal loop is theoretically an infinite bandwidth, first order transfer function because of the requirement of $\omega_c^* \rightarrow \infty$. This indeed implies a unit transfer function, $T^*(s) = 1$, namely an ideal closed-loop transfer function. The unit transfer function represents an ideal lossless system with an infinite bandwidth and a zero-time constant. However, the unit transfer function is a conceptual model because the infinite crossover frequency is not possible in real-world or practical control systems. From a practical point of view, ISE performances of real systems are bounded with a finite crossover frequency specification. To improve ISE performances of real control system design methodologies, which are using optimal ISE Bode's ideal loop functions ($T^*(s)$ or $L^*(s)$) as a reference model, one should consider maximization of the ω_c . As a consequence, an essential limitation for the optimality of Bode's ideal loop comes from the finite ω_c specifications of the real-world control systems. This is a result that also confirms the view of Åström, which has been suggested the crossover frequency to be an essential limitation for real-world control performance (Åström, 2000).

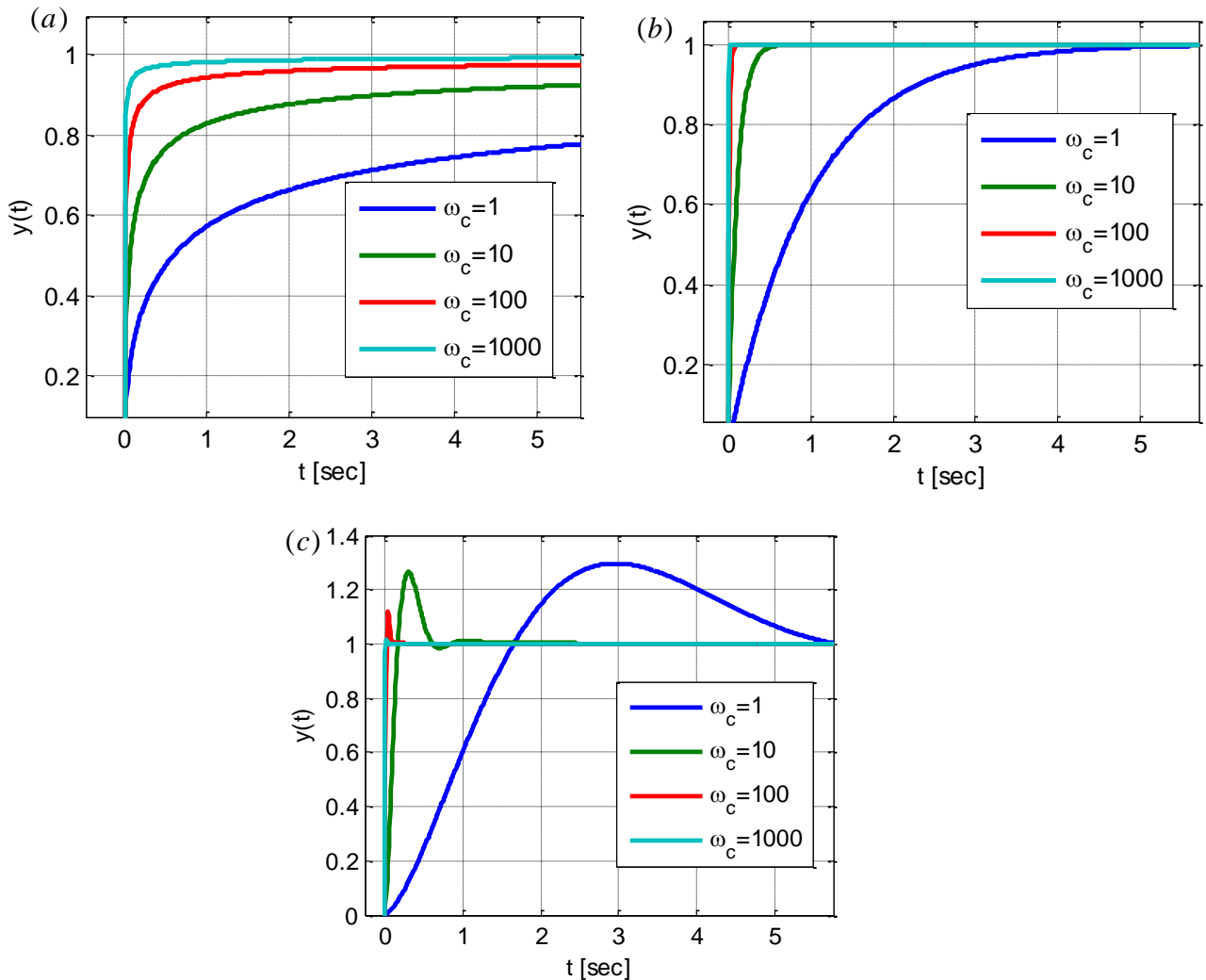


Figure 5. Step responses of Bode’s ideal loop closed-loop transfer functions for (a) $\alpha = 0.5$, (b) $\alpha^* = 1$ and (c) $\alpha = 1.5$

Figure 5 shows step responses of the closed-loop transfer functions of Bode’s ideal loop for various crossover frequencies and different fractional orders. (FOTF toolbox was used to perform the step response simulations (Xue, 2017). These step responses in the figure validate the results in Table 1. The ISE performance of Bode’s ideal loop is the best at $\alpha^* = 1$ because the control error $|e(t)| = |1 - y(t)|$ is the lowest for $\alpha^* = 1$ for the same values of the ω_c . In the figure, an increase in the crossover frequency can improve the ISE performance in general. However, the crossover frequency of real-world systems is finite and limited. When this limitation of real-world control systems is taken into account, Bode’s ideal loop with $\alpha^* = 1$ promises the best ISE control performance at a given crossover frequency of the system. It is a noteworthy point that Bode’s ideal loops offer robust stability in the case of crossover frequency variations as shown in the figure.

Table 1. Minimum ISE search results for the various range of ω_c

Search range of ω_c	ω_c^*	α^*	Minimum ISE
$\omega_c \in [1,10]$	10	1	$5 \cdot 10^{-2}$
$\omega_c \in [1,100]$	100	1	$5 \cdot 10^{-3}$
$\omega_c \in [1,1000]$	1000	1	$5 \cdot 10^{-4}$
$\omega_c \in [1,2000]$	2000	1	$2.5 \cdot 10^{-4}$
$\omega_c \in [1,5000]$	5000	1	$9.99 \cdot 10^{-5}$
$\omega_c \in [1,10000]$	10000	1	$4.99 \cdot 10^{-5}$

3. Numerical Experiments

3.1. An ISE Optimal Bode’s Ideal Loop Inverse Controller Design for Minimum Phase Plant Models

This section presents an inverse controller design example, which is based on the ISE Optimal Bode's ideal loop reference model. To observe the contributions of Bode's ideal loop reference model, the open loop transfer function of the control system exactly matches the open loop transfer function of ISE optimal Bode's ideal loop and this assures fully matching of frequency responses. Accordingly, this controller structure is referred to as ISE Optimal Bode's Ideal Loop Inverse (OBILI) controller in this study. The inverse control is based on the utilization of an inverse model of the plant function for the controller design. (It was also known as the direct synthesis method (Fergani, 2022). Previously, the inverse control strategy has been applied in the control systems (J. Cho et al., 2006; Deniz, 2022; Fergani, 2022; Nagarsheth & Sharma, 2020; Saxena & Biradar, 2022; Shafiq, 2005; Yadav & Hirenkumar, 2022; Yumuk et al., 2016; Zheng et al., 2020) and it has been implemented in conjunction with several control system types such as in fuzzy control systems (Kumbasar et al., 2011), in neural network control (Narendra & Parthasarathy, 1990), in PID controller design (Chakraborty et al., 2020; Jeng & Lin, 2012). A Smith predictor based fractional-order PI control law is suggested by using direct synthesis (Vu & Lee, 2014). The second generation CRONE controller design has also been utilized from the inverse controller design scheme (Lanusse et al., 2013). In this section, we illustrate a generic inverse controller structure that exactly matches with the frequency response of ISE optimal Bode's ideal loop for minimum phase plant models.

For this purpose, the open loop transfer function is matched with Bode's ideal loop transfer function as follows:

$$C(s)G(s) = \left(\frac{\omega_c}{s}\right)^\alpha. \quad (14)$$

Then, the Bode's ideal loop inverse controller is obtained as

$$C(s) = \frac{1}{G(s)} \left(\frac{\omega_c}{s}\right)^\alpha, \quad (15)$$

where the $C(s)$ is the inverse controller function and $G(s)$ is the plant function that is controlled by the controller $C(s)$ in a negative feedback loop (Zheng et al., 2020). Figure 6 shows a block diagram of the closed-loop control system with the inverse controller $C(s)$.

We assumed that the minimum phase plant function model is accurate and well-represent the real system response. Under this modeling assumption, it is investigated whether the loop shaping designs based on the ISE optimal Bode's ideal loop reference model can improve the robustness and optimality of the designed closed-loop control system. By matching with the optimal ISE Bode's ideal loop reference model, the designed control system inherits the frequency domain properties of Bode's ideal loop reference model; for instance, providing flattened phase response and a decrease of the magnitude response with almost a constant slope in log-log scales.

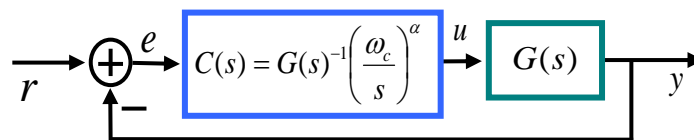


Figure 6. Block diagram of the closed-loop Bode's ideal loop inverse control

The findings of analyses in the previous section have demonstrated that the ISE optimality of Bode's ideal loop reference model is possible for $\alpha^* = 1$ and $\omega_c^* \rightarrow \infty$, the ISE OBILI controller can be expressed in the form of cascaded two functions as follows:

$$C(s) = G(s)^{-1} \left(\frac{\omega_c}{s}\right)_{\omega_c^* \rightarrow \infty}, \quad (16)$$

where $G(s)^{-1}$ is the inverse function of the plant model and the term $(\omega_c/s)_{\omega_c^* \rightarrow \infty}$ stands for the ISE optimal Bode's ideal loop reference model. (This term indeed performs an ideal integral operation with the infinite bandwidth.) Eqn. 16 reveals a design concern to improve the ISE optimality of this control system, that is, the maximization of crossover frequency ω_c . This maximization improves the ISE optimality without causing overshoots in settling. Thus, the OBILI controller function with Eqn. 16 achieves a control performance that allows an enhanced ISE optimality with an overshoot-free settling and the control robustness that allows insensitivity to the crossover frequency fluctuations of the control system.

In the literature, several approaches were proposed for the inverse control of non-minimum phase plant models. Minimum phase and non-minimum phase parts are separated (Arya & Chakrabarty, 2018) and approximated (Saxena & Biradar, 2022; Yadav & Hirenkumar, 2022; Yumuk et al., 2016). Works on Internal Model Control techniques have suggested effective solutions for dealing with non-minimum phase plant models (Arya & Chakrabarty, 2018; Kumbasar et al., 2011; Saxena & Hote, 2022). To illustrate a simplified design example for robust control performance analysis, we consider a class of minimum phase fractional order plant model that has been expressed in the form of

$$G(s) = \frac{1}{a_2 s^{\beta_2} + a_1 s^{\beta_1} + a_0}, \quad (17)$$

An analytical optimal FOPID controller design method has been proposed by Zhao et al. for this class of the fractional order plant model (Zhao et al., 2005). One can generalize this class of minimum phase plant function for n number of fractional elements as

$$G(s) = \frac{K}{a_n s^{\beta_n} + a_{n-1} s^{\beta_{n-1}} + \dots + a_2 s^{\beta_2} + a_1 s^{\beta_1} + a_0}, \quad (18)$$

An ISE OBILI controller for this class of fractional plant function can be designed in a generic form by considering Eqn. 16 as,

$$C(s) = (k_n s^{\beta_n-1} + k_{n-1} s^{\beta_{n-1}-1} + \dots + k_2 s^{\beta_2-1} + k_1 s^{\beta_1-1} + k_0 s^{-1})_{\omega_c^* \rightarrow \infty}, \quad (19)$$

Then, one can rearrange this controller function to express it in a more elegant form as follows:

$$C(s) = \left(\frac{k_0}{s} + \sum_{i=1}^n k_i s^{\beta_i-1} \right)_{\omega_c^* \rightarrow \infty}, \quad (20)$$

where the controller coefficients are $k_i = \frac{\omega_c a_i}{K}$. In fact, Eqn. 20 infers a generic fractional order controller that involves transformative fractional order elements: The term s^{β_i-1} infers a fractional order derivative element for $\beta_i > 1$, it transforms to a fractional order integral element in the case of $\beta_i < 1$ and it becomes a constant gain element for $\beta_i = 0$. This flexibility of the generic OBILI controller structure allows for taking over all features of Bode's ideal loop reference model. Previously, generic model control has been studied and the advantage of generic model controller designs has been illustrated by Lee et al. (Kharrazi et al., 2012; Lee & Sullivan, 1988).

3.2. A Numerical Study for Control of a Heating Furnace System Model

In this section, we illustrate a design example for a fractional order nominal model of a heating furnace that was written by

$$G(s) = \frac{1}{14994s^{1.31} + 6009.5s^{0.97} + 1.93}, \quad (21)$$

where the nominal model parameters of the heating furnace according to Eqn. 18 are $K = 1$, $a_2 = 14994$, $a_1 = 6009.5$, $a_0 = 1.93$, $\beta_2 = 1.31$, $\beta_1 = 0.97$ (Podlubny, 1994; Zhao et al., 2005). Let us design an OBILI controller with $\omega_c = 0.2$ rad/s for the plant function that is given by Eqn. 21. ($\omega_c = 0.2$ rad/s is suitable for physically implementable heating furnace control.) By considering Eqn. 20 and taking $n = 2$ for the number of fractional order elements in the plant function (Eqn. 21), the generic controller function can be written by

$$C(s) = \frac{k_0}{s} + k_1 s^{\beta_1-1} + k_2 s^{\beta_2-1}, \quad (22)$$

where controller coefficients are $k_2 = \omega_c a_2 / K = 0.2 \times 14994 / 1 = 2998.8$, $k_1 = \omega_c a_1 / K = 0.2 \times 6009.5 / 1 = 1201.9$ and $k_0 = \omega_c a_0 / K = 0.2 \times 1.93 / 1 = 0.3860$. Then, by using $\beta_2 = 1.31$ and $\beta_1 = 0.97$, the proposed OBILI controller becomes

$$C_{OBILI}(s) = 0.3860s^{-1} + 1201.9s^{-0.03} + 2998.8s^{0.31}. \quad (23)$$

For the plant function (Eqn. 21), a FOPID controller has been designed in (Zhao et al., 2005) as follows:

$$C_Z(s) = 736.8054 - 0.5885s^{-0.6} - 818.4204s^{0.35}, \quad (24)$$

Figure 7 shows Bode plots of the proposed OBILI control system and the optimal FOPID control system that was designed for a phase margin of $\frac{\pi}{3}$ rad and a gain margin of 1.1 by (Zhao et al., 2005). Zhao et al.'s approach does not consider ISE optimality. One can see that the frequency responses of the Bode's ideal loop and the proposed OBILI control system completely match and therefore the OBILI control system takes all inherent properties of the optimal Bode's ideal loop such as the iso-damping property, independence of phase response from the crossover frequency of the system and ISE optimality for $\alpha^* = 1$. Specifically, the OBILI control system achieves complete phase flatness at $\frac{\pi}{2}$ rad in the phase response. However, Zhao et al.'s optimal FOPID control system provides a slight slope around the crossover frequency. These results show that the OBILI control system can provide control performance assets that are inherited from the ISE optimal Bode's ideal loop. Zhao et al.

Figure 8 shows unit step responses of the proposed OBILI controller and Zhao et al.'s FOPID controller from the control simulation of the heating furnace model. The OBILI control provides a faster settling without any overshoots and its step response can completely overlap with the step response of the closed-loop transfer function of the Bode's ideal loop. This result also confirms the matching of time response properties of the OBILI control system and Bode's ideal loop and inherits optimality and robustness assets of Bode's ideal loop in the time domain. The optimal FOPID control settles in a longer period by producing a slight overshoot. The figure clearly shows that the ISE optimality of the proposed OBILI control can also be preferable when compared to the ISE optimality of the Zhao et al.'s optimal FOPID control.

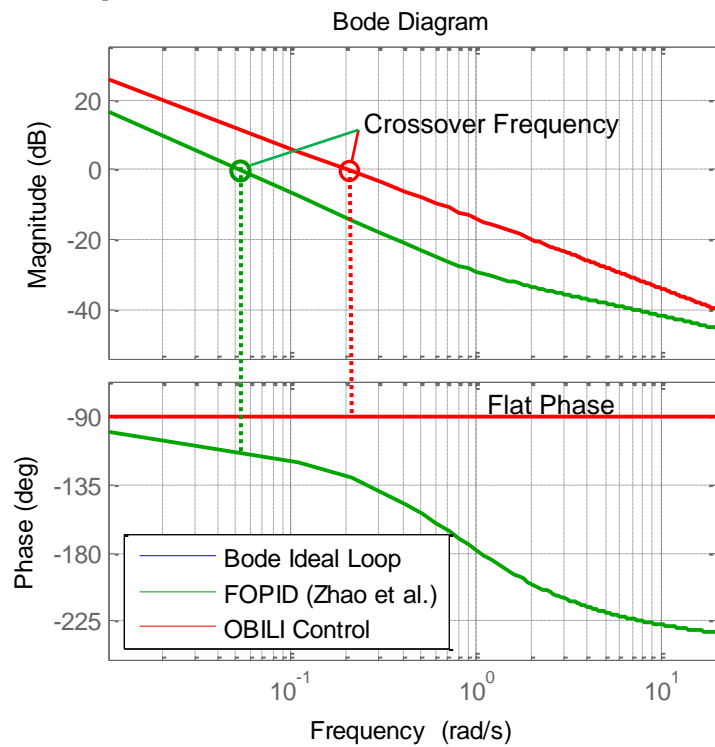


Figure 7. Frequency responses of the proposed OBILI control and the optimal FOPID control for the heating furnace model

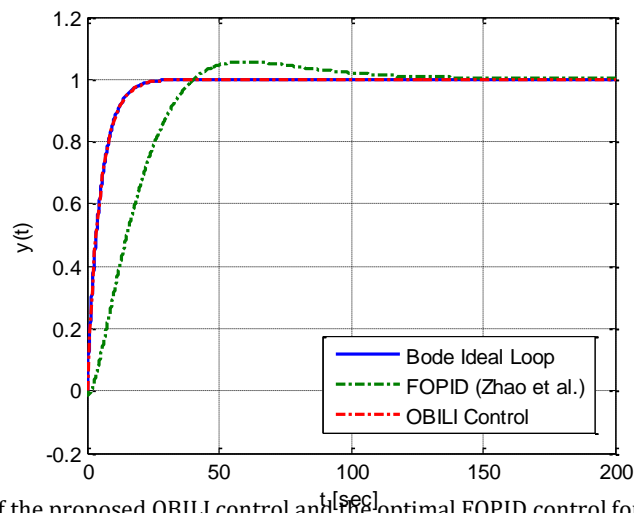


Figure 8. Unit step responses of the proposed OBILI control and the optimal FOPID control for the heating furnace model

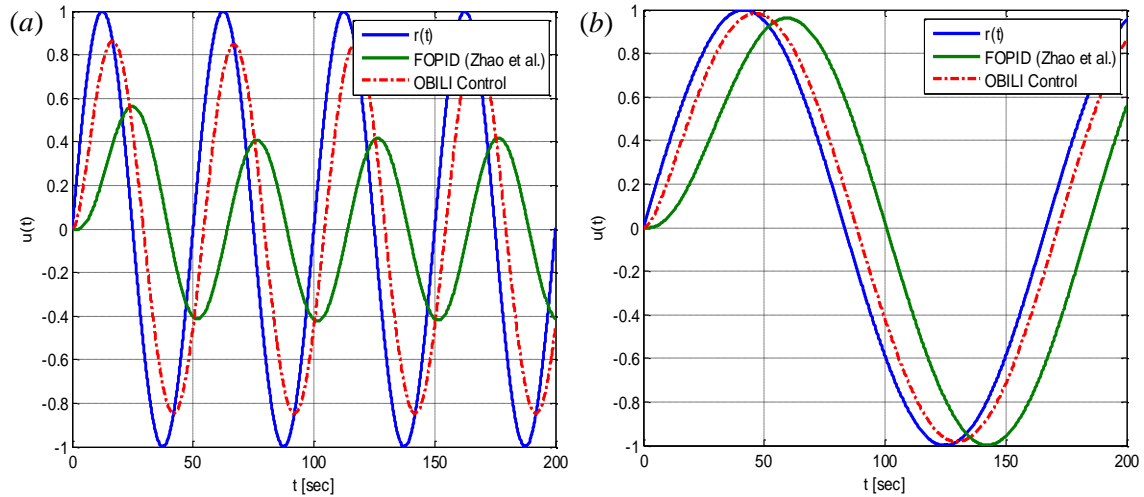


Figure 9. Time responses of the proposed OBILI control and the optimal FOPID control for sinusoidal reference inputs

To observe response of complete phase flatness at $\frac{\pi}{2}$ rad, sinusoidal reference signals with angular frequencies of 0.1257 rad/sec and 0.0377 rad/sec were applied, and responses of both controllers are illustrated in Figure 9. Since the crossover frequency of Zhao et al.'s FOPID control system is lower than the reference signal frequency 0.1257 rad/sec, it cannot well-track the reference signal amplitude, and the output amplitude is attenuated. (For attenuation-free control, the phase crossover frequency should be greater than the maximum operation frequency ω_{max} , accordingly the crossover frequency depending on application requirements can be selected according to application requirements as $\omega_c > \omega_{max}$) Since the phase response of the FOPID control system is not flat, varying phase delay is observed at the output of the FOPID control system for changing frequency of the reference input signal. However, the phase delay of the proposed OBILI control system is lower at these frequencies and it is almost constant when frequency of the reference signal is changed. This effect is called as the phase delay robustness that is related to the complete phase flatness property of OBILI control. It can also better track the sinusoidal reference signal because the crossover frequency of controller is greater than frequencies of sinusoidal waveforms in figures.

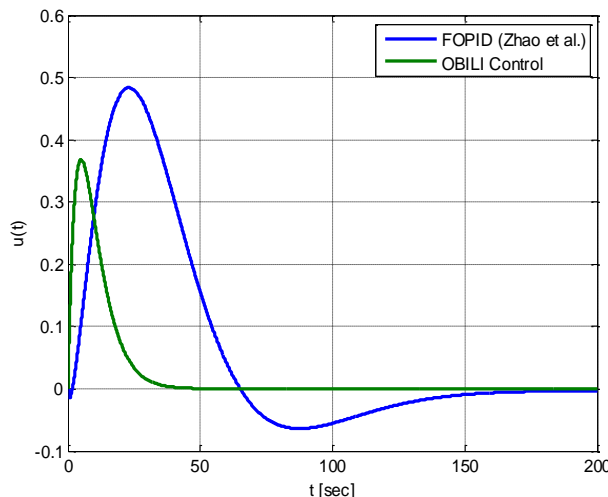


Figure 10. Control signals for the proposed OBILI control and the optimal FOPID control for the heating furnace model

Figure 10 shows control signals ($u(t)$) for the proposed OBILI and Zhao et al.'s FOPID controllers. The OBILI controller can achieve optimal control with lower amplitude and lower energy control signal compared to Zhao et al.'s FOPID controller.

It is useful to investigate the robust control performance of the control systems under the parametric perturbations of the plant model. Figure 11 shows the unit step responses of the proposed OBILI controller and the optimal FOPID controller (Zhao et al., 2005) for the parametric perturbation of the model coefficients. The gain coefficients $K = 1$ and $a_2 = 14994$ are increased 1.5 and 2 times to perform a high variability in these coefficients.

Then, we observed the sensitivity of the step responses to each variation in these coefficients to evaluate the control performance robustness of the control systems. The figure illustrates that the OBILI control can present a more robust step response performance than the optimal FOPID control for such variations in the gain coefficients. (Deviations in step responses of the OBILI control are less than those of optimal PID control) As discussed in the previous sections, this robust performance improvement is achievable because of inheriting all assets of Bode Ideal loops.

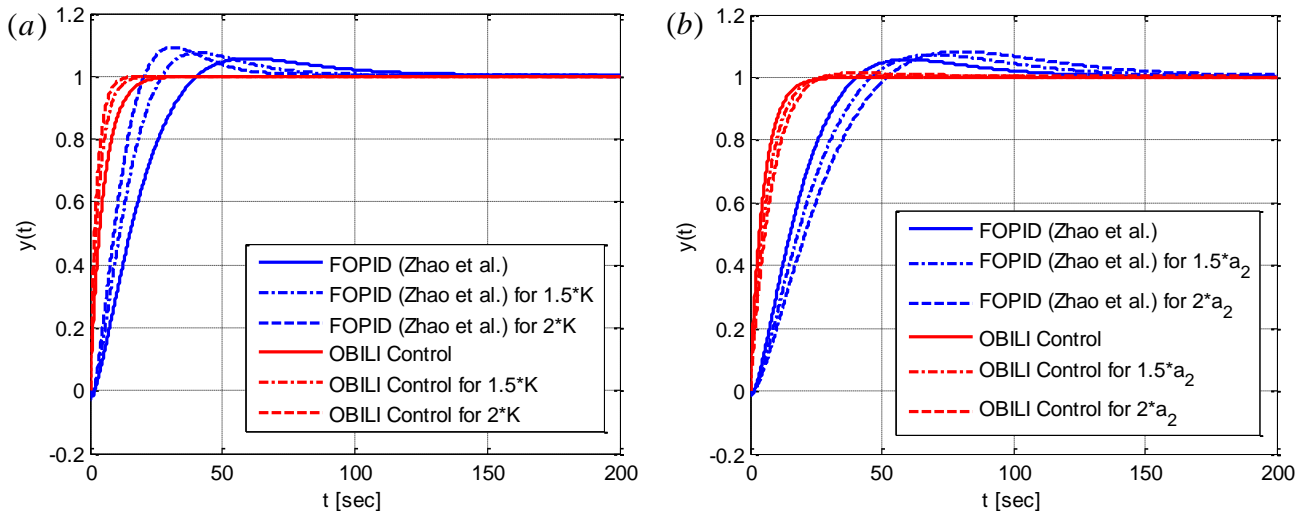


Figure 11. Changes in the unit step responses of the proposed OBILI control and the optimal FOPID control under parametric perturbations of the heating furnace model for the gain parameters K in (a) and the denominator coefficient a_2 in (b)

It is also valuable to consider changeability in step responses of the proposed OBILI controller and the optimal FOPID controller (Zhao et al., 2005) under the fractional model order perturbations. Figure 12 shows step responses of the proposed OBILI controller and the FOPID controller under parametric perturbations of the model orders β_1 and β_2 . The order $\beta_1 = 0.97$ was changed to $1.2 \times \beta_1$ and $0.8 \times \beta_1$. The order $\beta_2 = 1.31$ is changed to $1.2 \times \beta_2$ and $0.8 \times \beta_2$. These order variations can be assumed as a significant variation in the fractional order system dynamics. The step response of the OBILI controller is less affected by these order variations compared to the optimal PID controller. (Deviations in step responses of OBILI control is less than those of the optimal PID control) These numerical experiments indicate that the step response performance robustness of the OBILI control under the variations of the fractional model orders could be relatively better than those of the optimal FOPID control. Reasons for this improvement in robust control performance can be closely related to Bode’s ideal loop properties that are associated with the phase response flatness (iso-damping property) and the constant slope of the magnitude curve. Another factor can be the higher crossover frequency of the OBILI control system.

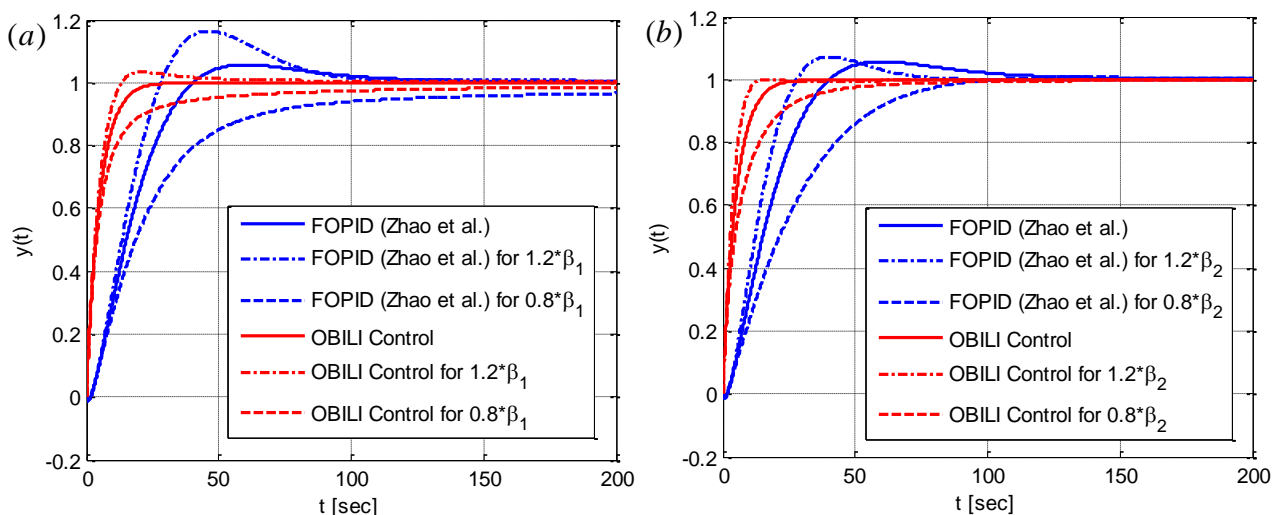


Figure 12. Changes in the unit step responses of the proposed OBILI control and the optimal FOPID control for parametric perturbations of the heating furnace model for the fractional order parameters β_1 in (a) and β_2 in (b)

Table 2 lists the ISE performances of the control systems under the parametric model perturbations that were illustrated in Figures 11 and 12. The ISE data in the table confirms both enhanced ISE optimality and the improved performance robustness of the proposed OBILI control system.

Table 2. ISE performances of the proposed OBILI control system and the optimal FOPID control system (Zhao et al., 2005) under some parametric model perturbations

Plant Model and Parametric Perturbations	The optimal FOPID Control System	The proposed OBILI Control System
ISE for the nominal system	113.25	25.75
ISE under $1.5 \times a_2$ coefficient perturbation	135.28	32.94
ISE under $2.0 \times a_2$ coefficient perturbation	155.86	39.85
ISE under $1.5 \times K$ coefficient perturbation	85.10	17.42
ISE under $2.0 \times K$ coefficient perturbation	70.41	13.25
ISE under $1.2 \times \beta_2$ fractional order perturbation	93.28	21.32
ISE under $0.8 \times \beta_2$ fractional order perturbation	157.31	36.26
ISE under $1.2 \times \beta_1$ fractional order perturbation	107.48	23.73
ISE under $0.8 \times \beta_1$ fractional order perturbation	147.39	32.76

3.3. Monte Carlo Simulations for Analysis of Control Performance Robustness

In order to more realistically analyze performance robustness in case of parametric perturbations of the fractional order heating furnace model, we randomly varied all parameters of the heating furnace model in the interval uncertainty ranges that involve $\pm 50\%$ deviation range from nominal values of the gain coefficients and $\pm 20\%$ deviation range from nominal values of the fractional orders of the model. For these uncertainty ranges, the interval uncertain model of the heating furnace model can be expressed as.

$$G(s) = \frac{1}{[7497,22491]s^{[0.655,1.965]} + [3004.8,9014,3]s^{[0.485,1.455]} + [0.965,2.895]} \tag{25}$$

Accordingly, by performing 100 times uniform random sampling of the model parameters within the deviation ranges, 100 versions of parametric perturbed heating furnace model were randomly generated from the interval uncertain system model (Eqn. 25). Thus, a Monte Carlo simulation of the control robustness was carried out to observe the robustness of the step response and ISE performances. Figure 13 shows randomly sampled parameter distributions for each parameter of the heating furnace model.

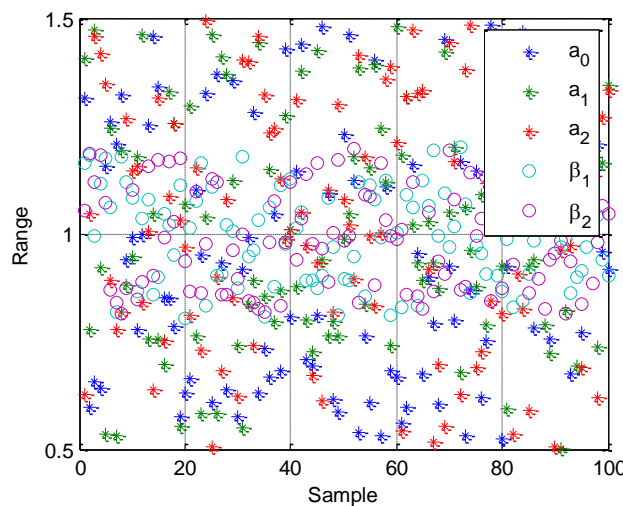


Figure 13. The random sampled parameter distributions from the interval uncertainty range to mimic unpredictable parametric perturbations of the heating furnace model

Figure 14 shows the unit step responses of the proposed OBILI controller and the optimal FOPID controller (Kharrazi et al., 2012) for all perturbed models. The dispersion in the step responses is less for the OBILI control than the dispersion in the FOPID control, and these results suggest that the OBILI control can respond more robustly to the parametric perturbation of the system model. The ISE performance distributions in Figure 15 confirm these results. Table 3 lists ISE performance statistics of the control systems for 100 randomly perturbed plant models and verifies the contributions of the proposed OBILI control to the improvement of robust control performance. Figure 16 shows the convergence of the average ISE of both control systems during the Monte Carlo simulation.

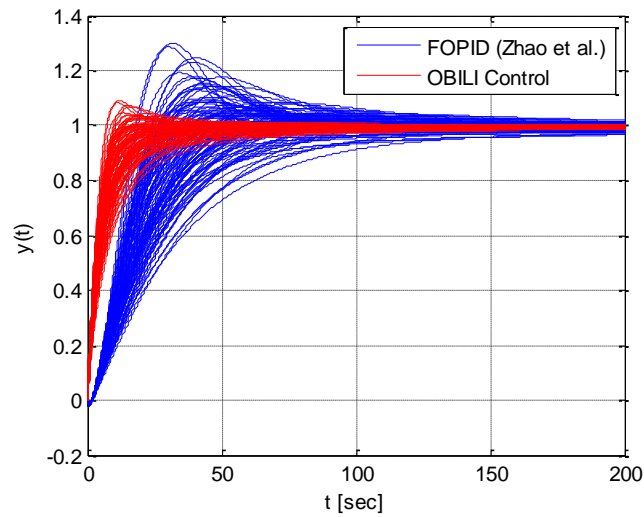


Figure 14. Unit step responses of the proposed OBILI controller and the optimal FOPID controller for all randomly perturbed versions of the heating furnace model

Table 3. Comparisons of ISE performance statistics for the proposed OBILI control system and Zhao et al.’s optimal FOPID control system

ISE Statistics	FOPID Control System	The proposed OBILI Control System
Mean value of ISE	124.07	28.29
Standard deviation of ISE	27.02	7.20
Maximum value of ISE	208.56	50.07
Minimum value of ISE	85.03	17.31

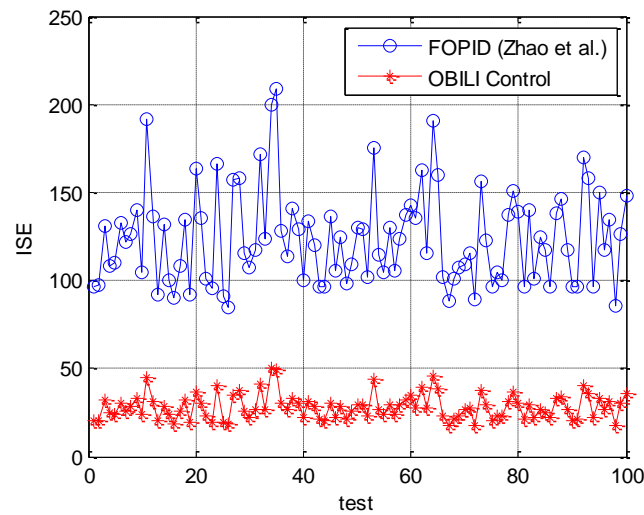


Figure 15. ISE performances of both control systems for 100 randomly perturbed versions of the heating furnace model

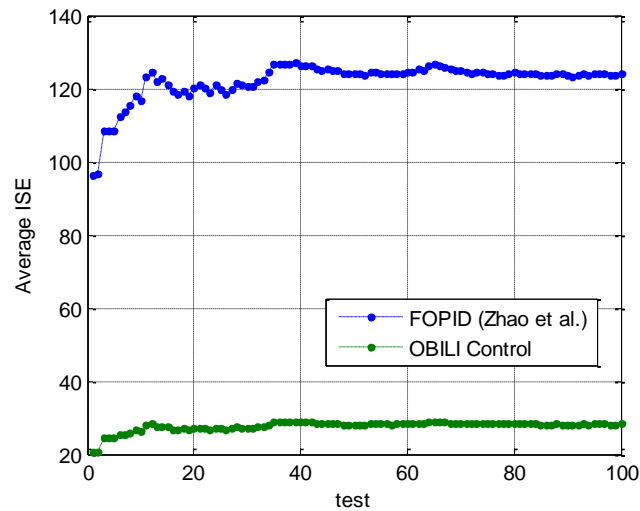


Figure 16. Convergence of average ISE performances of both control systems for all randomly perturbed versions of the heating furnace model from Monte Carlo simulation

4. Discussions and Conclusions

The fractional order control topic has come up with a robust control performance paradigm (Manabe, 1960). Loop shaping design methodologies based on Bode's ideal loop contribute to this paradigm. Although it has been used as a reference model in controller design to improve performance robustness, a detailed investigation of Bode's ideal loop itself is quite limited. In this fashion, we aim to revisit Bode's ideal loops in this study. After briefly surveying the role of Bode's ideal loops in the system design, the control optimality of Bode's ideal loop reference models was discussed. The author revealed a sufficient control optimality condition for closed-loop Bode's ideal loops by numerically solving the stated ISE optimization problem. The numerical solution of this optimization problem indicated that the fractional order value of 1 ($\alpha^* = 1$) and the highest possible value of the crossover frequency parameter (ideally $\omega_c^* \rightarrow \infty$) can enhance the ISE optimality of Bode's ideal loops. These findings are significant for controller design because of suggesting improvement in both performance robustness and the ISE optimality in the loop shaping controller design.

This study elaborated two assets of Bode's ideal loops for control system design practice: (i) performance robustness for gain variations and (ii) the ISE optimality. On the other hand, analysis results indicate an important performance limitation of control systems, that is, in order to improve the ISE control performance, maximization of the crossover frequency is required in Bode's ideal loop-based control system designs. This result confirms Åström's conjecture that suggests the crossover frequency of real systems as a limitation for control performance (Åström, 2000). The current study demonstrated the underlying mechanism of this limitation in relation with the optimality of Bode's ideal loops. We also conclude that an ideally optimal design with zero ISE requires an infinite bandwidth system due to the condition of $\omega_c^* \rightarrow \infty$. In reality; the finite crossover frequency nature of real-world systems introduces a physical limitation for the ISE optimality of the Bode's ideal loop-based control system designs.

Realization of fractional order elements is possible by using approximate equivalent models today. OBILI controller models for the non-minimum phase plant are unstable because of occurrence of poles in right-side of s-domain, and this may lead to realization complications. Due to practical design concerns, we addressed a generic type of OBILI controller for the closed-loop control of a class of fractional order minimum phase plant models with n-fractional order denominator elements. This generic fractional-order controller structure allows matching with frequency response characteristics of Bode's ideal loops and possesses all frequency domain properties of Bode's ideal loop reference model. Furthermore, the optimal Bode's ideal loop reference model also makes an important practical contribution to optimal and robust loop shaping controller design methodologies. Essentially, the OBILI control design scheme reduces the need for solving optimization problems for optimal tuning of controller coefficients. Rather, the OBILI control design scheme can provide very effective generic fractional order controller solutions, particularly for minimum phase processes. To demonstrate these design improvements, the OBILI controller design scheme was illustrated for the closed-loop control of the fractional order heat furnace system model, and control performance improvements in terms of the ISE optimality and the robustness against parametric perturbation were verified by using Monte Carlo simulation for statistical analyses of performance robustness. Future works can address OBILI controllers for the non-minimum phase plant model and their realization problems.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Alagoz, B.B., 2018. Fractional order linear time invariant system stabilization by brute-force search. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(5), 1447–1456.
- Alagoz, B.B., Ates, A., Yeroglu, C., 2013. Auto-tuning of PID controller according to fractional-order reference model approximation for DC rotor control. *Mechatronics*, 23(7), 789–797.
- Arya, P.P., Chakrabarty, S., 2018. IMC based fractional order controller design for specific non-minimum phase systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 847–852.
- Åström, K.J., 2000. Limitations on control system performance. *European Journal of Control*, 6(1), 2–20.
- Barbosa, R.S., Machado, T.J.A., Ferreira, I.M., 2004. PID controller tuning using fractional calculus concepts. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 7, 121–134.
- Barbosa, R.S., Machado, J.A.T., Ferreira, I.M., 2004. Tuning of PID controllers based on bode's ideal transfer function. *Nonlinear Dynamics*, 38(1–4), 305–321.
- Bode, H.W., 1945. *Network analysis and feedback amplifier design*. D. Van Nostrand Company.
- Bolton, W., 2004. Frequency response. *Instrumentation and Control Systems*, pp. 252–281. Elsevier Science & Technology Books.
- Bower, J.L., Schultheiss, P.M., 1961. *Introduction to the design of servomechanisms*. Wiley.
- Chakraborty, S., Naskar, A.K., Ghosh, S., 2020. Inverse plant model and frequency loop shaping-based PID controller design for processes with time-delay. *International Journal of Automation and Control*, 14(4), 399–422.
- Chen, Y., Moore, K.L., Vinagre, B.M., Podlubny, I., 2005. Robust PID Controller Autotuning With An Iso-Damping Property Through A Phase Shaper. *Fractional Differentiation and its Applications*, pp. 687–706.
- Chen, Y.Q., Dou, H., Vinagre, B.M., Monje, C.A., 2006. A robust tuning method for fractional order PI controllers. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2(PART 1), 22–27.
- Cho, J.-H., Hwang, H.-S., 2007. Design of PID Controller to Ensure Specified Phase Margin and Iso-damping Property Using Reduction Model. In: *The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE) Conference*, pp. 113–118.
- Cho, J., Principe, J.C., Erdogmus, D., Motter, M.A., 2006. Modeling and inverse controller design for an unmanned aerial vehicle based on the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17(2), 445–460.
- Deniz, F. N., 2022. An effective Smith predictor based fractional-order PID controller design methodology for preservation of design optimality and robust control performance in practice. *International Journal of Systems Science*, 53(14), 2948–2966.
- Doğruer, T., Yüce, A., Tan, N., 2017. PID Controller Design for a Fractional Order System using Bode's Ideal Transfer Function. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 9(3), 126–135.
- Doyle, J., Francis, B., Tannenbaum, A., 1990. *Feedback Control Theory*. Macmillan.
- Faisal, S.F., Beig, A.R., Thomas, S., 2021. Real-time implementation of robust loop-shaping controller for a vsc hvdc system. *Energies*, 14(16), 4955.
- Feliu-Batlle, V., Castillo-García, F.J., 2014. On the robust control of stable minimum phase plants with large uncertainty in a time constant. A fractional-order control approach. *Automatica*, 50(1), 218–224.
- Fergani, N., 2022. Direct synthesis-based fractional-order PID controller design: application to AVR system. *International Journal of Dynamics and Control*, 10(6), 2124–2138.
- Horowitz, I.M., 1963. *Synthesis of Feedback Systems*. Academic Press.
- Jeng, J.-C., Lin, S.-W., 2012. Robust proportional-integral-derivative controller design for stable/integrating processes with inverse response and time delay. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(6), 2652–2665.
- Kealy, T., O'dwyer, A., 2003. Analytical ISE calculation and optimum control system design. In: *Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference*, pp. 418–423.
- Kharrazi, S., Lidberg, M., Fredriksson, J., 2012. A generic controller for improving lateral performance of heavy vehicle combinations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(5), 619–642.
- Kumbasar, T., Eksin, İ., Guzelkaya, M., Yesil, E., 2011. Adaptive fuzzy model based inverse controller design using BB-BC optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12356–12364.
- Lanusse, P., Malti, R., Melchior, P., 2013. CRONE control system design toolbox for the control engineering community: Tutorial and case study. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1990), 1–14.
- Lee, P. L., Sullivan, G. R., 1988. Generic model control-theory and applications. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 21(4), 111–119.
- Li, H., & Chen, Y., 2008. A fractional order proportional and derivative (FOPD) controller tuning algorithm. In: *Chinese Control and Decision Conference*, pp. 4059–4063.
- Li, H., Zhao, Y., Zhang, X., Zhang, B., Li, Z., 2020. An analytical parameter tuning method for fractional order PI λ controller based on ideal closed loop response. *Developments of Artificial Intelligence Technologies in Computation and Robotics*, In: *Proceedings of the 14th International FLINS Conference (FLINS 2020)*, pp. 1391–1399.
- Luo, Y., Chen, Y.Q., 2009. Fractional order [proportional derivative] controller for a class of fractional order systems. *Automatica*, 45(10), 2446–2450.
- Manabe, S., 1960. The non-integer integral and its application to control systems. *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, 80(860), 589–597.

- Matušů, R., Şenol, B., Pekař, L., 2018. Robust stability of fractional-order linear time-invariant systems: Parametric versus Unstructured Uncertainty Models. *Complexity*, 2018, 1–12.
- Merrikh-Bayat, F., 2012. General rules for optimal tuning the PIAD μ controllers with application to first-order plus time delay processes. *Canadian Society for Chemical Engineering*, 90(6), 1400–1410.
- Nagarsheth, S.H., Sharma, S.N., 2020. Control of non-minimum phase systems with dead time: a fractional system viewpoint. *International Journal of Systems Science*, 51(11), 1905–1928.
- Narendra, K.S., Parthasarathy, K., 1990. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1(1), 4–27.
- Podlubny, I., 1994. Fractional-order systems and fractional-order controllers. *Slovak Academy of Science Institute of Experimental Physics: Vol. UEF-03-94*.
- Saha, S., Das, S., Ghosh, R., Goswami, B., Balasubramanian, R., Chandra, A.K., Das, S., Gupta, A., 2010. Design of a fractional order phase shaper for iso-damped control of a PHWR under step-back condition. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(3 PART 3), 1602–1612.
- Sahoo, A.K., Mishra, S.K., 2021. Design of Lagrangian-based FOPID controller for desired closed loop system. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 30(04), 2150064.
- Saidi, B., Amairi, M., Najar, S., Aoun, M., 2015. Bode shaping-based design methods of a fractional order PID controller for uncertain systems. *Nonlinear Dynamics*, 80(4), 1817–1838.
- Saxena, S., Biradar, S., 2022. Fractional-order IMC controller for high-order system using reduced-order modelling via Big-Bang, Big-Crunch optimisation. *International Journal of Systems Science*, 53(1), 168–181.
- Saxena, S., Hote, Y.V., 2022. Design of robust fractional-order controller using the Bode ideal transfer function approach in IMC paradigm. *Nonlinear Dynamics*, 107, 983–1001.
- Shafiq, M., 2005. Internal model control structure using adaptive inverse control strategy. *ISA Transactions*, 44(3), 353–362.
- Vinagre, B.M., Chen, Y.Q., Petráš, I., 2003. Two direct Tustin discretization methods for fractional-order differentiator/integrator. *Journal of the Franklin Institute*, 340(5), 349–362.
- Vu, T.N.L., Lee, M., 2014. Smith predictor based fractional-order PI control for time-delay processes. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31, 1321–1329.
- Wang, C.Y., Jin, Y.S., Chen, Y.Q., 2009. Auto-tuning of FOPI and FO[PI] controllers with iso-damping property. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 01(435), pp. 7309–7314.
- Xue, D., 2017. Fractional-order control systems. *Fundamentals and numerical implementations*. De Gruyter, pp. 372.
- Yadav, M., Hirenkumar, G.P., 2022. Control of non-minimum phase system using inverse response compensator with different approximations. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 40(1), 59–69.
- Yumuk, E., Guzelkaya, M., Eksin, İ., 2016. Reduced integer order inverse controller design for single fractional pole model. In: *24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 148–153.
- Yumuk, E., Güzelkaya, M., Eksin, İ., 2019. Analytical fractional PID controller design based on Bode's ideal transfer function plus time delay. *ISA Transactions*, 91, 196–206.
- Zhang, L., Zhang, Q., Wang, W., 2020. Application of Ideal Bode Transfer Function Tuning Fractional Order PID in Pressure Difference of Vertical Mill. In: *Proceedings of the 32nd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2020*, pp. 3501–3505.
- Zhao, C., Xue, D., Chen, Y., 2005. A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants. In: *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, pp. 216–221.
- Zheng, W., Luo, Y., Chen, Y.Q., 2020. A fractional order controller design based on bode's ideal transfer function and bode's ideal cut-off ideas. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 3663–3668.
- Zhou, K., Doyle, J.C., Glover, K., 1998. *Robust Optimal Control*. Prentice Hall.
- Zhuo-Yun, N., Yi-Min, Z., Qing-Guo, W., Rui-Juan, L., Lei-Jun, X., 2020. Fractional-Order PID Controller Design for Time-Delay Systems Based on Modified Bode's Ideal Transfer Function. *IEEE Access*, 8, 103500–103510.

Appendix:

A Matlab code for the numerical calculation of Eqn. 11 is given below.

```
% Matlab code for the numerical calculation of Eqn. 11
wc=100; % Crossover frequency
alpha=1; % Fractional order
% Matlab codes for Eq.11
fw=@(w,wc,alpha) (abs((1./(1+(wc./(sqrt(-1).*w)).^alpha)).*(1./(sqrt(-1).*w))).^2);
% Numerical integral calculation
E=(1/(2*pi))*integral(@(w) fw(w,wc,alpha),-1e+10,1e+10)
```



DETERMINATION OF CLIMATE TYPE AND EVAPOTRANSPIRATION FOR BURDUR LAKE BASIN USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS AND DIFFERENT METHODS

İ. İskender SOYASLAN^{1*}, Kerem HEPDENİZ²

¹Department of Civil Engineering, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Türkiye

²Department of Architecture and Urban Planning, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Türkiye

Keywords

Burdur Lake Basin, Evapotranspiration, Climate Type, Geographic Information Systems.

Abstract

The surface area of Lake Burdur has been gradually shrinking every year. The most important factors causing this water loss are the climate type of the basin and evapotranspiration. In hydrogeological basin studies, one of the discharge parameters used in hydrological water balance calculations is the actual evapotranspiration. Thornthwaite, Blaney-Criddle and Schendel methods were used to calculate evapotranspiration for the basin. When the results of the three methods were compared, Thornthwaite method gave results closer to the average values. Thornthwaite Climate Classification method was chosen to determine the climate type by accepting that Thornthwaite method represents the basin climate characteristics. Precipitation index, humidity index and drought index were calculated to determine the climate type. Precipitation efficiency index values are in arid-semi humid (C1) climate type for all stations. Drought index value is 'very strong water deficit in summer' for all stations. (s2) and 'very strong water deficit in winter' (w2) precipitation regime. Moisture index values for all stations are in the precipitation regime of 'moderate water surplus in summer' (s) and 'moderate water surplus in winter' (w). It is concluded that Burdur Lake basin has arid-semi humid climate type and has arid climate class.

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ VE FARKLI YÖNTEMLER KULLANILARAK BURDUR GÖLÜ HAVZASI İÇİN İKLİM TİPİ VE EVAPOTRANSPIRASYONUN BELİRLENMESİ

Anahtar Kelimeler

Burdur Gölü Havzası, Evapotranspirasyon, İklim Tipi, Coğrafi Bilgi Sistemleri.

Öz

Burdur Gölü'nün göl yüzey alanı her yıl giderek küçülmektedir. Bu su kaybına sebep olan en önemli unsurları olarak havzanın iklim tipi ve evapotranspirasyon gösterilebilir. Hidrojeolojik havza etütlerinde hidrolojik su bilançosu hesaplamalarında kullanılan boşalım parametrelerinden bir tanesi gerçek evapotranspirasyondur. Havza için evapotranspirasyon hesaplamasında Thornthwaite, Blaney-Criddle ve Schendel yöntemleri kullanılmıştır. Üç yöntemin sonuçları karşılaştırıldığında Thornthwaite yöntemi ortalama değerlere daha yakın sonuçlar vermiştir. Thornthwaite yönteminin havza iklim özelliklerini temsil ettiği kabul edilerek, iklim tipinin belirlenmesinde Thornthwaite İklim Sınıflandırma yöntemi seçilmiştir. İklim tipinin belirlenmesinde yağış indisi, nemlilik indeksi ve kuraklık indisi hesaplanmıştır. Yağış etkinlik indisi değerleri tüm istasyonlar için arid-semi humid (C1) iklim tipindedir. Kuraklık indisi değeri tüm istasyonlar için "yazın çok kuvvetli su noksanı" (s2) ve "kışın çok kuvvetli su noksanı" (w2) yağış rejimine sahiptir. Nemlilik indisi değerleri tüm istasyonlar için "yazın orta derecede su fazlası" (s) ve "kışın orta derecede su fazlası" (w) yağış rejimindedir. Burdur Gölü havzası kurak-yarı nemli iklim tipine sahip ve arid iklim sınıfına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Alıntı / Cite

Soyaslan, İ. İ., Hepdeniz, K., (2025). Determination of Climate Type and Evapotranspiration for Burdur Lake Basin Using Geographical Information Systems and Different Methods, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(1), 221-233.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. İ. Soyaslan, 0000-0001-5282-8094
K. Hepdeniz, 0000-0003-4182-5570

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	03.12.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	09.01.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* Corresponding author: isoyaslan@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-2717

DETERMINATION OF CLIMATE TYPE AND EVAPOTRANSPIRATION FOR BURDUR LAKE BASIN USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS AND DIFFERENT METHODS

İ. İskender SOYASLAN^{1†}, Kerem Hepdeniz²

¹Department of Civil Engineering, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Türkiye

²Department of Architecture and Urban Planning, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Türkiye

Highlights

- Determination of climate type and evapotranspiration (ET) of Lake Burdur basin
- Comparison of ET calculation methods
- Evaluation of climate data calculated using meteorological station data in the basin in GIS

Graphical Abstract

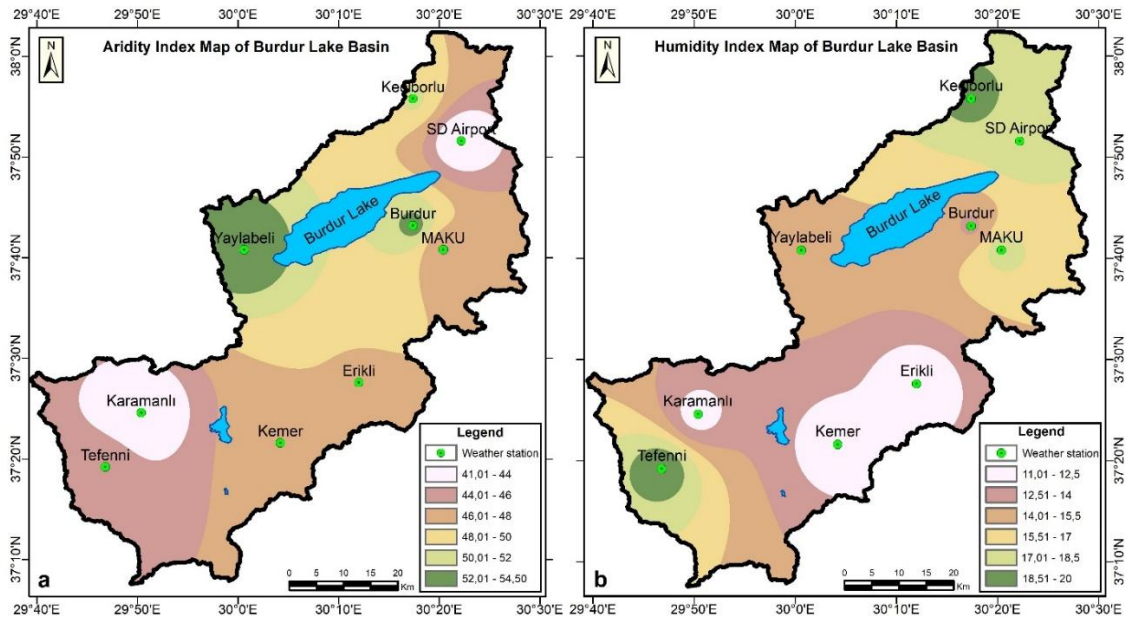


Figure. Aridity index (a) and humidity (b) maps of Burdur Lake Basin

Purpose and Scope

The aim of this study is to calculate ET and climate parameters for the Burdur Lake basin using different methods and to determine the dominant climate type. In addition to this main objective, the calculated climate parameters are converted into thematic maps in GIS environment.

Design/methodology/approach

In the study, a literature review of similar studies was conducted and analysed. Three of the ET calculation methods suitable for the study area were selected and used. The results of these methods were compared and it was concluded that the method closest to the actual evaporation values best represents the study area. Climate parameters used in determining the climate type were calculated using the data of meteorological stations in the basin area. The results obtained were analysed in cbs environment and thematic maps were prepared.

Findings

Three different ET calculation methods were used to analyse the actual evaporation values for the basin. Among these methods, it was determined that the Thornthwaite method gives the closest results to the actual pan evaporation values and is the most suitable calculation method for the basin. Dominant climate classifications were determined from the climate parameters calculated according to the meteorological station data in the study area. These parameters were analysed in GIS environment and thematic maps were prepared. Accordingly, it was concluded that Burdur Lake basin has arid-semi humid climate type and has arid climate class.

Originality

No previous study on ET calculation methods and climate classifications in the basin has been found in the literature. The ability of the calculation methods to represent the study area was checked by comparing with actual pan evaporations. It was shown that the Thornthwaite method can produce remarkable results for areas with similar climatic characteristics. In addition, the prevailing climatic characteristics were revealed by determining the climatic parameters and the role of climatic characteristics in the water losses in Lake Burdur was determined.

[†] Corresponding author: isoyaslan@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-2717

1. Introduction

The most crucial task in hydrogeological studies of a basin is the preparation of a water budget. Groundwater budget calculations are generally used to assess the sustainability of withdrawals for different purposes. The results of the groundwater budget provide information on significant external groundwater changes and support stakeholders in managing groundwater resources (Viaroli *et al.*, 2018). The groundwater budget operates on the assumption that the amount of water entering and exiting an aquifer, which is assumed to be in balance during a designated time frame, is equivalent. This period also considers the variation in water stored inside the aquifer. Calculations pertaining to alterations in recharge and discharge, including future projections, are termed the groundwater budget. Formulating the groundwater budget aims to determine the sustainable groundwater draw from the basin. Groundwater extraction must not surpass the natural recharge rate (Demiroğlu, 2017). The safe groundwater reserve defines the maximum volume of water that can be withdrawn from the aquifer without causing its depletion throughout the specified budgetary term.

Numerous research studies have been undertaken on the fluctuations in water levels of Lake Burdur. The investigations identified the causes of the water level reduction as changes in meteorological data, changes in surface runoff, excessive groundwater extraction, and poor land utilization (Kansoh *et al.*, 2020; Gözükarar *et al.*, 2019; Ataoğlu, 2010). Researchers have examined the abrupt declines in water levels of Lake Urmia, Iran, by analyzing the relationship between hydro-meteorological variables and components of the water budget. This study concluded that precipitation and evaporation could modify the groundwater and flow dynamics within the basin (Vaheddoost *et al.*, 2022). A study that looked at evapotranspiration (ET) in the irrigated ecosystem of the Qinghai Lake basin on the Tibetan Plateau found that it is important for environmental protection to understand the water balance of ET (Cao *et al.*, 2020).

The factors contributing to the recent reductions in water levels of Lake Bracciano, Italy's seventh largest lake, have been examined. This study analyzes the hydrogeological water budget, climate change, and anthropogenic effects (Filippi and Sappa, 2024). The drought experienced in the Mediterranean Region over the past decade has inflicted significant harm on water ecosystems and their management (Guion *et al.*, 2022; Mathbout *et al.*, 2021; Oroud, 2018).

In hydrological water budget calculations, two groups of parameters are used: recharge and discharge. The recharge parameters include precipitation, groundwater recharge, surface runoff recharge, and artificial recharge through irrigation. The discharge parameters consist of evaporation, groundwater flow, surface runoff, and groundwater extraction via boreholes (Robertson *et al.*, 2022). Discharge parameters include evaporation, groundwater flow, surface runoff, and groundwater extraction through drilling (Martin and Yang, 2023). Precipitation and evaporation values are directly calculated using meteorological data, while hydrological and hydrogeological methods are employed to determine the other parameters. In the calculation of ET, the latitude of the study area, monthly average temperature, and monthly average precipitation values are used. These values vary depending on the climate classification of the study area. The temporal decline in the water level of Lake Burdur highlights the significance of evaporation values (Soyaslan and Hepdeniz, 2016).

ET and climatic factors significantly affect a region's water budget, which is crucial for water resource management, evaluating drought effects, and comprehending local hydrological cycles. ET, encompassing both evaporation and plant transpiration, directly influences groundwater levels, soil moisture, and surface water supplies. Changes in climatic factors such as temperature, humidity, and solar radiation, which impact water availability and regional hydrological cycles, influence variations in ET rates (Hu and Mo, 2022; Wang *et al.*, 2022).

Climate can be defined as the variations in all weather events observed throughout the year in a given region. Meteorological data, explained based on long-term observations and measurements, are referred to as climate characteristics. Turkey is located on a transition zone for global air masses. Most of Turkey lies in the subtropical belt, with polar climatic conditions dominating the north and macroclimatic zones prevailing in the south (Aydın *et al.*, 2019; Öztürk *et al.*, 2017; Bölük, 2016). In recent years, studies have been conducted using Geographic Information System (GIS) technologies to investigate the elevation-dependent variations of key climate parameters and climate zones (Aydın *et al.*, 2019). However, it has been determined that there is a discrepancy between thematic maps derived from station data and those based on elevation correlations (Yılmaz and Çiçek, 2018). Therefore, climate characteristics do not show a direct variation based solely on elevation.

Climate has a significant impact on human life. Due to this influence, climate has been classified into various types. The primary purpose of determining climate classes is to delineate the boundaries of similar and distinct climate types worldwide (İrcan and Duman, 2021; MGM, 2016). Identifying climate characteristics in a basin is crucial for all hydrological and hydrogeological studies conducted on a basin scale (Aydınözü and Sözcü, 2020). This is

because meteorological data are inevitably used in all hydrological and hydrogeological studies, and climate characteristics play a key role. Climate directly or indirectly influences all natural and human activities on Earth. Therefore, determining the climate characteristics of a region is of great importance.

Climatic conditions with different characteristics are represented by various climatological classifications. Numerous climate classification methods are employed in the classification of climates. Some of these methods include De Martonne, Erinc, Holdridge, Köppen, Trewartha, Palmer, and Thornthwaite (İrcan and Duman, 2021). In this study, the Thornthwaite method was used for climate classification. The Thornthwaite climate classification is essentially based on the relationship between precipitation-evaporation and temperature-evaporation. In the Thornthwaite method, when precipitation exceeds evaporation, the soil becomes saturated with water, resulting in water surplus. In such cases, the climate can be described as humid. Conversely, when precipitation is less than evaporation, there is no water in the soil, leading to water deficiency. In this case, the climate is defined as arid. The Thornthwaite climate classification varies between two values: water surplus and water deficiency (MGM, 2016).

2.. Material and Method

2.1. Study Area

The study area is located within the provincial boundaries of Burdur and Isparta, encompassing Lake Burdur, and the districts of Kemer, Tefenni, Karamanlı, and Keçiborlu. The Burdur Lake basin covers an area of approximately 81.55 km² between 29°40'-30°30' East longitude and 37°05'-38°05' North latitude (Figure 1).



Figure 1. Location map

The basin is a depression plain surrounded by high mountains, located within the boundaries of the 1:100,000 scale topographic map sheets L24, M23, M24, N23, and N24. The southern part of the study area is bordered by the Western Taurus Mountains, with elevations reaching up to 2250 meters. The lowest elevation is at the water level of Lake Burdur, which drops to approximately 846 meters. The basin, characterized as a depression plain, is bounded by high mountains to the north and south, with the central part where Lake Burdur is located having lower elevations.

One of the most significant environmental issues within the Burdur Lake basin is the decline in the lake's water level. Over time, this has led to a noticeable shrinkage of Lake Burdur. In recent years, the construction of dams and ponds on the rivers that feed the lake has been cited as one of the reasons for the reduction in its water level (Soyaslan and Hepdeniz, 2016). Additionally, the expansion of irrigated agricultural areas, increased groundwater use, and changes in climate characteristics are thought to contribute to this issue. It is necessary to determine the climate type and ET to assess their impact on the lake's decreasing water level.

The basin distinguishes between autochthonous and allochthonous geological units. The autochthonous units include the Oligocene-aged Karaburun Formation, the Pliocene-aged Burdur Formation, Quaternary-aged alluvium, colluvium, and alluvial cones. The allochthonous unit is represented by the Mesozoic-aged Gökçebağ ophiolitic melange (Ala, 2001).

2.2. Proposed Method

Potential evapotranspiration (ET_p) is the maximum amount of water lost through evaporation and transpiration under specific climatic conditions. Actual evapotranspiration (ET_a) refers to the ET that transpires in accordance with the monthly average precipitation volume (Soyaslan, 2004). ET_p and ET_a are computed utilizing numerous parameters and distinct methodologies. The ET_p and ET_a values were calculated using the Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), Blaney-Criddle (Blaney and Criddle, 1950) and Schendel methods (Schendel, 1968). For each of these three methods, the precipitation, temperature, and relative humidity values measured at nine meteorological stations in the basin were used. These nine meteorological stations are Burdur, Erikli, Kemer, Yaylabeledi, Karamanlı, MAKU, Tefenni, SD Airport, and Keçiborlu stations (Figure 2).

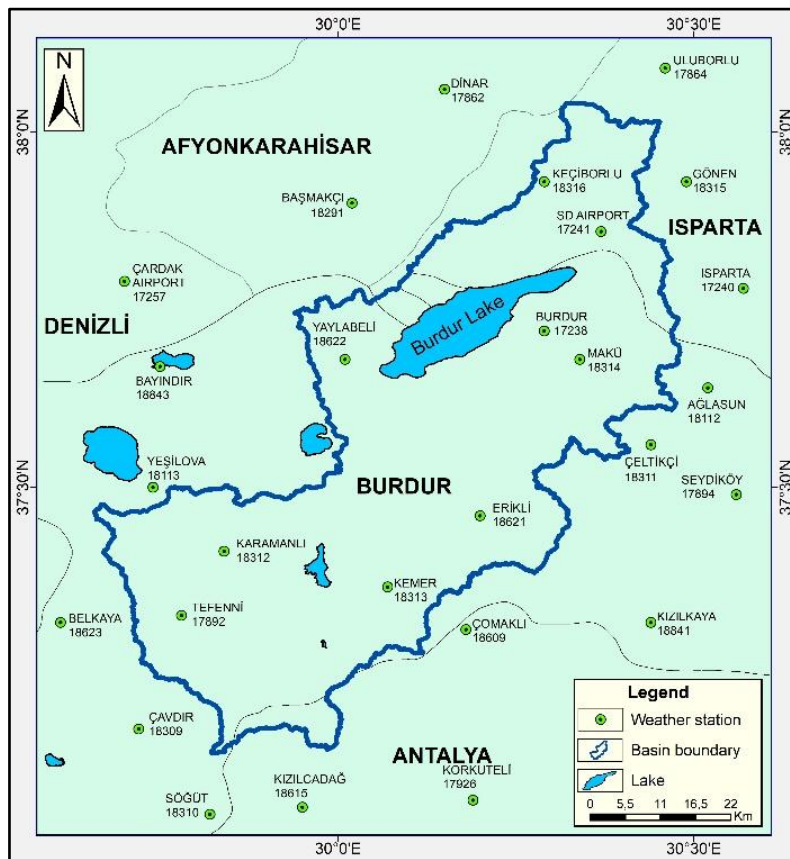


Figure 2. Location map of meteorological stations

2.2.1. The thornthwaite method

The Thornthwaite method utilizes average monthly temperature and latitude correction coefficients to calculate ET_p values. The expressions and formulas used in the Thornthwaite method are provided below (Thornthwaite, 1948). The monthly temperature index is given in Equation 1, the annual total temperature index is presented in Equation 2, the coefficient 'a' is shown in Equation 3, and ET_p is specified in Equation 4.

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (1)$$

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (2)$$

$$a=6.7510 * 10^{-7} * I^3 - 7.7110 * 10^{-5} * I^2 + 1.791210 * 10^{-2} * I + 0.49239 \quad (3)$$

$$ET_p = 16 * \left(\frac{10 * t}{I} \right)^a * p \quad (4)$$

t: Monthly average temperature (°C)
 i: Monthly temperature index
 I: Annual total temperature index
 ET_p: Monthly potential ET amount (mm)
 p: Latitude correction coefficient.

The latitude correction coefficient (G) used in the calculation of monthly ET is a value prepared based on average sunshine duration. It varies according to the latitude of the meteorological station and has been published by Thornthwaite.

2.2.2. Blaney-Criddle method

The Blaney-Criddle method utilizes average monthly temperature and latitude correction coefficients in the calculation of ET_p values. The ET_p formula in the Blaney-Criddle method is presented in Equation 5 (Blaney and Criddle, 1950).

$$ET_p = 25.4 * t * p \quad (5)$$

ET_p: Monthly potential ET amount (mm),
 t: Monthly average temperature (°C),
 p: Latitude correction coefficient.

2.2.3. Schendel method

The Schendel method utilizes average monthly temperature and average relative humidity values in the calculation of ET_p. The ET_p formula in the Schendel method is presented in Equation 6 (Schendel, 1968).

$$ET_p = \frac{t}{H * 480} \quad (6)$$

ET_p: Monthly potential ET (mm),
 t: Monthly average temperature (°C),
 H: Average monthly relative humidity (%).

2.2.4. Thornthwaite precipitation index

According to Thornthwaite, climates are classified into two categories—humid and arid—based on the relationship between precipitation and ET (Table 1). The results obtained using the precipitation effectiveness index formula are categorized according to the letters and climatic characteristics outlined in this table (İrcan and Duman, 2021; Türkeş, 2010; Birsoy and Ölgen, 1992; Ardel *et al.*, 1969). The Thornthwaite precipitation index formula is presented in Equation 7.

$$I_m = \frac{(100 * s) - (60 * d)}{ET_p} \quad (7)$$

I_m: Precipitation effectiveness index,
 s: Annual water surplus (mm),
 d: Annual water deficit (mm),
 ET_p: Annual potential ET (mm).

Table 1. Thornthwaite Precipitation Efficiency Index and climate characteristic

I_m	Symbol	Climate type	
>100	A	Very humid	Humid climate
100-80	B4	Humid	
80-60	B3	Humid	
60-40	B2	Humid	
40-20	B1	Humid	
20-0	C2	Semi-humid	Drought climate
0-(-20)	C1	Drought-semi humid	
(-20)-(-40)	D	Semi-drought	
(-40)>	A	Full drought	

2.2.5. Thornthwaite drought index

One of the Thornthwaite precipitation regime indices is the drought index. The drought index is generally used for humid climates where precipitation is abundant. The formula for the drought index (I_a) is presented in Equation 8.

$$I_a = \frac{100 * d}{p} \quad (8)$$

d: Annual water deficit (mm),
ETp: Annual potential ET (mm).

The classification of the Thornthwaite drought index is presented in Table 2 (Yılmaz and Çiçek, 2020; MGM, 2016; Birsoy and Ölgün, 1992).

Table 2. Thornthwaite aridity index classification

I_a	Symbol	Climate type
0-16.7	r	No or very little water deficiency
16.8-33.3	s	Moderate water deficiency in summer
16.8-33.3	w	Moderate water deficiency in winter
33.4< I_a	s2	Very strong water deficiency in summer
33.4< I_a	w2	Very strong water deficiency in winter

2.2.6. Thornthwaite humidity index

One of the Thornthwaite precipitation regime indices is the humidity index. The humidity index is typically used for arid climates where precipitation is low. The formula for the humidity index (I_h) is given in Equation 9.

$$I_h = \frac{100*s}{Etp} \quad (9)$$

In Equation 9, s represents the annual water surplus (mm) and Etp (mm) represents the annual potential evaporation. The Thornthwaite moisture index classification is provided in Table 3 (Yılmaz and Çiçek, 2016; MGM, 2016; Birsoy and Ölgün, 1992).

Table 3. Thornthwaite humidity index classification

I_h	Symbol	Climate type
0-10	d	No or very little water surplus
11-20	s	Moderate water surplus in winter
11-20	w	Moderate water surplus in summer
21< I_h	s2	Very strong water surplus in winter
21< I_h	w2	Very strong water surplus in summer

2.2.7. Geographic information systems

The Etp, Etr, water surplus, and water deficit values obtained from the adjusted water budget derived through the Thornthwaite method were transferred to a GIS environment. Point-based meteorological station data were converted into raster data representing the entire basin using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. The IDW interpolation method is based on weighting the inverse of the distance between data points and the point to be estimated. In the IDW method, the main goal is to reduce the influence of distant points on the predicted value

as the distance from the data points increases. The standard IDW method does not impose any restrictions on the selection of data points (Khouni *et al.*, 2021; Göçsu and Hastaoğlu, 2019; Luo *et al.*, 2008).

3. Results and Discussions

3.1. Evapotranspiration (ET) Methods

The Thornthwaite, Blaney-Criddle, and Schendel methods were used to calculate the ET_p and ET_a values for the Burdur Lake Closed Basin. ET_a graphs were prepared using data from nine different meteorological stations within the study area (Figure 3).

When comparing the three methods used in the calculation in terms of ET_a values, it is observed that the values from the Blaney-Criddle method are lower, while those from the Schendel method are higher. The ET_r values obtained from the Thornthwaite method generally fall between the two. In the Thornthwaite method, the ET_a value reached its maximum in June, when the soil moisture reserve was depleted. After the depletion of the soil reserve, the ET_a value in July decreased, as it only reflected the amount of available precipitation.

In the Blaney-Criddle method, a simple formula is used to calculate ET_r values by applying a latitude correction factor and monthly average temperatures. Consequently, the ET_r values obtained from this method tend to be below average, yielding very low results. As a result, it cannot be said that this method fully represents the climatic characteristics of the study area.

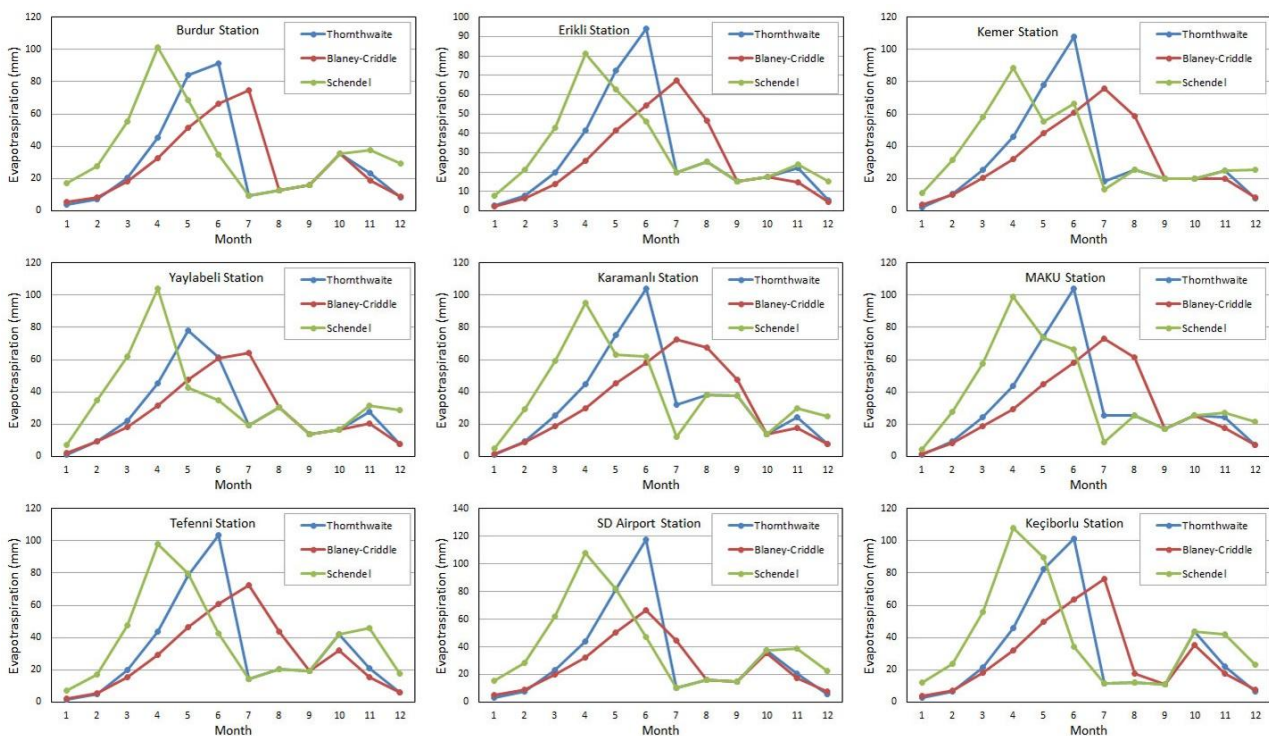


Figure 3. Actual evapotranspiration (ET_a) graphs obtained by different methods for Burdur Lake Closed Basin stations

The Schendel method is more applicable to countries like Germany, which have higher rainfall, resulting in higher ET_r values. Thus, it depletes the soil moisture reserve around April and reaches maximum values. In the following months, since ET_r occurs at the same rate as the amount of precipitation, the ET_r value decreases rapidly. It can be said that this method is more suitable for regions in Turkey with a climate similar to the Black Sea, where rainfall is more prevalent.

As a result of all these evaluations, it was concluded that the Thornthwaite method represents the study area better than the other methods. This result was also found to be consistent with previous studies (Soyaslan, 2004; Ala, 2001). In determining climatic characteristics, the data from the adjusted water budget table obtained through the Thornthwaite method were utilized (Table 4).

Table 4. Thornthwaite method water balance

Stations	Etp (mm)	Precip (mm)	Etr (mm)	Water deficiency (mm)	Water surplus (mm)
Burdur	754.79	395.97	356.63	398.16	103.63
Erikli	658.72	332.08	326.27	332.46	74.86
Kemer	736.76	394.22	385.86	350.90	85.24
Yaylabeli	729.79	390.16	332.22	397.56	112.78
Karamanlı	703.63	435.23	413.22	290.40	83.32
MAKU	705.87	445.62	382.05	323.81	124.31
Tefneni	697.35	472.67	375.90	321.46	137.23
SD Airport	763.29	483.51	382.03	381.25	139.32
Keçiborlu	739.93	473.73	367.54	372.39	140.92

According to the Thornthwaite method, the highest Etp values were recorded at the SD Airport, Burdur, and Keçiborlu stations. These three stations are located near the lake and have the lowest elevation values. The highest Etr values, on the other hand, were obtained at the Karamanlı, Kemer, and Makü stations. It is observed that the elevation values of these stations are higher compared to the other stations (Figure 4). The primary reason for the differing Etp and Etr values between the Burdur (957 m) and MAKU (1230 m) stations, which are geographically very close to each other, is their difference in elevation.

According to the Thornthwaite method, the highest water deficit values were recorded at the SD Airport, Burdur, and Keçiborlu stations. These three stations are located near the lake and have the lowest elevation values. In contrast, the highest Etr values were obtained at the Karamanlı, Kemer, and Makü stations, which are observed to have higher elevation values compared to the other stations (Figure 4). The primary reason for the differing Etp and Etr values between the Burdur (955 m) and MAKU (1220 m) stations, which are very close to each other geographically, is their difference in elevation. The most significant evidence for this is that the Erikli station, which has the lowest Etp and Etr values, also has the highest elevation at 1357 m.

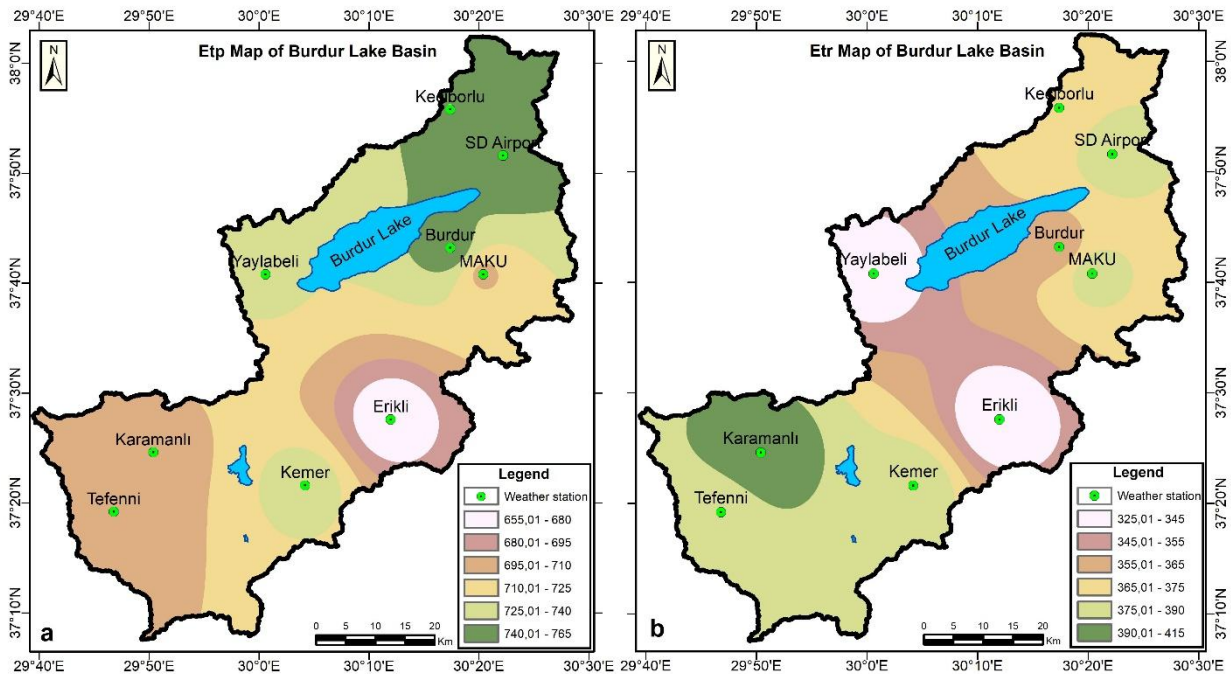


Figure 4. Etp (a) and Etr (b) maps of Burdur Lake Basin

According to the Thornthwaite method, the highest water deficit values were recorded at the Yaylabeli (398 mm), Burdur (398 mm), and SD Airport (381 mm) stations. Among these, the SD Airport (869 m) and Burdur (957 m) stations have the lowest elevations in the basin (Figure 5). Additionally, obtaining water deficit values at the three stations surrounding Burdur Lake is a significant finding. The lowest water surplus value, on the other hand, is primarily concentrated in the southwestern part of the basin, particularly at the Karamanlı station. It is evident that there is a marked decrease in water surplus from the northeast to the southwest of the basin.

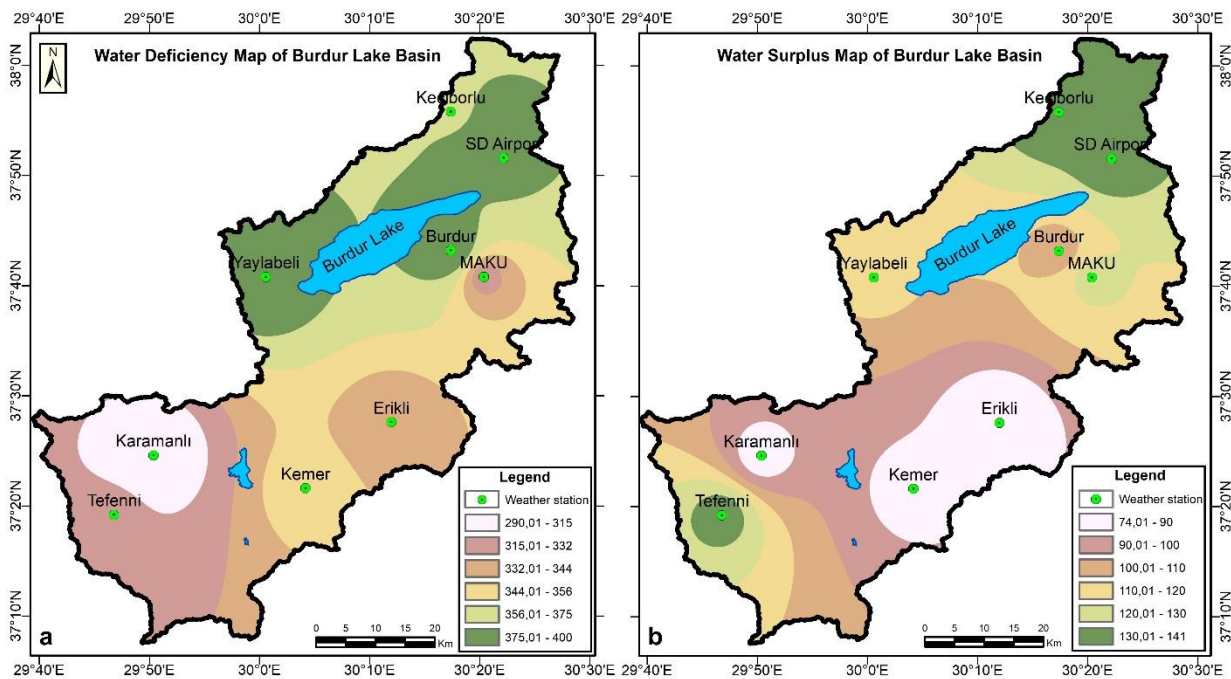


Figure 5. Water deficiency (a) and water surplus (b) maps of Burdur Lake Basin

There is a noticeable decrease in water deficit from the northwest to the southeast of the basin. At the Tefenni station, located in the far southwestern part of the basin, the water deficit value increases again. The highest water deficit values are recorded at the Keçiborlu (141 mm), SD Airport (139 mm), and Tefenni (137 mm) stations, respectively. The primary reasons for the high water deficit values at these stations are the elevated Etp values and the early depletion of the soil moisture reserves. In contrast, the lowest water deficit values are found at the Erikli (75 mm), Karamanlı (83 mm), and Kemer (85 mm) stations, which are situated in the central part of the basin.

3.2. Thornthwaite Climate Classification Indices

The annual total Etp values, annual total water deficit, and annual total water surplus obtained from the Thornthwaite adjusted water budget calculations were used to compute the precipitation effectiveness indices (Table 5).

Table 5. Thornthwaite precipitation regime indices

Stations	Precipitation activity index (Im)	Aridity Index (Ia)	Humidity Index (Ih)
Burdur	-17.91	52.74	13.73
Erikli	-17.33	47.83	11.36
Kemer	-17.09	47.76	11.57
Yaylabeli	-17.23	54.48	15.45
Karamanlı	-12.92	41.27	11.84
MAKU	-9.91	45.87	17.61
Tefenni	-7.44	45.19	19.68
SD-Airport	-6.79	41.29	17.98
Keçiborlu	-11.15	50.33	19.05

For the study area, the calculated Thornthwaite Precipitation Activity Index (Im) ranged between 0 and -20 for all meteorological stations. According to the Thornthwaite precipitation effectiveness index, the entire basin falls within the 'arid-semi-humid' (C1) climate type and is classified as an arid climate.

The Aridity Index (Ia) values obtained for all stations were greater than 33.4. Accordingly, all stations within the basin exhibit a 'very strong water deficit in summer' (s2) and 'very strong water deficiency in winter' (w2) rainfall regime. The Humidity Index (Ih) values were calculated to range between 10 and 20 for all stations. Based on these results, all stations in the basin have a 'moderate water surplus in summer' (s) and 'moderate water surplus in winter' (w) rainfall regime. The Aridity and Humidity Index values were used to prepare thematic aridity and humidity maps in a GIS environment (Figure 6).

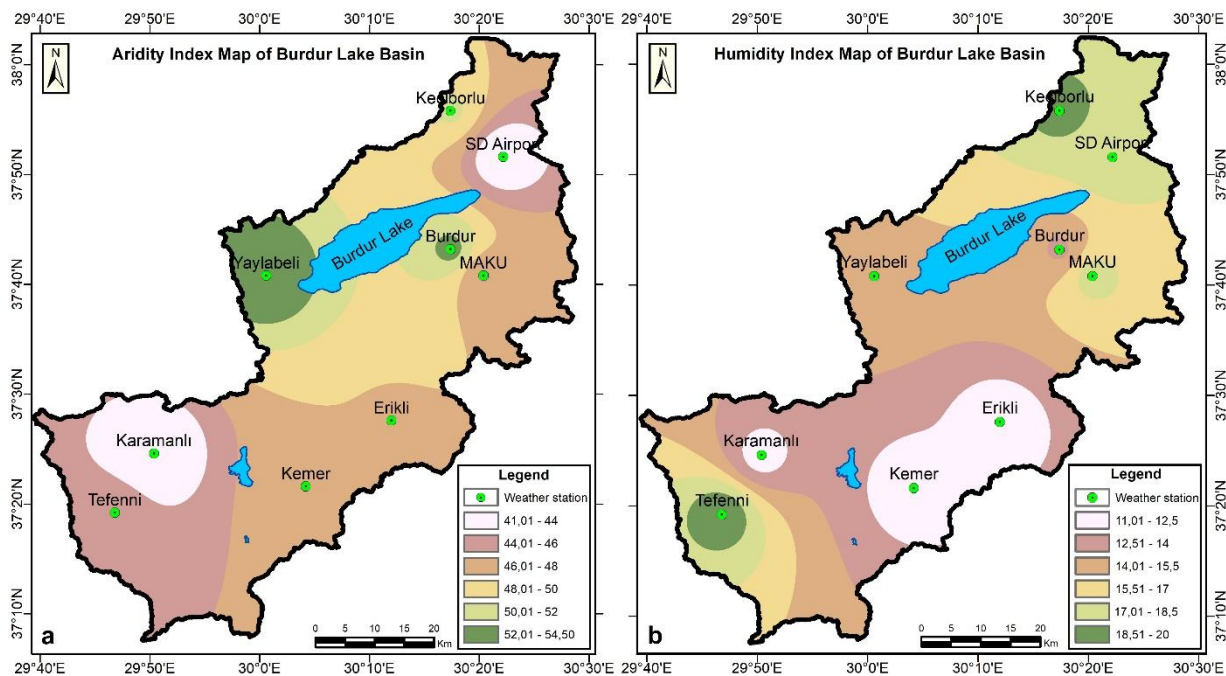


Figure 6. Aridity index (a) and humidity (b) maps of Burdur Lake Basin

According to the aridity index map, the highest values in the study area belong to the Yaylabeledi (54.48) and Burdur (52.74) stations, while the lowest values are observed at the Karamanlı (41.27) and SD Airport (41.29) stations. Based on the humidity index map, the highest values are recorded at the Tefenni (19.68) and Keçiborlu (19.05) stations, while the lowest values are found at the Erikli (11.36), Kemer (11.57), and Karamanlı (11.84) stations. In conclusion, the aridity and humidity index values indicate the presence of a dominant rainfall regime within the basin.

4. Conclusions

ET estimations in the Burdur Lake Closed Basin were derived from data collected at meteorological stations in Burdur, Erikli, Kemer, Yaylabeledi, Karamanlı, MAKU, Tefenni, SD Airport, and Keçiborlu. A comparative water budget analysis was performed in the research area utilizing the Thornthwaite, Blaney-Cridde, and Schendel methodologies. Of the three approaches evaluated, using climatic factors and pan evaporation data from meteorological stations, the Thornthwaite method has been identified as the most appropriate for portraying the basin. This result is consistent with previous studies conducted in the region

Using the Thornthwaite method, climate classification indices for the basin—namely the precipitation activity index, aridity index, and humidity index—were calculated. Thematic maps were generated using the IDW interpolation method in a GIS environment based on these index values.

For the study area, the precipitation activity index (I_m) was found to range between 0 and (-20) for the entire basin. According to the precipitation activity index classification, the Burdur Lake basin is categorized under the "dry-subhumid" (C1) climate type and falls within the arid climate class.

The aridity index (I_a) values were found to exceed 33.4 at all stations. The Burdur Lake basin exhibits a "very strong water deficit in summer" (s2) and a "very strong water deficiency in winter" (w2) rainfall regime. Humidity index (I_h) values across the entire basin were calculated to range between 10 and 20. Based on these results, all stations within the basin possess a "moderate water surplus in summer" (s) and a "moderate water surplus in winter" (w) rainfall regime.

It has been concluded that climatic characteristics have contributed to the observable decrease in the water level of Burdur Lake over the years. Notably, high ET_p values were recorded for the Burdur, SD Airport, and Keçiborlu stations, located at low elevations to the north of the lake. Similarly, the highest water deficit values were observed at the Burdur, SD Airport, and Yaylabeledi stations surrounding the lake. The stations with the highest aridity index values are Burdur and Yaylabeledi. Consequently, significant drought and water deficiency have been identified around the Burdur Lake region.

- Soyaslan, İ. İ., Hepdeniz, K., 2016. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Kullanılarak Burdur İli Arazi Kullanımının Zamansal Değişiminin Belirlenmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(2), 94-101.
- Thornthwaite, C. W., 1948. An Approach a Rational Classification of Climate. The Geographical Review, 58, 55-94.
- Türkeş, M., 2010. Klimatoloji ve Meteoroloji. Kriter Yayınevi, İstanbul.
- Vaheddoost, B., Fathian, F., Gul, E., Safari, M., 2022. Studying the Changes in the Hydro-Meteorological components of water budged in Lake Urmia. Water Resources Research, 58(7), 1-23. <https://doi.org/10.1029/2022WR032030>
- Viaroli, S., Mastrorillo, L., Lotti, F., Paolucci, V., Mazza, R., 2018. The groundwater budget: A tool for preliminary estimation of the hydraulic connection between neighboring aquifers. Journal Hydrology, 556, 72-86. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.066>
- Wang, L., Wang, G., Xue, B., Yinglan, A., Fang, Q., Shrestha, S., 2022. Spatiotemporal variations in evapotranspiration and its influencing factors in the semiarid Hailar river basin, Northern China. Environmental Research, 212(Part B), 113275. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113275>
- Yılmaz, E., Çiçek, İ. (2016). Thornthwaite climate classification of Turkey. Journal of Human Sciences, 13(3), 3973-3994. <https://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.3994>
- Yılmaz, E., Çiçek, İ., 2018. Detailed Köppen-Geiger Climate Region of Turkey. Journal of Human Sciences, 15(1), 225-242. <https://doi.org/10.14687/jhs.v15i1.5040>
- Yılmaz, E., Çiçek, İ., 2020. Türkiye Thornthwaite İklim İndislerindeki Eğilimler. Coğrafya Dergisi(40), 163-175.



CAM FİBER TAKVİYELİ PLASTİK MALZEMELERİN DELAMİNASYON DURUMUNUN İNCELENMESİ

Nergizhan ANAÇ, Esra ŞEN, Eren GÜL, Esra ACAR,
Muhammed Erdem YILDIZ, Oğuz KOÇAR*, Furkan PARMAKSIZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Cam Elyaf Takviyeli Plastik, Delaminasyon, 3B Baskı, Elle Yatırma, Sıcak Presle Kalıplama. Cam fiber malzemeler ekonomikliği ve hafif olması sebebiyle endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir. Cam fiber kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin ve montaj sırasında oluşabilecek olası hasar mekanizmalarının (delik delmede delaminasyon gibi) bilinmesi tasarımcılar için önemlidir. Bu çalışmada farklı imalat teknikleriyle üretilmiş (sıcak presle kalıplama, 3B baskı ve elle yatırma) cam elyaf takviyeli plastiklerde (CTP) delik delme işleminden sonra oluşan delik çıkış hasarları incelenmiştir. Deneylerde işlem parametreleri olarak üç farklı ilerleme hızı (200, 400 ve 600 mm/dak) ve iki farklı takım dönme hızı (1500 ve 3000 dev/dak) kullanılmıştır. Delik delme işlemi sonunda delaminasyon oranları hesaplanmıştır. En düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip deney numunelerinin görsel muayeneleri yapılmıştır. Ek olarak, 3B yazıcıda delikli olarak basılmış ve sonradan matkapla delinmiş iki ayrı CTP malzemenin delik delme işlemi karşılaştırılmıştır. Sıcak presle kalıplama tekniği ile üretilen parçalarda takım ilerleme hızı artarken delaminasyon oranı artmış, 3B baskı tekniği ile üretilen parçalarda ilerleme hızının artmasıyla delaminasyon oranı düşmüştür. Elle yatırma tekniği ile üretilen parçalarda ise düşük takım dönme hızlarında delaminasyon oranının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca delaminasyonda işlem parametrelerinin etkisi kadar malzeme üretim tekniğinin de etkili olduğu görülmüştür. Sıcak presle kalıplama ve elle yatırma tekniğiyle üretilen cam elyaf takviyeli kompozitlerde delik delme işlem parametrelerinin delaminasyona etkileri benzerken, 3B yazıcı ile üretilmiş parçalar farklı davranış sergilemiştir.

INVESTIGATION OF DELAMINATION OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC MATERIALS

Keywords

Glass Fiber Reinforced Plastic, Delamination, 3D Printing, Hand Lay-Up Technique, Hot Press Molding.

Abstract

Glass fiber materials have a wide range of applications in industry due to their affordability and light weight. It is important for designers to know the mechanical properties of glass fiber composite materials and possible damage mechanisms that may occur during assembly (such as delamination in drilling). In this study, hole exit defects in glass fiber reinforced plastics (GRP) produced by different manufacturing techniques (hot press molding, 3D printing and hand lay-up) after hole drilling were investigated. In the experiments, three different feed rates (200, 400 and 600 mm/min) and two different tool rotational speeds (1500 and 3000 rpm) were used as process parameters. At the end of the drilling process, delamination rates were calculated. The specimens with the lowest and highest delamination rates were visually inspected. In addition, the hole drilling process was compared in two different GRP materials, which were printed as perforated on a 3D printer and then drilled with a drill. The delamination rate increased with increasing tool feed rate in parts produced by hot press molding technique, while the delamination rate decreased with increasing feed rate in parts produced by 3D printing technique. It was determined that the delamination rate increased at low tool rotation speeds in parts produced by hand lay-up technique. It was also observed that the material production technique was as effective as the process parameters in delamination. While the effects of drilling process parameters on delamination in glass fiber reinforced composites produced by hot press molding and hand lay-up techniques were similar, the parts manufactured using 3D printer exhibited different results.

Alıntı / Cite

Anaç, N., Şen, E., Gül, E., Acar, E., Yıldız, M.E., Koçar, O., Parmaksız, F., (2025). Cam Fiber Takviyeli Plastik Malzemelerin Delaminasyon Durumunun İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 234-249.

* İlgili yazar / Corresponding author: oguz.kocar@beun.edu.tr, +90-372-291-1181

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
N.Anaç, 0000-0001-6738-9741	Başvuru Tarihi / Submission Date	16.07.2024
E.Şen, 0009-0009-0819-5387	Revizyon Tarihi / Revision Date	05.12.2024
E.Gül, 0009-0007-3322-2717	Kabul Tarihi / Accepted Date	11.01.2025
E.Acar, 0009-0008-6554-729X	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025
M.E.Yıldız, 0009-0008-4212-9140		
O.Koçar, 0000-0002-1928-4301		
F.Parmaksız, 0000-0001-7002-9157		

INVESTIGATION OF DELAMINATION OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC MATERIALS

Nergizhan ANAÇ, Esra ŞEN, Eren GÜL, Esra ACAR, Muhammed Erdem YILDIZ, Oğuz KOÇAR†, Furkan PARMAKSIZ

Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zonguldak, Türkiye

Highlights

- The mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials produced by different manufacturing techniques were compared.
- Delamination rates of composites produced by hand lay-up, hot press molding and 3D printing were compared.
- Delamination rates were found to vary according to the production technique.

Graphical Abstract

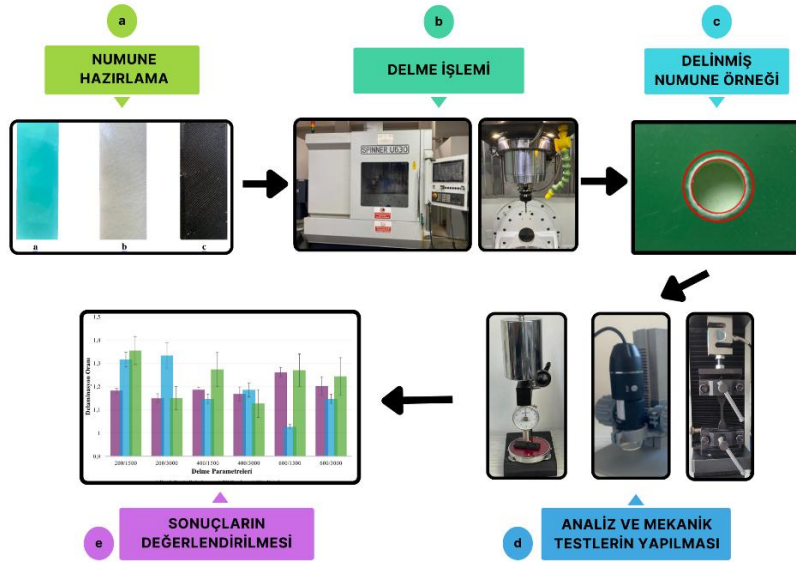


Figure. Flowchart of the drilling

Purpose and Scope

In this study, the mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials produced by three different manufacturing techniques and the delamination factor during drilling were compared.

Design/methodology/approach

In this study, glass fiber reinforced composite materials produced using hand lay-up, hot press molding and 3D printing techniques were used. Tensile tests and hardness tests were performed to determine the mechanical properties of the composite materials. The specimens were drilled at 200, 400 and 600 mm/min feed rate and 1500 and 3000 rpm tool rotation speed to investigate the delamination caused by the drilling process according to different manufacturing techniques.

† Corresponding author: oguz.kocar@beun.edu.tr, +90-372-291-1181

Findings

Manufacturing techniques also have a significant effect on the mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials. According to the production techniques, the highest strength was determined as hand lay-up, hot press molding and 3D printing, respectively. The lowest delamination rate (1.027) was determined in the composite material produced by 3D printing method and the highest delamination rate (1.89) was determined in the composite material produced by hand lay-up method.

Practical implications

In order to reduce the delamination factor in the drilling process in composite materials, manufacturing techniques as well as process parameters should be taken into consideration. It was also observed that the delamination rate increased with the increase in mechanical properties. In the composites produced by hot press molding technique, it was found that the defects at the hole exit were more stable due to the compression and better fusion of the layers.

Originality

The mechanical properties and delamination factor during drilling of glass fiber reinforced composite materials produced by different manufacturing techniques are compared and their advantages over each other are discussed. It also contributed to the literature by investigating the delamination factor in the drilling process in glass fiber reinforced composite materials printed on 3D printers.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde neredeyse yerkürede bulunan bütün elementler ve alaşımlar işlenip kullanmakta ve bu malzemelerin özelliklerini geliştirmek için yeni araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırma ve geliştirme sürecinin sonucu olarak insanlar iki veya daha fazla malzemeyi gözle görülür boyutlarda birleştirerek kompozit malzeme adı verilen hibrit malzeme türünü ortaya koymuşlardır. Kompozit malzeme üretiminin amacı, farklı malzemelerin özelliklerini bir araya getirerek, tek başlarına sahip olmadıkları özellikleri kazandırmak ve böylece çeşitli kullanım alanlarına uygun ürünler elde etmektir. Üretimde kompozit malzemelerin kullanımı; dayanım, hafiflik, esneklik ve uygun maliyet gibi avantajlar sağlar (Yücel, 2019). Kompozit malzemeler geleneksel malzemeler ile kıyaslandığında daha yüksek mukavemete daha düşük ağırlıkla ulaşabilmektedir. Bu özelliklerinden ötürü kompozit malzemeler, savunma sanayii, uzay ve havacılık, inşaat, otomotiv, ulaşım, tıp ve spor gibi birçok farklı sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Yücel, 2019; Özkaya vd., 2019). Kompozitlerin sınıflandırılması içerdiği matris ve takviye malzemelerine göre değişiklik göstermektedir. Kompozit malzemeler matris malzemelerine göre: metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitler olarak üç grupta sınıflandırılır. Takviye elemanlarına göre ise elyafli kompozitler, parçacıklı kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olarak isimlendirilirler (Kaya, 2016). Yapılan araştırmalar elyaf ve reçinenin uyumlu bir kombinasyon oluşturduğunu göstermiş ve elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeler mühendislikte ihtiyaçlara uygun bir çözüm haline gelmiştir (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2019). Cam elyafı, elyaf takviyeli polimerik kompozit üretiminde en çok kullanılan elyaf çeşididir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında cam takviyesi yapılan elyafların reçine ile oluşturduğu kompozit malzemeye, cam elyaf takviyeli plastik (CTP) denilmektedir. CTP, bir termoset veya termoplastik matris malzemesi ile takviye edilmiş cam elyafı ve reçine içerir. Bu bileşim sayesinde kompozit; hafiflik, yüksek mukavemet, sertlik, yorulma direnci ve kimyasal direnç gibi özellikler kazanır (Özer, 2015). Aynı zamanda CTP, geri dönüştürülebilir ve üretim maliyetleri açısından diğer kompozitlere kıyasla daha avantajlıdır. Bu avantajları sayesinde özellikle inşaat ve havacılık sektöründe tercih edilirler (Skoczylas vd., 2019). Cam fiber kompozitler; rüzgâr kanadı, otomotiv, hava filtre kapakları veya kayak snowboard, kask ve bisiklet parçaları gibi spor ekipmanlarının imalatında kullanılırlar. Cam fiberler hem kırılmış halde takviye malzemesi olarak hem de farklı formlarda dokuma kumaş, hortum veya bant şeklinde çeşitli parça imalatı uygulamalarında kolaylık sağlar. Çoğunlukla geleneksel teknikler ile üretilen cam elyaf takviyeli plastik malzemeler Endüstri 4.0 sanayi devrimindeki teknolojik gelişmelerin yardımıyla eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan 3B yazıcılar ile üretilebilir olmuştur. Eklemeli İmalat (Eİ) geleneksel üretim teknolojilerinin yetersiz kaldığı noktalarda üretim yapabilen yenilikçi bir teknolojidir. Eİ ile kompleks parçalar seri üretim tesislerine ve montajlamaya gerek kalmadan tek bir cihaz kullanılarak yekpare şekilde üretilebilmektedir. Son zamanların en popüler eklemeli imalat yöntemlerinden biri 3B yazıcılarıdır. 3B yazıcı teknolojileri polimer parça üretimiyle tanınsa da, metal ve kompozit malzemelerin üretimine de olanak sağlamaktadır. 3B yazıcılarda kullanılan filament malzemeler incelendiğinde, cam fiberin çeşitli oranlarda (%15 veya %30) katkı olarak kullanıldığı görülmüştür. Polipropilen, polilaktikasit (PLA), polietilen tereftalat (PET), polietilen tereftalat glikol (PETG) poliamid, naylon 12 (PA 12) gibi ana matris malzemesine eklenen cam-elyaf katkısı ile dayanımın artması hedeflenmiştir. Bu sayede, üreticileri tarafından dayanıklı fiyestür ve aparat, dişli çarklar, hareketli mekanizmalar, üretim bantlarındaki plastikler, otomotiv ve havacılık parçaları, kimyasala ve neme dayanıklı plastiklerin üretiminde kullanılmaları tavsiye edilmektedir (BASF, 2024). Bu malzemelerin geleneksel yöntemler (kalıp hazırlama, vakumlama vb.) yerine 3B yazıcıda üretilmesi ile

maliyetlerin azalması kullanıcıların mühendislik malzemelerine ulaşımını kolaylaştırmıştır. Bununla birlikte, 3B yazıcıda üretilen malzemelerin geleneksel yöntemlerle üretilen kompozitlerin yerine geçip geçemeyecekleri, mukavemetlerinin ne olduğu ve ekstra işlemlerde gösterecekleri malzeme davranışlarının bilinmesi tasarımcılar açısından önemlidir.

Kompozit malzemeler nihai ürüne dönüştürülmeden önce talaşlı imalat metotlarından en az biriyle işlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında en çok delik delme kullanılmakta ve parçaya son işlem olarak uygulanmaktadır (Bayraktar ve Turgut, 2012; Bilge vd., 2017). Fakat kompozit parçalara delik açıldıktan sonra sıklıkla delaminasyon kusuruyla karşılaşmaktadır. Delaminasyon, en basit anlatımıyla delme işlemi esnasında delik giriş ve çıkışında meydana gelen deformasyondur. Delaminasyon, sadece parça bütünlüğünü bozmakla kalmaz, aynı zamanda zayıf montaj toleransına yol açarak uzun vadede çalışma performansının bozulmasına neden olabilir (Ho-Cheng ve Dharan, 1990). Yapılan literatür araştırmasında kompozit malzemeler ve kompozitlerin delik delme işlemlerinde delaminasyonun azaltılması ile ilgili birçok çalışma bulunduğu görülmüştür. Ek olarak, 3B yazıcı filamentlerindeki gelişmeler sayesinde sanayide uzun zamandır geleneksel yöntemler kullanılarak elde edilen cam fiber katkılı ürünlerin 3B yazıcılarda üretilebildiği de anlaşılmıştır. Yakın zamanda ticarileşmiş cam fiber katkılı kompozit filamentlerden üretilen parçalar hakkında yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bunun sebebinin 3B yazdırma tekniğinin bu filament malzemesiyle kullanılabilirliğinin yeni olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışma ile cam fiber katkılı malzemelerin delme işlemindeki delaminasyon durumu ve 3B yazıcıda üretilebilirliği konusunda literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu nedenle üç farklı üretim tekniği (sıcak presle kalıplama, elle yatırma tekniği ve 3B yazdırma) ile üretilmiş cam elyaf katkılı plastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve delik delme sırasında oluşan delaminasyonları incelenmiştir. Delme işlem parametreleri olarak 3 farklı ilerleme hızı (200, 400 ve 600 mm/dak) ve iki farklı takım dönme hızı (1500 ve 3000 dev/dak) kullanılmıştır. Delme işlemi sonrası deliklerin görüntüleri dijital mikroskopla alınarak delaminasyon miktarları hesaplanmıştır. Çalışmanın giriş bölümünde kompozit malzemeler ve kullanım alanlarına ait genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ayrıntılı literatür taraması yapılarak ve çalışmanın literatüre katkısı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde sıcak presle kalıplama, elle yatırma tekniği ve 3B yazıcı ile üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri, deney tasarımı, delme işlemleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Ayrıca cam elyaf takviyeli kompozit üretimi için 3B yazıcı parametrelerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ilk önce her üretim tekniği için ayrı ayrı delaminasyon oranları verilmiş ve işlem parametrelerinin delaminasyon oranına etkileri literatürdeki sonuçlarla birlikte karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Daha sonra tüm üretim teknikleri için delaminasyon oranları karşılaştırılmıştır. Böylece üretim tekniklerinin delaminasyon oranındaki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Son olarak sonuçlar tartışılarak gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Karaca (2016) yapmış olduğu çalışmada cam elyaf takviyeli kompozitlerde delik delme işlem parametrelerinin delaminasyona olan etkilerini incelemiştir. İşlem parametresi olarak dört farklı takım dönme hızı (5, 7.5, 10 ve 12.5 mm/dak), dört farklı ilerleme hızı (0.050, 0.075, 0.100 ve 0.125 mm/dev) ve dört farklı matkap uç açısı (118°, 125°, 130° ve 140°) kullanmıştır. Sonuçlar, cam elyaf takviyeli plastik malzemede gerçekleştirilen delme işleminde delaminasyon faktörüne neden olan en önemli faktörün ilerleme miktarı olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışmada cam laminant alüminyum takviyeli epoksinin (Glare) özel geometrili matkaplarla delinmesi ve delaminasyon faktörüne etkisi incelenmiştir. Delme işlem parametresi olarak üç farklı takım dönme hızı (60, 78 ve 100 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0.10, 0.14 ve 0.20 mm/dev) ve üç farklı matkap uç açısı (130°, 135°, 118°) kullanılmıştır. Özel geometrili takımlarla delik delmede delaminasyon üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu ve sonra kesme hızının geldiği ifade edilmiştir (Motorcu vd., 2020).

Basmacı ve Yörük (2020) karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin kuru ve kriyojenik şartlarda farklı kesme parametreleri ve çaplarda matkaplarla delinmesini incelemişlerdir. Deneylerde iki farklı kesme hızı (20 ve 50 m/dak), dört farklı ilerleme miktarı (0.075, 0.15, 0.225 ve 0.3mm/dev) ve iki farklı çapta matkap (4 ve 6 mm) kullanılmıştır. Sonuç olarak, kriyojenik teknik ile delme işleminin kolaylaştığını, yüzey pürüzlülüğünün azaldığını ve delaminasyon faktörünün arttığını ifade etmişlerdir. Özkaya vd. (2019) cam küre takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin delinmesinde delaminasyonun etkilerini incelemiştir. Takviye fazı olarak ağırlıkça %5, %10 ve %20 cam küre takviyeleri kullanılmıştır. Ayrıca delme işleminde üç kesme hızı (15, 20 ve 25 m/dak), üç ilerleme hızı (0.05, 0.10 ve 0.15 mm/dev) ve 118° matkap uç açısı kullanılmıştır. En düşük delaminasyon ağırlıkça %5 cam küre takviyeli kompozitte, 0.05 mm/dev ilerleme ve 15 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada, çeşitli kalınlıklarda farklı kompozit malzemelerin (Epoksi/E-glass ve Epoksi/Kevlar 49) matkapla delik delme özellikleri incelenmiştir. Üç farklı kesme hızı (125, 250 ve 315 dev/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0.056, 0.112 ve 0.16 mm/dev) kullanılarak 5 mm, 10 mm ve 15 mm çaplarında HSS, TiN ve karbür matkaplar test

edilmiştir. Bulgular, devir ve ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve küçük çaplı matkapların daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir (Canpolat, 2008).

Singh vd. (2008) tek yönlü cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesini deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Üç farklı nokta açısı (90°, 104°, 118°), üç farklı takım dönme hızı (375, 938 ve 1500 dev/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0.075, 0.188 ve 0.300 mm/dev) kullanılmıştır. Delme sırasında oluşan itme kuvveti, matkap uç açısı ve ilerleme hızına bağlı olarak artmıştır. 90° matkap uç açısının en az delaminasyon sonucunu verdiği belirlenmiştir. Rubio vd. (2008) cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde hızın ve delaminasyon faktörünün etkilerini incelemiştir. Deneyde 5 mm çapında, 25° helisel açılı ve 118° ile 85° uç açılara sahip matkaplar kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak 4000 dev/dak, 8000 dev/dak ve 40000 dev/dak dönme hızları ile 1000 mm/dak, 3000 mm/dak, 6000 mm/dak ve 9000 mm/dak ilerleme hızları kullanılmıştır. 4000 ve 8000 dev/dak hızlarında ilerleme hızı arttıkça delaminasyon da artmıştır. Ancak, 40000 dev/dak hızında ilerleme hızındaki artış delaminasyonda kayda değer bir artışa yol açmamıştır. Delaminasyon takım dönme hızına bağlı kesme bölgesinde oluşan sıcaklıktan doğrudan etkilenmektedir. Takım dönüş hızı arttıkça bölgesel sıcaklık artışı için delaminasyon oranı azalmıştır. Ayrıca literatürde MDF (Aktaş ve Sofuoğlu, 2022), fiber metal laminant (Ekici ve Motorcu, 2022), kompakt laminant (Bilge vd., 2017), sandviç kompozit (Kuş ve Ekici, 2017) gibi farklı malzemelerin delaminasyonu hakkında çalışmalar bulunmaktadır.

Literatürdeki 3B yazıcılarda basılmış cam fiber kompozit malzemelerle alakalı araştırmalar incelendiğinde, çoğunlukla filament malzemeleri geliştirmeye odaklanıldığı görülmüştür. Altun ve Sekban (Altun ve Sekban, 2023) çalışmalarında, çeşitli miktarlarda cam lifi (%5, %10 ve %15) ekledikleri PLA filamentin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını incelemişlerdir. En yüksek çekme ve eğilme dayanımı %5, en yüksek darbe direnci de %10 cam lifi katkılı PLA malzemelerden elde edilmiştir. Kaynak ve Varsavas (2018), PLA içerisine TPU ve cam elyaf takviye karıştırarak 3B yazıcıda basılmaya uygun kompozit malzemeler üretmişlerdir. Çıkan sonuçlar, PLA/cam elyaf ve PLA/TPU/cam elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerinde cam elyaf oryantasyonundaki farklılıklardan kaynaklı azalma olduğunu göstermiştir. Ranganathan vd. (2019) ağırlıkça % 0, 20 ve 30 oranlarında cam elyaf ve cam bilya eklenmiş iki farklı PA6 malzeme üreterek, bu malzemelerin termal özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada kullanılan cam bilya, PA6 matrisinin termal özelliklerini gelişmesini sağlayan kristal bir malzeme olduğundan ve cam elyaf ise PA6 matrisinde yüksek modül sağlayabilecek boyutsal olarak kararlı bir malzeme olması sebebiyle seçilmiştir. %30 cam elyaf katkılı PA6'nın termal özellikleri gelişmiştir. Otomotiv, havacılık ve elektronik endüstriyel uygulamalarında kullanılabilir.

Yapılan araştırmaların tamamı değerlendirildiğinde; 3B yazılarda üretilen cam fiber katkılı kompozitlerin delinmesinde işlem parametrelerinin delaminasyona etkisi ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte, çeşitli kompozit malzemelerde işlem parametrelerinin (takım dönme hızı, ilerleme hızı, matkap uç açısı, matkap malzemesi vb.) delaminasyona etkilerinin incelendiği belirlenmiştir. Bu çalışmada cam fiber katkılı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılarak, işlem parametrelerinin delaminasyona etkisi incelenmiştir. Çalışmanın amacı endüstri uygulamalarında cam fiber kompozit malzeme kullanmak isteyen kullanıcılara malzeme özellikleri ve işlenebilirlik hakkında bilgi vererek uygun malzeme seçimi için yardımcı olmaktır.

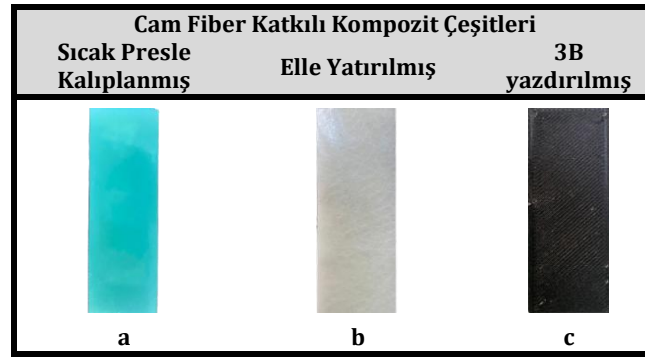
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, üç farklı üretim tekniğiyle imal edilmiş (sıcak presle kalıplama, elle yatırma, 3B baskı) cam fiber katkılı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Preslenmiş cam fiber plakalar; cam fiber kumaş ve epoksi reçinenin bir arada kullanıldığı, arka ve ön yüzeyleri pürüzsüz bir şekilde sıcak pres kalıplama yöntemiyle üretilmiş G10 serisi plakalardır (Kompozitshop, 2019). Deneylerde kullanılan plakalar 1000x1000x5 mm boyutlarında hazır olarak satın alınmıştır. Ardından plakalar 50x20x5 mm ölçülerinde Probotsan 3 Eksenli CNC router makinesinde kesilmiştir. Elle yatırılmış cam fiber plakalar, bir kalıba elle yerleştirilen kumaşlara bir rulo veya fırça ile reçine emdirilmesi sonucunda üretilmiş numunelerdir (Durgun, 2014). Bu yöntem ile üretilmiş olan malzemeler hazır olarak Kanaltek İnşaat A.Ş.'den temin edilmiştir. 3B yazıcıda basılan deney parçaları için %30 oranında cam fiber katkılı poliamid filament (PA6 GF30) kullanılmıştır. Poliamid; yüksek kimyasal dayanım, darbe dayanımı ve yüzey aşınma direnci gibi özelliklere sahip esnek termoplastik malzemedir (Dey vd., 2021; Terekhina vd., 2019). Bu özellikler %30 oranında cam fiber takviyesiyle birleştiğinde, Poliamid'e kıyasla çok daha güçlendirilmiş bir hale dönüşmektedir. PA6 GF30 filamentler yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptirler. Bunun yanı sıra yüksek termal dayanım ve kararlılık, kimyasal etmenlere ve UV ışığa karşı yüksek dayanım gibi üstün özelliklere sahip bir malzemedir (Tanabi, 2021). Bu çalışmada BASF marka 2.85 mm çapında Ultrafuse PA6 GF30 filament kullanılmıştır. 3B parça basımında kullanılan filamentin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan deney numuneleri ise Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ultrafuse PA6 GF30 filamentin teknik özellikleri
(Technical specifications of ultrafuse PA6 GF30 filament) (BASF, 2024)

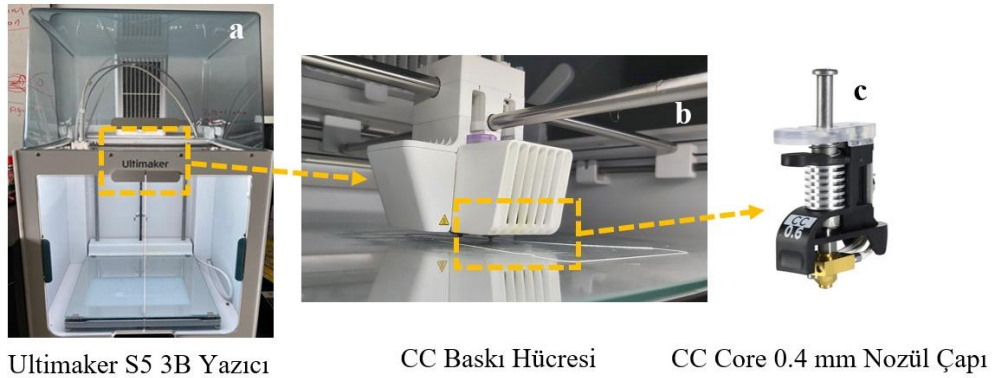
Filament Özellikleri	
Çap Ölçüsü (mm)	2.85
Renk	Siyah
Çekme Mukavemeti (MPa)	78.3
Çekme Modülü (MPa)	5036
Kopma Uzaması (%)	2.2
Yoğunluk (g/cm ³)	1.2



Şekil 1. Cam fiber katkılı kompozit malzemeler (Glass fiber reinforced composite materials)

3.2 Eklemeli İmalat İle Üretilen Numunelerinin Hazırlanması (Specimen Manufactured by Additive Manufacturing)

Çalışmadaki deney numunelerinin bir kısmı 3B yazıcıda basılmıştır. 3B yazdırma işlemi, Ultimaker S5 model 3B yazıcıda Ultrafuse PA6 GF30 malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan filament içerdiği cam fiber katkıdan ötürü aşındırıcı bir kompozit malzeme olduğundan, standart pirinç nozül uçlu baskı hücresi kullanmak yerine yazıcı üreticisi tarafından önerilen Ultimaker Printcore CC kullanılmıştır. Sertleştirilmiş çelik uca sahip olan Ultimaker Printcore CC sayesinde kompozit malzeme üretmek için gerekli olan yüksek sıcaklıklara çıkılabilmekte ve aşındırıcı kompozit malzemelerle sorunsuz baskı alınabilmektedir. Baskı işleminde kullanılan 3B yazıcı, baskı hücresi ve CC baskı hücresi Şekil 2'de gösterilmektedir.



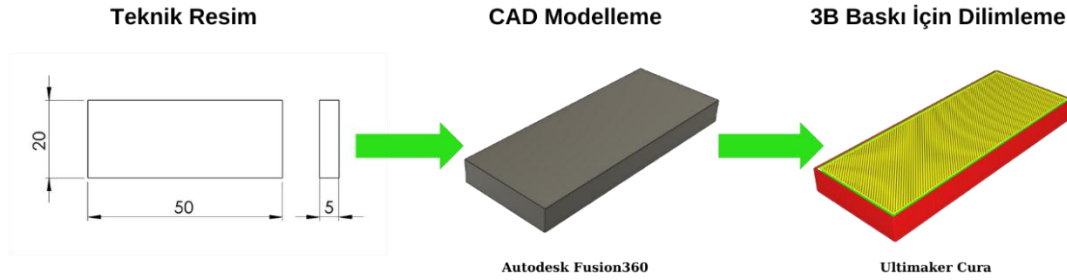
Şekil 2. Parça basımında kullanılan ekipmanlar; (a) 3B yazıcı (b) CC baskı hücresi ve (c) CC nozül
(Equipments used in part printing; (a) The 3D printer (b) CC print cell and (c) CC core)

Üretilen numunelerin doluluk oranları %100 ve katman kalınlıkları 0.2 mm'dir. Katman kalınlığının azalmasıyla birlikte boyutsal doğruluk artmakta (Nuñez vd., 2015) ve yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir ancak üretim sürecinin uzunluğu, katman kalınlığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda katman kalınlığı seçimi yapılmıştır. Diğer iki yöntemle üretilen (elle yatırma ve sıcak pres kalıplama) deney malzemelerinin makro yapıda boşluksuz olmalarından ötürü 3B yazıcı kullanılarak üretilen parçalar, %100 iç doluluk oranında basılmıştır. 3B yazıcıda üretilen numuneler, Autodesk Fusion 360 kullanılarak üç boyutlu olarak

modellenmiş ardından stl formatına çevrilerek Ultimaker Cura 5.5.0 programında Tablo 2’de bulunan parametreler doğrultusunda dilimleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. 3B baskı öncesi işlemler Şekil 3’de şematik bir biçimde gösterilmiştir.

Tablo 2. 3B baskı parametreleri (3D printing parameters)

Parça Basım Parametreleri	
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Parça Doluluk Oranı (%)	100
Nozül Sıcaklığı (°C)	260
Tabla Sıcaklığı (°C)	70
Yazdırma hızı (mm/sn)	45



Şekil 3. 3B baskı öncesi işlem basamakları (3D Pre-printing processes)

3.3. Delme Parametreleri Ve Kesici Takım (Drilling Parameters and Cutting Tool)

Kompozit malzemelerde delik delme işlemi sonrasında yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve delaminasyon faktörleri incelenerek delik kalitesi değerlendirilmektedir. Delme işlemi sonunda yüzey pürüzlülüğünün, çapak oluşumunun ve delaminasyon faktörünün istenilen değerlerde olmaması ardıl işlemleri zorunlu kılmaktadır. Bu durum üretim maliyetlerini ve üretim süresini arttırmaktadır. Bu yüzden delik kalitesinin belirlenmesinde etkin bir rol oynayan çapak oluşumu ve delaminasyon faktörlerinin oluşmaması veya en aza indirilmesi için optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bu faktörlerden delaminasyon kompozit malzemelerin delinmesinde delik giriş ve çıkışlarında sıkça rastlanan bir yüzey hasar durumudur. Delaminasyon faktörünü etkileyen delme faktörleri; kesme parametreleri, kesici takım malzemesi ve geometrisidir (Bayraktar ve Turgut, 2012).

Yapılan deneysel çalışmada silindirik saplı, $\varnothing 6.7$ mm, matkap uç açısı 118° , çift ağızlı, N tipi, sağ kesme yönlü Stock marka matkap kullanılmıştır (Şekil 4). İstatistiksel değerlendirme için deneyler 3 tekrarlı olarak yapılmıştır. Delme işleminde matkap özellikleri sabit tutulurken, üç farklı üretim tekniği ile üretilmiş cam fiber katkılı kompozit malzeme, üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı dönme hızında deneyler tamamlanmıştır. Deney tasarımı Tablo 3’de verilmiştir. Deney parametreleri önceki çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir (Karataş vd. 2024). Her malzeme için 6 delme işlemi gerçekleştirilmiş ve toplamda 18×3 deney yapılmıştır.



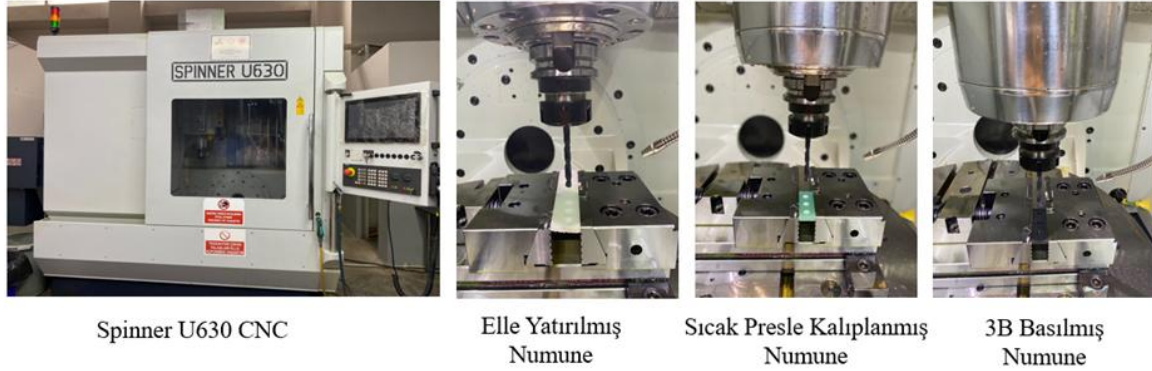
Şekil 4. Stock marka $\varnothing 6.7$ mm matkap ($\varnothing 6.7$ mm drill from stock)

Tablo 3. Deney tasarımı (Design of experiment)

Üretim Teknikleri	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)
Sıcak Presle Kalıplama	200	1500
3B Baskı	400	3000
Elle Yatırma	600	

3.4. Delik Delme Deney Düzenegi (Drilling Test Setup)

Yapılan çalışmada tabla boyutu $\varnothing 630$ mm, fener mili dönme hızı 12.000 dev/dak ve 18Kw güce sahip Spinner U630 5 Eksenli CNC tezgâhı kullanılmıştır. Deneylerde soğutma sıvısı kullanılmamıştır. G kodları SolidCam adlı ticari yazılımda elde edilmiştir. Şekil 5'te kullanılan CNC tezgâhı görülmektedir.

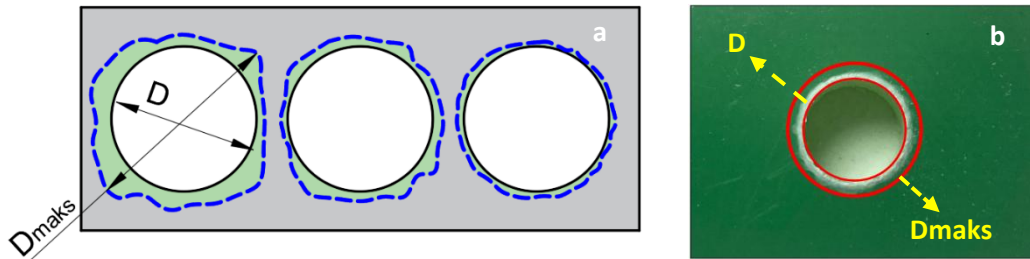


Şekil 5. Delme işlemlerinde kullanılan CNC tezgâhı ve cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delinme işlemi (CNC machine used in drilling processes and drilling process of glass fiber reinforced composite materials)

3.5. Delaminasyon Oranının Belirlenmesi (Determination of Delamination Rate)

Delaminasyon oranı, delme sırasında meydana gelen hasarda görülen en büyük çapın (D_{maks}) matkap çapına (D) oranıyla hesaplanır. Delaminasyon faktörü (D_f), kompozit malzemelerin delik delme işlemlerinde delik giriş/çıkışlarında oluşan yüzey hasarlarının değerlendirilmesinde kullanılan bir parametredir (Özkaya vd., 2019; Koboevic vd. 2012). Delme işleminden sonra stereo mikroskop ile bütün deliklerin çıkış kısmından (10x büyütme) görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler AutoCAD 2024 programına aktarılarak, delaminasyon oranını hesaplamak için oluşan hasara uygun daireler çizilmiştir. Şekil 6'da matkap çapı (D) ve delaminasyon bölgesindeki en büyük çap (D_{maks}) gösterilmiştir. D_{maks} belirlendikten sonra delaminasyon faktörü aşağıdaki Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanmıştır (Bilge vd., 2017).

$$D_f = D_{maks}/D \quad (1)$$



Şekil 6. Delaminasyon faktörünün gösterilmesi a) Delaminasyon faktörünün şematik gösterilişi b) Delme sonrası gerçek görünüm (Demonstration of the delamination factor a) Schematic representation of the delamination factor b) Actual appearance after drilling)

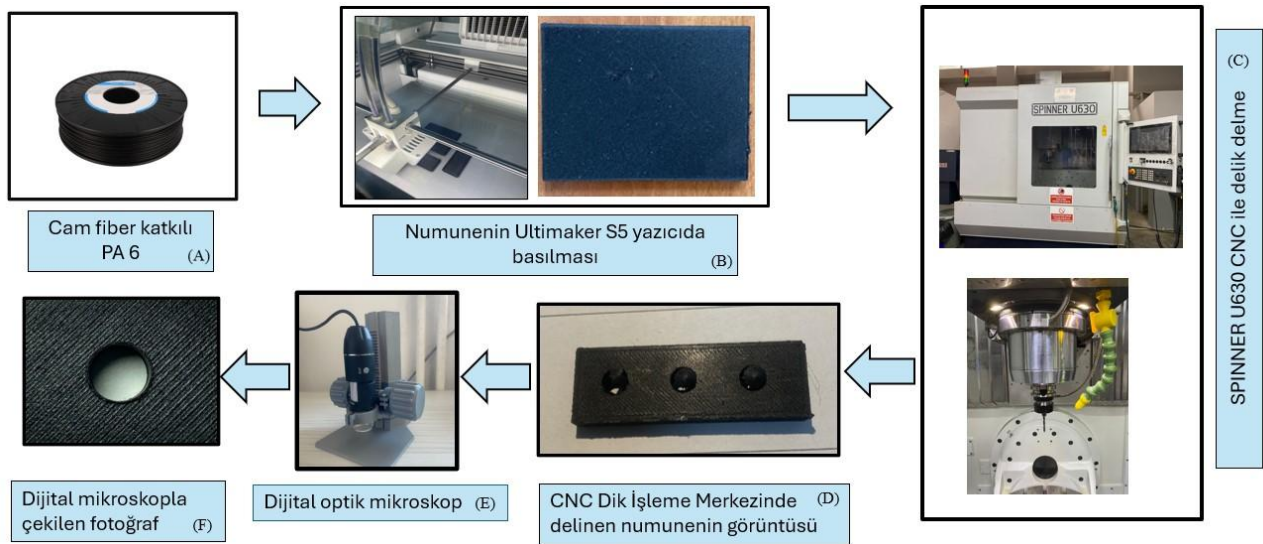
3.6. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (Mechanical Properties of Specimens)

Elle yatırılmış, preslenmiş ve 3B baskısı alınmış numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için ASTM D638-10 Tip IV standartlarına uygun, beşer adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri 2 mm/dak hızla oda sıcaklığında yapılmıştır. 3B baskı ile hazırlanan cam fiber katkılı kompozit numunelerin çekme testleri 5

KN kapasiteli WDW-5 model universal çekme cihazında, elle yatırma ve preslenmiş numunelerin çekme testleri ise 50 ton kapasiteli Besmark marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. 3B yazıcıda üretilen parçaların sertlik ölçümü Loyka LX-D-2 marka durometre (Shore D) ile ölçülmüştür. Sıcak pres kalıplama ve elle yatırma tekniği ile üretilen parçalarda sertlik, Insize HDT-LP200 Leeb portatif cihaz ile ölçülmüştür.

4. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

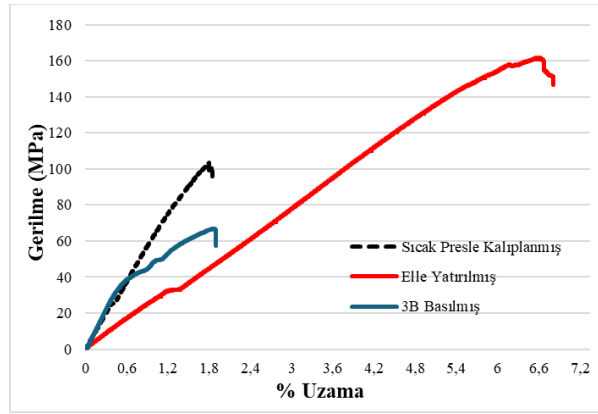
Yapılan çalışmada farklı üretim teknikleriyle imal edilmiş cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delme işlemi karşılaştırılmış ve delik çıkış hasarı incelenmiştir. Delme işleminde takım dönme hızları 1500 ve 3000 dev/dak, takım ilerleme hızları 200, 400 ve 600 mm/dak olarak kullanılmıştır. Şekil 7'de 3B yazıcıda hazırlanan cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delinmesinde uygulanan basamaklar adım adım gösterilmiştir. Şekil 7A'da cam fiber katkılı PA6 filament, Şekil 7B'de Ultimaker S5 yazıcıda Tablo 3'teki parametrelere göre yapılan basım işlemi verilmiştir (Şekil 7B). Hazırlanan numuneler CNC dik işleme merkezi'nde belirlenen deney parametreleri kullanılarak delinmiştir (Şekil 7C). Şekil 7D'de delme işlemi gerçekleştirilmiş bir deney numunesi görülmektedir. Delme işlemi sonrası delaminasyon oranının belirlenmesi için delik etrafı optik mikroskopla incelenmiştir (Şekil 7E). Şekil 7F'de dijital optik mikroskopla çekilen örnek görüntü verilmiştir. Üç farklı üretim metoduyla imal edilen cam fiber katkılı kompozit malzeme için belirtilen tüm bu işlemler tekrarlanmıştır. Son olarak elde edilen veriler karşılaştırılmış ve cam fiber katkılı kompozitlerin delik delme işlemi değerlendirilmiştir.



Şekil 7. 3B baskı ile hazırlanmış numuneler için akış şeması (Flowchart for 3D printed specimens)

4.1. Cam Fiber Katkılı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composites)

Üretim tekniğine bağlı olarak cam fiber katkılı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testleri yapılmıştır. Çekme testinden elde edilen ortalama değere en yakın olan sonuçların gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 8'de verilmiştir. Çekme testi sonrasında belirlenen çekme mukavemetleri ve yüzde uzama değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Çekme testi sonucu kompozitlerden elde edilen en yüksek mukavemet değerleri elle yatırma tekniği için 168.4 ± 6.4 MPa, sıcak pres kalıplama için 102.1 ± 2.4 MPa ve 3B basılan parçalar için 68.1 ± 1.9 MPa olarak bulunmuştur. Türkmen ve Köksal (2012) yapmış oldukları çalışmada cam fiber katkılı kompozitlerde katman sayısının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Cam elyaf kompozitlerde elyaf tabaka sayısına bağlı olarak çekme dayanımının ve elastisite modülünün arttığını belirtmişlerdir. El-Wazery vd., (2017) yaptıkları çalışmada elle yatırma yöntemi kullanarak ağırlıkça %15-%60 arasında cam elyaf takviyesi ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar cam elyaf takviye oranına bağlı olarak çekme mukavemetinin 28.25 MPa ile 78.83 MPa arasında, eğilme mukavemetinin 44.65 MPa ile 119.23 MPa arasında değiştiğini göstermiştir. Kompozit malzeme üretiminde mekanik özellikler birçok parametreden etkilenmektedir. Yapılan çalışma ile üretim tekniklerinin cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

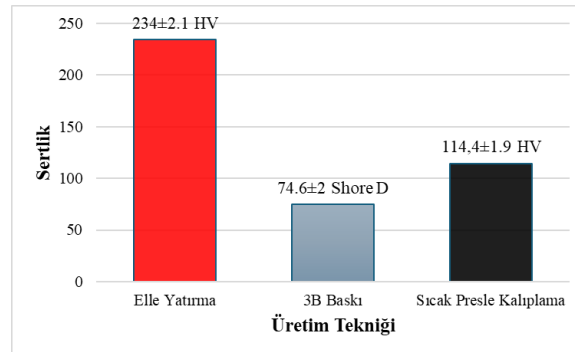


Şekil 8. Cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Stress-strain diagram of glass fiber reinforced composite materials)

Tablo 4. Cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials)

Üretim Tekniği	Mekanik Özellikler	
	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Elle Yatırma	168.4±6.4	6.8±0.5
3B Baskı	68.1±1.9	1.6±0.2
Sıcak Presle Kalıplama	102.1±2.4	1.8±0.3

Deney malzemelerin sertlik sonuçları Şekil 9’da verilmiştir. Elle yatırma üretim tekniği ile üretilen kompozit malzemede sertlik değeri 234 HV, sıcak presle kalıplama ile üretilen kompozitlerde 114.4 HV ve 3B baskı ile üretilen kompozitlerde 74.6 Shore D olarak ölçülmüştür. Sertlik sonuçları çekme mukavemetleri ile uyumlu çıkmıştır. Mukavemet arttıkça sertlik değeri de artmıştır.



Şekil 9. Üretim tekniklerine göre sertlik değerlerinin değişimi (Variation of hardness values according to production techniques)

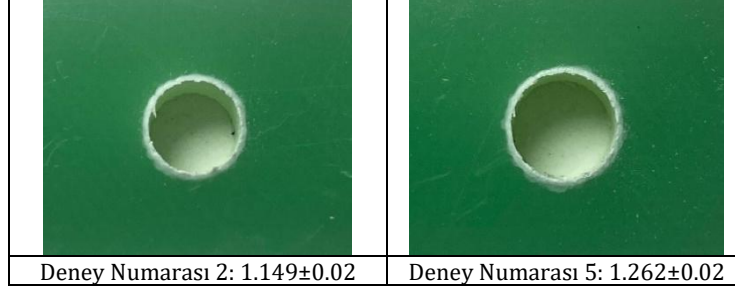
4.2. Delaminasyon Oranları (Delamination Rates)

4.2.1. Sıcak presle kalıplama tekniği ile üretilen numuneler için delaminasyon oranı (Delamination rate for hot press molding)

Tablo 5’de sıcak presle kalıplama tekniğiyle üretilen cam fiber katkılı kompozitlerin farklı ilerleme hızı ve dönme hızlarında oluşan delaminasyon oranlarının ortalamaları verilmiştir. Şekil 10’da en düşük ve en büyük delaminasyon oranına sahip numunelerin görüntüleri görülmektedir. Delik delme sonrası en düşük delaminasyon oranı 2 numaralı deneyde 1.149 ± 0.02 , en yüksek delaminasyon oranı 5 numaralı deneyde 1.262 ± 0.02 olarak belirlenmiştir. İlerleme hızı arttıkça delaminasyon oranı artarken, dönme hızının artmasıyla azalma meydana gelmiştir. Kuş ve Ekici (2018) çalışmalarında takım ilerleme hızının delaminasyon üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Karaca (2016) çalışmasında ilerleme miktarının artmasıyla deformasyon faktörünün arttığına dikkat çekmiştir. Kırhasanoğlu ve Turgut (2021) karbon elyaf takviyeli istifli delinmesinde işlem parametrelerinin delaminasyon oranına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kesme hızının artması ile delaminasyon oranının azaldığı aynı zamanda ilerleme miktarının artması ile delaminasyon oranının arttığı görülmüştür.

Tablo 5. Sıcak presle kalıplanmış numunelerin delaminasyon oranları (Delamination rates of hot press molded specimens)

Deney Numarası	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	Delaminasyon Oranı
1	200	1500	1.182±0.01
2	200	3000	1.149±0.02
3	400	1500	1.186±0.01
4	400	3000	1.168±0.03
5	600	1500	1.262±0.02
6	600	3000	1.202±0.04

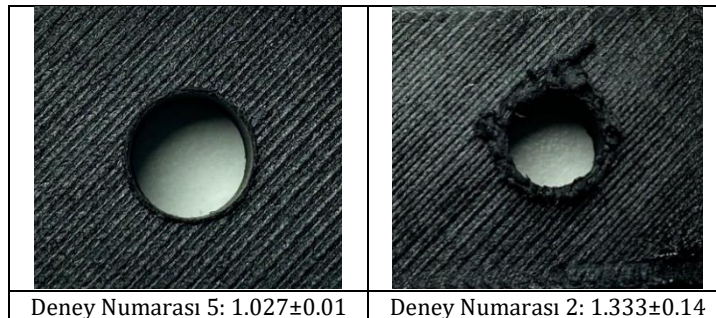
**Şekil 10.** Sıcak presle kalıplama için en düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip numunelerde deliklerin görünümü (Appearance of holes in specimens with the lowest and highest delamination rate for hot press molding)

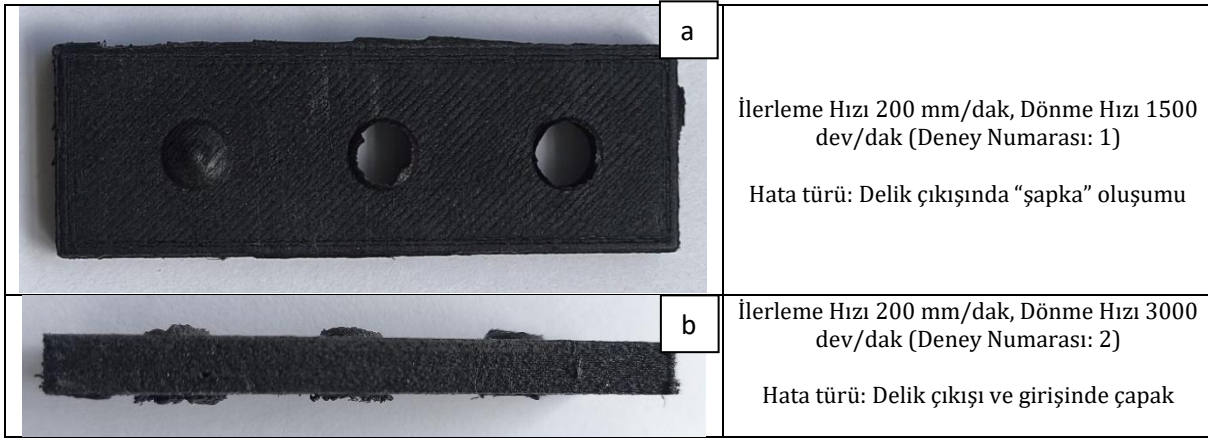
4.2.2. 3B yazıcı ile üretilen numuneler için delaminasyon oranı (Delamination rate for 3D printed specimens)

Tablo 6'da 3B baskı tekniğiyle üretilen cam fiber katkıli kompozitlerin farklı ilerleme hızları ve dönme hızlarında oluşan delaminasyon oranlarının ortalamaları verilmiştir. Şekil 11'de en düşük ve en büyük delaminasyon oranına sahip numunelerin görüntüleri verilmiştir. Delme sonrası en düşük delaminasyon oranı 5 numaralı deneyde 1.027 ± 0.01 , en yüksek delaminasyon oranı 2 numaralı deneyde 1.333 ± 0.14 olarak belirlenmiştir. Tablo 6 incelendiğinde düşük ilerleme hızlarında delaminasyon oranının arttığı belirlenmiştir. Bunun sebebi düşük sertliğe (yüksek süneklik) sahip malzemelerde özellikle düşük dönme hızında delik çıkış bölgesinde malzeme kesme işlemine maruz kalmadan deformasyona uğrayarak dışarıya doğru itilmesidir (Alliche vd., 2021). Bu durum çıkış bölgesindeki deformasyonu arttırdığı için delaminasyon oranını arttırmıştır. Şekil 12'de 3B yazıcı ile üretilmiş cam fiber takviyeli kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan kusurlar verilmiştir. Şekil 12 a'da şapka oluşumu, Şekil 12 b'de çapak oluşumu görülmektedir. Her iki kusurda düşük takım ilerleme hızında meydana gelmiştir. Bu durum takım ve kesme bölgesinde malzemenin sürtünmesinden dolayı yumuşaması ve plastik deformasyona uğraması ile açıklanabilir.

Tablo 6. 3B baskıyla üretilmiş numunelerin delaminasyon oranları (Delamination rates of 3D printed specimens)

Deney Numarası	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	Delaminasyon Oranı
1	200	1500	1.317±0.31
2	200	3000	1.333±0.14
3	400	1500	1.147±0.02
4	400	3000	1.186±0.03
5	600	1500	1.027±0.01
6	600	3000	1.147±0.02

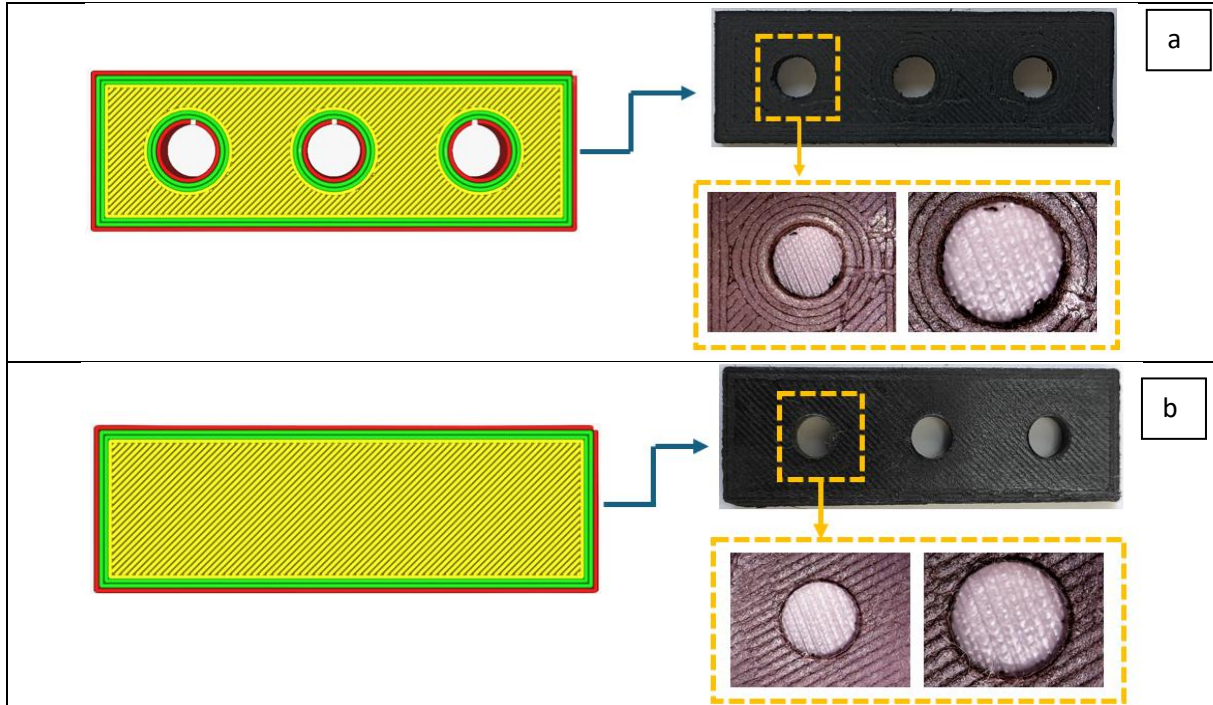
**Şekil 11.** 3B baskı için en düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip numunelerin görünümü (View of specimens with the lowest and highest delamination rate for 3D printing)



Şekil 12. 3B baskı ile üretilmiş kompozitlerin delinmesinde meydana gelen hatalar.
(Defects in drilling of composites produced by 3D printing.)

3B yazıcıda üretilmiş CTP kompozit malzemelere geleneksel delik delme işlemi yapılabilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemeler 3B yazıcıların üretim özellikleri sayesinde herhangi bir talaşlı imalat işlemi gerekmeksizin delikli olarak da basılabilmektedirler.

Şekil 13'de 3B yazıcıda (a) delikli basılan ve (b) sonradan delinen CTP kompozit parçaların görüntüleri verilmiştir. Delikli numunelerde (Şekil 13a) delaminasyon oranı 1.032 olarak belirlenmiştir. Sonradan delinen CTP kompozitlerle delikli parçaların delaminasyonları arasında önemli bir fark oluşmamıştır. Şekil 13'a ve b'de parçalar incelendiğinde baskı sırasında oluşan baskı çizgilerinde önemli farklar vardır. Özellikle delikli basılan parçalarda delik etrafına 0.4 mm kalınlığında 3 duvar atıldığı için baskı çizgileri değişiklik göstermektedir. Ayrıca matkapla delinen parçalarda fiberler kesintiye uğradığı için delik içlerinde fiber uzantıları belirlenmiştir.



Şekil 13. 3B yazıcıda basılan numunelerin görüntüleri a) delikli basılan parça b) deliksiz basılan parça
(Images of the specimens printed on the 3D printer a) part printed with holes b) part printed without holes)

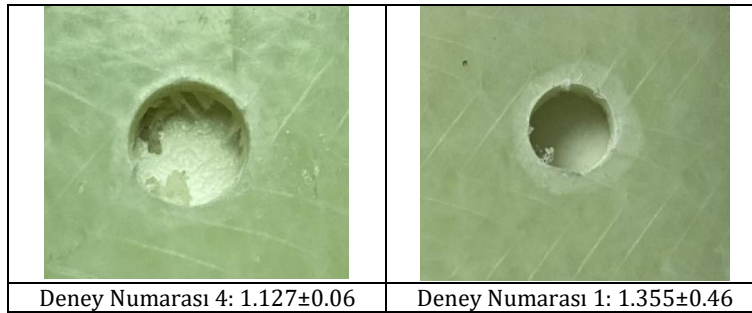
4.2.3. Elle yatırma tekniği ile üretilen numuneler için delaminasyon oranı (Delamination rate for specimens produced by hand lay-up technique)

Tablo 7'de elle yatırma tekniğiyle üretilen cam fiber katkıli kompozitlerin farklı ilerleme hızı ve farklı dönme hızlarında oluşan delaminasyon oranlarının ortalamaları ve Şekil 14'de en düşük ve en büyük delaminasyon oranına sahip numunelerin görüntüleri verilmiştir. Delme sonrası en düşük delaminasyon oranı 4 numaralı deneyde 1.127 ± 0.06 , en yüksek delaminasyon oranı 1 numaralı deneyde 1.355 ± 0.46 olarak belirlenmiştir. En

düşük delaminasyon oranı 400 mm/dak ilerleme hızında ve 3000 dev/dak takım dönme hızında elde edilmiştir. Sonuç olarak, delaminasyonu en aza indirmek için parametrelerin optimum değerleri belirlenmesi gerekmektedir. Ghasemi vd. (2011) cam elyaflarla güçlendirilmiş polimer bazlı kompozitlerin delinmesinde ilerleme hızı (25, 100 ve 400 mm/dak), matkap dönüş hızı (1000, 2000 ve 2500 dev/dak) ve matkap uç açısının (70°, 90° ve 118°) delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarında delme kuvvetini ölçülmüşlerdir. Delinmiş bölgenin çıkış deliği taranarak delaminasyon faktörü miktarı hesaplanmıştır. Sonuçlar, ilerleme hızının düşük ve yüksek değerlerinde delaminasyon faktörünün arttığını göstermiştir.

Tablo 7. Elle yatırılmış numunelerin delaminasyon oranları (Delamination rates of hand-layed specimens)

Deney Numarası	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	Delaminasyon Oranı
1	200	1500	1.355±0.46
2	200	3000	1.151±0.05
3	400	1500	1.274±0.13
4	400	3000	1.127±0.06
5	600	1500	1.270±0.07
6	600	3000	1.244±0.08

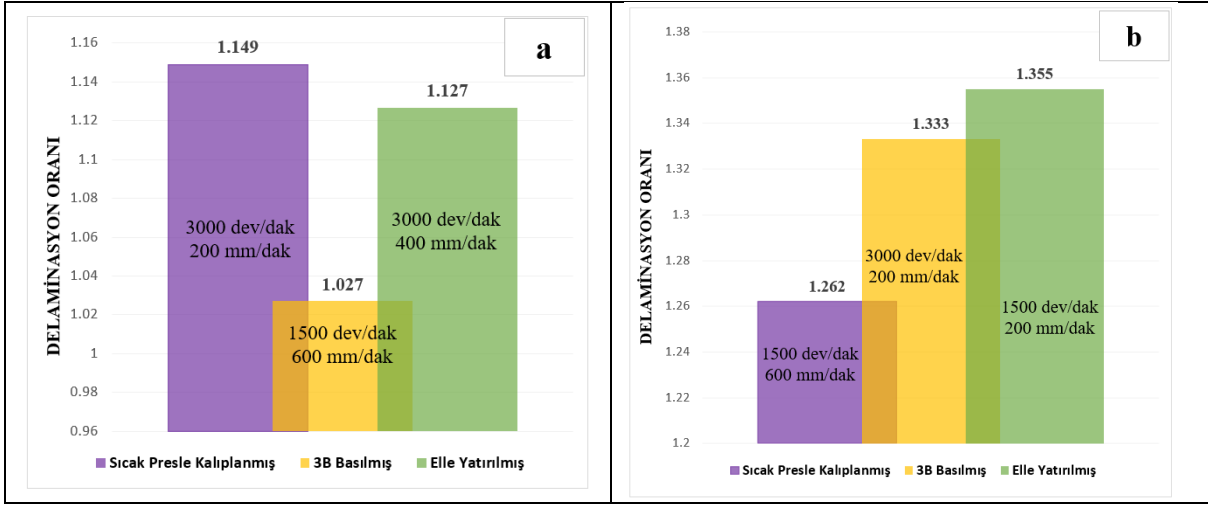


Şekil 14. Elle yatırma tekniği için en düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip numunelerin görünümü (Image of specimens with the lowest and highest delamination rate for hand lay-up technique)

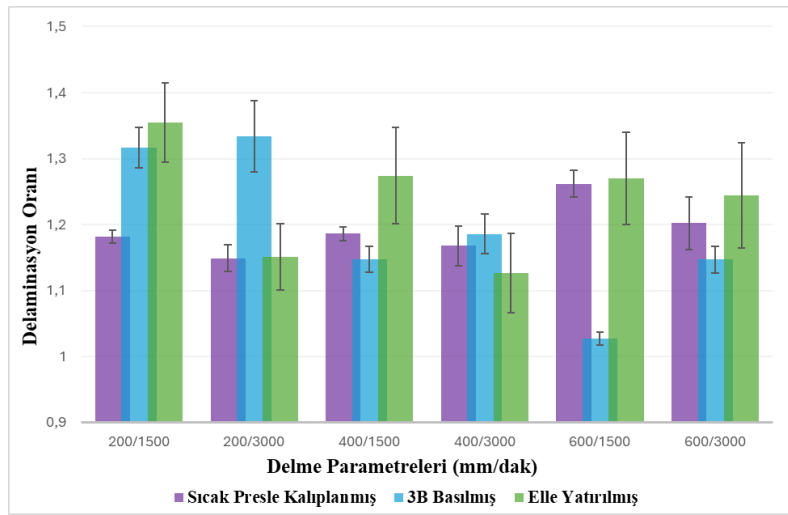
4.3. Üretim Tekniklerine Göre Belirlenen Delaminasyon Oranlarının Karşılaştırılması (Comparison of Delamination Rates Determined According to Manufacturing Techniques)

Farklı üretim teknikleriyle üretilmiş cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delinmesi sırasında delik çıkışlarında meydana gelen en büyük ve en küçük delaminasyon oranları Şekil 15'de verilmiştir. En düşük delaminasyon oranı (1.027) 3B baskıyla üretilen kompozit malzemede, en büyük delaminasyon oranı (1.355) elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozit malzemede belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük delaminasyon oranları arasındaki fark incelendiğinde sıcak presle kalıplanmış numunelerde (1.262-1.149) 0.113, 3B basılmış numunelerde (1.333-1.027) 0.306 ve elle yatırılmış numunelerde (1.355-1.127) 0.228 olarak hesaplanmıştır. Delme operasyonunda işlem parametrelerinden en az etkilenen sıcak presle kalıplama ile üretilen kompozit malzemedir. Bunun sebebi sıcak preslemenin etkisi ile katmanların birbiri ile daha iyi birleşmesi olduğu söylenebilir. Delme operasyonunda işlem parametrelerinden en fazla etkilenen 3B baskıyla üretilen kompozit malzemedir. 3B baskıyla üretilen kompozitlerde kesme sırasında oluşan ısı bölgesel olarak malzemenin yumuşamasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı kesici takım kesme yapamadığı için malzeme plastik deformasyona uğrar. Bu durumun delik çıkış bölgesinde delaminasyonun artmasına sebep olduğu söylenebilir.

Şekil 16'da farklı üretim teknikleriyle elde edilen kompozit malzemelerin delme işleminde kullanılan ilerleme hızı ve takım dönme hızına göre oluşan delaminasyon oranları verilmiştir. Sıcak kalıpla preslenmiş kompozitlerin delinmesinde 200 mm/dak ve 400 mm/dak ilerleme hızlarında takım dönme hızının delaminasyona etkisinin az olduğu belirlenmiştir. Takım ilerleme hızı 600 mm/dak' ya çıktığında 1500 dev/dak takım dönme hızında delaminasyon oranı artarken 3000 dev/dak takım dönme hızında düşmüştür. 3B baskı tekniğiyle üretilen kompozitlerin delinmesinde takım dönme hızı 1500 dev/dak ve 3000 dev/dak'da ilerleme hızının artmasıyla delaminasyon oranı düşmüştür. İlerleme hızı sabit tutularak takım dönme hızı arttırıldığında ise delaminasyon oranının arttığı belirlenmiştir. Elle yatırma tekniğiyle üretilen kompozitlerin delinmesinde ilerleme hızı sabit tutulduğunda takım dönme hızı arttıkça delaminasyon oranı düşmüştür. Sonuç olarak kompozit malzemelerin delinmesinde en sık karşılaşılan hata türü olan delaminasyon oranı birçok parametreden etkilenmektedir. Kompozit üretim tekniklerinin delik delmede ortaya çıkan delaminasyon oranında etkili bir faktör olduğu belirlenmiştir. Delaminasyon oranını azaltmak için delme sırasındaki işlem parametrelerinin yanı sıra üretim teknikleri de dikkate alınmalıdır.



Şekil 15. Farklı üretim teknikleriyle üretilen cam elyaf takviyeli kompozitlerin minimum (a) ve maksimum (b) delaminasyon oranları (Minimum (a) and maximum (b) delamination rates of glass fiber reinforced composites produced by different manufacturing techniques)



Şekil 16. Üretim tekniğine göre delme işlemindeki delaminasyon oranları (Delamination rates in drilling according to manufacturing technique)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Elyaf takviyeli polimer kompozitler sahip oldukları mekanik ve ısıl özellikler sayesinde otomotiv, havacılık-uzay, savunma sanayi başta olmak üzere endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozit malzemeler katmanlardan oluştuğu için delme işlemlerinde yapısal bütünlüklerini bozabilecek hatalar oluşmaktadır. Yapılan çalışmada sıcak presle kalıplama, 3B baskı ve elle yatırma üretim teknikleriyle üretilmiş CTP kompozitlerin işlenebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Delme işleminde üç farklı ilerleme hızı ve iki farklı takım dönme hızı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Çekme testi sonucunda üretim tekniklerine göre sıralandığında elle yatırma (168.4 ± 6.4 MPa), sıcak presle kalıplama (102.1 ± 2.4 MPa) ve 3B baskı (68.1 ± 1.9 MPa) olarak bulunmuştur. Üretim tekniklerinin de cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Sıcak presle kalıplama ile üretilen CTP parçalarda en düşük delaminasyon oranı 200 mm/dak ilerleme hızında ve 3000 dev/dak takım dönme hızında 1.149 olarak, 3B baskı ile üretilen CTP parçalarda en düşük delaminasyon oranı 600 mm/dak ilerleme hızında ve 1500 dev/dak takım dönme hızında 1.027 olarak, elle yatırma ile üretilen CTP parçalarda en düşük delaminasyon oranı 400 mm/dak ilerleme hızında ve 3000 dev/dak takım dönme hızında 1.127 olarak belirlenmiştir.

En düşük delaminasyon oranı (1.027) 3B baskı yöntemiyle üretilen kompozit malzemede, en büyük delaminasyon oranı (1.355) elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozit malzemede belirlenmiştir. Sıcak presle kalıplamada bu

değerlerin arasında çıkmıştır. Bunun sebebi sıcak preslemenin etkisiyle katmanların birbiri ile daha iyi birleşmesidir.

3B baskı yöntemiyle üretilmiş delikli ve deliksiz numunelerde delaminasyon oranı birbirine yakın çıkmıştır.

Sonuç olarak kompozit malzemelerin delinmesinde en sık karşılaşılan hata türü olan delaminasyon kusuru birçok parametreden etkilenmektedir. Yapılan çalışmada kompozit malzemelerin üretim tekniklerinin de delaminasyon oranında etkili olduğu belirlenmiştir. Delaminasyon oranını azaltmak için delme sırasındaki işlem parametrelerin yanı sıra üretim teknikleri de dikkate alınmalıdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 2023 yılının 2. Döneminde 1919B012320287 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aktaş, E. N., & Sofuoğlu, S. D., 2022. Mdf'lerin Delinmesinde Taguchi Yöntemi Kullanılarak Delaminasyon Faktörünün İncelenmesi. *Mobilya Ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 29-39.
- Alliche, M., Djebara, A., Zedan, Y., & Songmene, V., 2021. Machinability Of A356 Cast Alloys Under The Effect Of Artificial Aging Treatment And Lubrication Modes. *Jmst Advances*, 3, 19-33.
- Altun S., & Sekban B., 2023. 3B Yazıcılar İçin Cam Fiber Katkılı Kompozit Filament Üretimi ve Mekanik Özellikleri. *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(1), 64-77.
- Basf, 2024. Ultrafuse Pa6 Gf30. Erişim Tarihi: 27 May 2024 from <https://Forward-Am.Com/Material-Portfolio/Ultrafuse-Filaments-For-Fused-Filaments-Fabrication-Fff/Reinforced-Filaments/Ultrafuse-Pa6-Gf30/>
- Basf, 2024. Ultrafuse PP GF30. Erişim Tarihi: 27 May 2024 from https://www.onlinefilament.com/urun/ultrafuse-siyah-pp-gf30-filament?srsltid=AfmBOooeDJ8fM_vv_dll4q0mltygDahhq5YIFM9hdtFflfj1VMNfLlJ.
- Basmacı, G., & Yörük, A. S., 2020. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemenin Kuru Ve Kriyojenik Şartlarda Delinebilirliğinin Deneysel Araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 164-175.
- Bayraktar, Ş., & Turgut, Y., 2012. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delinmesi Üzerine Bir Araştırma. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim, Ankara, Türkiye.
- Bilge, T., Motorcu, A. R., & Ivanov, A., 2017. Kompakt Laminat Kompozit Malzemenin Tungsten Karbür Takımlarla Delinmesinde Delaminasyon Faktörünün Değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 427-436.
- Canpolat, N., 2008. Değişik Takviyeli Kompozit Malzemenin Matkapla Delinebilirliğinin Ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N., 2021. A Review On Filament Materials For Fused Filament Fabrication. *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 5(3), 69.
- Durgun, I., 2014. El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, 7. Mühendislik Ve Teknoloji Sempozyumu, 15-16 Mayıs, Çankaya, Ankara.
- Ekici, E., & Motorcu, A. R., 2022, Fiber Metal Laminatların Delinmesinde Giriş Delaminasyonu Üzerine Bir Araştırma. 9th International Congress On Engineering, Architecture and Design, 14 - 16 Mayıs, İstanbul, Türkiye.
- El-Wazery, M., El-Elamy, M., & Zoalfakar, S., 2017. Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal Of Applied Science And Engineering*, 14(3), 121-131.
- Ghasemi, F. A., Hyvadi, A., Payganeh, G., & Arab, N. B. M., 2011. Effects Of Drilling Parameters On Delamination Of Glass-Epoxy Composites. *Australian Journal Of Basic And Applied Sciences*, 5(12), 1433-1440.
- Ho-Cheng, H., & Dharan, C., 1990. Delamination During Drilling In Composite Laminates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 112(3), 236-239.
- Ilhan, R., & Feyzullahoğlu, E., 2019. Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf Ve Dolgu Maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 355-381.
- Karaca, F., 2016. Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerde Delme Parametrelerinin Deformasyon Faktörüne Etkisinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 23-27.
- Karataş, E., Koçar, O., Zülfiyar, N. B., Anaç, N. & Parmaksız, F., 2024. Investigation of Delamination Factor in Bi-directional Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Materials. *International Conference on Engineering, Natural Sciences, and Technological Developments (ICENSTED 2024)*, 19-21 July, Balıkesir, Türkiye.
- Kaya, A. I., 2016. Kompozit Malzemeler Ve Özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kaynak, C., & Varsavas S.D., 2018. Performance Comparison of The 3D-Printed and Injection-Molded PLA and Its Elastomer Blend and Fiber Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(4), 501-520.
- Kırhasanoğlu, E.Ö., & Turgut, Y., 2021. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin İstifli Delinmesinde Delik Çıkış Hasarının Deneysel Araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), pp.152-159.

- Koboevic, N., Jurjevic, M., & Koboevic, Z., 2012. Influence Of Cutting Parameters On Thrust Force, Drilling Torque And Delamination During Drilling Of Carbon Fibre Reinforced Composites. *Tehnicki Vjesnik*, 19(2), 391-398.
- Kompozitshop, 2024. Cam Fiber G10 Frp Plaka. Erişim Tarihi: 27 Mayıs 2024 (<https://www.kompozitshop.com/cam-fiber-g10-frp-plaka-t2mm-40x40cm-1295>)
- Kuş, A., & Ekici, E., 2017. Sandviç Kompozitlerin Delinmesinde Delaminasyon Faktörünün İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 153-162.
- Motorcu, A., Ekici, E., & Yıldırım, E., 2020. Cam Laminat Alüminyum Takviyeli Epoksinin (Glare) Özel Geometri Matkaplarla Delinmesi: Delaminasyon Faktörü Üzerine Bir Çalışma, *Uluslararası Malzeme ve Mühendislik Teknolojileri Konferansı*, 5-7 Kasım, Gaziantep, Türkiye.
- Núñez, P., Rivas, A., García-Plaza, E., Beamud, E., & Sanz-Lobera, A., 2015. Dimensional And Surface Texture Characterization In Fused Deposition Modelling (Fdm) With Abs Plus. *Procedia Engineering*, 132, 856-863.
- Özer, H., 2015. Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye.
- Özkaya, F., Özen, F., İlhan, E., & Aslanlar, S., 2019. Cam Küre Takviyeli Polipropilen Kompozit Malzemelerin Delaminasyon Faktörünün Deneysel Olarak İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 843-849.
- Ranganathan, S., Rangasamy Suguna Thangaraj, H.N., Vasudevan, A.K., & Shanmugan, D.K., 2019. Analogy of thermal properties of polyamide 6 reinforced with glass fiber and glass beads through FDM Process. *SAE Technical Paper*, 2019-28-0137.
- Rubio, J. C., Abrao, A., Faria, P., Correia, A. E., & Davim, J. P., 2008. Effects Of High Speed In The Drilling Of Glass Fibre Reinforced Plastic: Evaluation Of The Delamination Factor. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48(6), 715-720.
- Singh, I., Bhatnagar, N., & Viswanath, P., 2008. Drilling Of Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastics: Experimental And Finite Element Study. *Materials & Design*, 29(2), 546-553.
- Skoczylas, J., Samborski, S., & Kłonica, M., 2019. The Application of Composite Materials in The Aerospace Industry, *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, 5(1), 1-6.
- Tanabi, H., 2021. Investigation of The Temperature Effect on The Mechanical Properties of 3D Printed Composites, *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(2), 188-193.
- Terekhina, S., Skorniyakov, I., Tarasova, T., & Egorov, S., 2019. Effects of The Infill Density on The Mechanical Properties of Nylon Specimens Made by Filament Fused Fabrication, *Technologies*, 7(3), 57.
- Türkmen, I., & Köksal, N. S., 2012. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (Ctp) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin Ve Darbe Dayanımının İncelenmesi, *Celal Bayar University Journal Of Science*, 8(2), 17-30.
- Yücel, U., 2019. Termoplastik Esaslı Partikül Katkılı Kompozit Malzemelerin Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.



COMPARİSON OF REBA, RULA AND OWAS ERGONOMİC RİSK ASSESSMENT METHODS: AN EXAMPLE OF A CAR TİRE BUSINESS

Ali AĞAR*

Artvin Çoruh University, Borcka Acarlar Vocational School, Occupational Health and Safety Department, Artvin, Türkiye

Keywords

Car Tire Worker, Ergonomic, OWAS, REBA, RULA.

Abstract

Ergonomics has an important place in the prevention of musculoskeletal disorders. In order to prevent musculoskeletal disorders, it is necessary to identify all risk factors that occur during work. This study was conducted to examine and compare the working postures of employees in an auto tire company in the Eastern Anatolia Region of Türkiye while changing tires with REBA (Rapid Entire Body Assessment), RULA (Rapid Upper Limb Assessment) and OWAS (Owako Working Position Analysis System) ergonomic risk analysis methods. The data of the study were obtained by the researcher by taking photographs of the employees and written consent of the employees was obtained. It was determined that auto tire workers exhibit seven different working postures due to their work. When the ergonomic risk assessment results of the employees for seven different working postures were analyzed, it was seen that REBA, RULA and OWAS ergonomic risk assessment methods did not give the same results. In addition, in this study, OWAS and REBA final scores were lower than RULA final scores. It is thought that this study will be a sample guide for occupational physicians, occupational safety specialists, and graduate and doctoral students working with the musculoskeletal system.

REBA, RULA VE OWAS ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: BİR OTO LASTİK İŞLETMESİ ÖRNEĞİ

Anahtar Kelimeler

Oto Lastik Çalışanı, Ergonomi, OWAS, REBA, RULA.

Öz

Kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının önlenmesinde ergonomi önemli yere sahiptir. Kas iskelet sistemi rahatsızlıklarından korunmak için çalışma sırasında ortaya çıkan tüm risk faktörlerini tespit etmek gerekir. Bu çalışma, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan bir oto lastik firmasında çalışanların lastik değiştirirken sergiledikleri çalışma duruşlarını REBA (Rapid Entire Body Assessment), RULA (Rapid Upper Limb Assessment) ve OWAS (Owako Working Position Analysis System) ergonomik risk analizi yöntemleri ile incelemek ve karşılaştırmak amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın verileri araştırmacı tarafından çalışanların fotoğrafları çekilerek elde edilmiş ve çalışanların yazılı onamları alınmıştır. Oto lastik çalışanları yaptıkları iş gereği yedi farklı çalışma duruşu sergilediği tespit edilmiştir. Çalışanların yedi farklı çalışma duruşu için ergonomik risk değerlendirme sonuçları analiz edildiğinde REBA, RULA ve OWAS ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin aynı sonuçları vermediği görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada OWAS ve REBA nihai puanları RULA nihai puanlarından daha düşük çıkmıştır. Bu çalışma işyeri hekimleri, iş güvenliği uzmanları ve kas iskelet sistemi ile çalışan yüksek lisans ve doktora öğrencilerine yol gösterici kaynak niteliğinde bir örnek klavuz olacağı düşünülmektedir.

Alıntı / Cite

Ağar, A., (2025). Comparison of REBA, RULA and OWAS Ergonomic Risk Assessment Methods: An Example of a Car Tire Business, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 13(1), 250-262.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Ağar, 0000-0003-2771-9587

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.04.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.01.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.01.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: aliagar828@gmail.com, +90-506-274-0641

COMPARISON OF REBA, RULA AND OWAS ERGONOMIC RISK ASSESSMENT METHODS: AN EXAMPLE OF A CAR TIRE BUSINESS

Ali AĞAR†,

Artvin Çoruh University, Borcka Acarlar Vocational School, Occupational Health and Safety Department, Artvin, Türkiye

Highlights

- Investigate the effect of different ergonomic risk analysis methods for the same working position
- Identify risk factors for musculoskeletal disorders and evaluate the impact of ergonomic changes
- Estimate appropriate ergonomic risk analysis methods in other work areas

Purpose and Scope

Workers in an automobile tire service center can cause Musculoskeletal Disorders (MSDs) due to improper work postures, as it involves handling heavy objects, such as mounting and changing tires and rims. This study was conducted to examine and compare the working postures of employees while changing tires in an auto tire company located in the Eastern Anatolia region of Türkiye with REBA (Rapid Entire Body Assessment), RULA (Rapid Upper Limb Assessment) and OWAS (Owako Working Position Analysis System) ergonomic risk analysis methods.

Design/methodology/approach

The data of the study were obtained by the researcher by taking photographs of the employees. The research is a descriptive study based on observation. This article was made to compare and discuss the internationally accepted ergonomic risk analysis methods with the internationally accepted ergonomic risk analysis methods of employees in an auto tire business.

Findings

When the results of the ergonomic risk assessment of the employees for seven different working postures were analyzed, it was found that REBA, RULA and OWAS ergonomic risk assessment methods did not give the same results. In addition, OWAS and REBA final scores were lower than RULA final scores in this study.

Research limitations/implications

Should be expanded sectorally for future studies, using ergonomic risk analysis methods in other sectors. This study is limited to employees working in an auto tire company.

Practical implications

Most importantly, which ergonomic risk analysis methods will be used in which sector should be determined by experts in the field, and training on these analyzes should be given to employers, employees, occupational safety experts and workplace physicians under the name of "ergonomic risk guide".

Social Implications

By using the correct ergonomic risk analysis method, it is ensured that employees work in a healthy and safe way, and therefore the health of employees increases productivity and contributes to both society and the national economy.

Originality

Ergonomic studies are almost non-existent in our country. therefore, ergonomic risks and analysis of auto tire workers will contribute to the literature.

† Corresponding author: aliagar828@gmail.com, +90-506-274-0641

1. Introduction

Car tire service centers are considered among the most dangerous places in the automotive environment. Various car tire activities involve handling heavy objects, such as mounting and changing tires and rims. The high force and awkward postures resulting from lifting, lowering and handling tires can cause Musculoskeletal Disorders (MSD) due to improper work postures (Abd Rahman et al., 2009).

The musculoskeletal system is a complex structure of bones, joints, muscles, tendons, ligaments, nerves and blood vessels (Mishra & Sarkar, 2021). Work-related musculoskeletal diseases (WMSD) are diseases that occur with work, can increase in severity with work, and can limit the activities of the person in the work environment and outside of work (Akıncı et al., 2018). WMSD has become one of the most common health problems in society (Sirzai et al., 2015).

According to a UK study, WMSD are one of the most common occupational diseases. In the U.S., Bureau of Labor Statistics data found that WMSDs are a major component of workers' compensation, accounting for at least one-third of lost work time (Mishra & Sarkar, 2021). Preventing MSDs around the world is crucial because it has physical and economic consequences for workers, families, businesses and governments (Gómez-Galán et al., 2017).

One of the most common occupational diseases in Europe is MSDs. These occur in various parts of the body, most commonly developing in the back and upper limbs. In order to protect against MSD, it is necessary to identify all the risk factors that occur during work. Once identified, preventive measures should be taken to avoid them or measures should be taken to reduce them. Some studies suggest measures such as rotating workers between different jobs, providing ergonomics training to workers, designing ergonomic tools in the workplace and ergonomically redesigning the work equipment used (Gómez-Galán et al., 2020).

In addition, ergonomics has an important place in preventing MSDs. Ergonomics is a field of science that examines human-machine-environment properties and the relationship between these properties. In terms of meaning, ergonomics is formed from the Greek words *ergos* meaning work and *nomos* meaning science (Yaşar & Saraçoğlu, 2021). The aim of ergonomics is to make a work system work better by improving the interactions between users and machines (Bridger, 2008).

In Türkiye, there is no structured systematic ergonomic risk assessment approach used by businesses to assess and monitor work-related MSDs. This deficiency causes occupational safety specialists working in workplaces to hesitate and have difficulties in observation, analysis and interpretation stages, including method selection (Felekoğlu & Taşan, 2017).

The aim of this study is to examine the working postures of employees in a tire company located in the eastern Anatolia region of Türkiye and to evaluate the ergonomics of OWAS (Owako Working Position Analysis System), REBA (Rapid Entire Body Assessment) and RULA (Rapid Upper Limb Assessment), whose reliability has been proven in the literature is to compare these methods using risk analysis methods.

2. Materials and Methods

The methods used in the evaluation of MSDs vary depending on factors such as countries, workplaces and working environment (Hita-Gutiérrez et al., 2020). Looking at the literature, risk assessment tools for musculoskeletal disorders are grouped into three categories: self-assessment tools (surveys), observation tools and direct measurement tools (David, 2005; Gómez-Galán et al., 2020; Gómez-Galán et al., 2017; Norval et al., 2018). Risk assessment tools for musculoskeletal disorders are listed in Table 1.

Table 1. Risk assessment tools for MSDs

Self-Assessment Tools	Observation Tools	Direct Measurement Tools
Employing questionnaires	Observing the task being carried out and using software to analyse it	Placing sensors on employees' bodies while performing tasks

Observational methods are the most commonly used tools to identify risk factors for MSDs in the workplace and to evaluate the impact of ergonomic changes (Oliv et al., 2019). It is based on direct observation of employees as they perform their duties. Practitioners collect necessary data while observing the work performed by the worker. After this, they use tables or equations to quantify risks related to ergonomic aspects of the tasks developed

(Diego-Mas et al., 2017). Additionally, they are relatively easy to use, require a lower level of expertise than other techniques, and do not require complex calibration procedures (Diego-Mas et al., 2017; Diego-Mas et al., 2015). For these reasons, observational methods appear better adapted to the needs of practitioners who often have limited resources and time and need techniques that allow them to determine priorities for intervention (Diego-Mas et al., 2017). Table 2 includes the classification of observational methods.

Table 2. Classification of observational methods (G3mez-Gal3n et al., 2020; G3mez-Gal3n et al., 2017)

Handling of Loads	Repetitive Movements	Strained Postures
KIM Method	RULA Method	REBA Method
INSHT Method	"Work Strain Index" Method	PATH Method
MAC Method	OCRA Method	OWAS Method
SNOOK and CIRIELLO Tables	Stop and Repetition Risk Factor Index (PRRI)	CORLETT Method
LIBERTY MUTUAL Tables	PLIBEL Method	YOL Method
NIOSH Method	IBV Method	Vira Method

Many studies have investigated work risks using ergonomic risk assessment tools to prevent MSDs. The most common assessment tools include REBA, RULA and OWAS (Kong et al., 2018). The main reason for using REBA, RULA and OWAS methods together in this study is to comprehensively analyze ergonomic risks in the workplace at both general and regional levels. The REBA method provides a general risk analysis by evaluating all body positions and reveals risks especially in the spine, neck, trunk and lower extremities. RULA focuses on assessing risks to the arms, hands and wrists by examining upper limb movements in detail. OWAS offers a more systematic analysis of working postures by identifying overall workload and risk classes. Using these methods together has enabled a multidimensional analysis to cover all body risks in the workplace, rather than focusing only on a specific region.

2.1. REBA, RULA and OWAS Methods

RULA, REBA and OWAS are widely used in the industrial sector as ergonomic risk assessment tools to analyze various tasks. However, each assessment tool has a different purpose and development history, so risk assessment varies depending on the type of task analyzed (Choi et al., 2020).

RULA and REBA are two easy methods for occupational postural risk assessment. Both RULA and REBA allow to obtain a numerical index that represents the quantitative value of the risk exposed to the employee during the targeted work activity and to derive the priority level of the intervention and the required actions. The RULA method is recommended for detecting posture disorders in the upper extremities, neck and back depending on muscle movement and external loads applied to the body. The REBA method is applied to determine posture disorders of the whole body regarding muscle movement. RULA and REBA methods are stated among the methods chosen for the prevention of Work-Related MSDs according to the International Ergonomics Association (IEA) and the World Health Organization (WHO) (Micheletti Cremasco et al., 2019). The RULA method can be considered an advanced form of the OWAS method used for closer examination of the upper extremity (Yazdanirad et al., 2018).

2.1.1 REBA (Rapid Entire Body Assessment)

REBA is a method specifically designed to analyze whole body postures, strength, load, which are most suitable for standing work, determining the lower limbs, upper limbs, trunk, neck and other activity factors (Hignett & McAtamney, 2000; Marak et al., 2020). The difference of the REBA method from other evaluation methods such as RULA and OWAS is that it takes the employee's lower extremities into consideration (Hita-Guti3rrez et al., 2020). REBA method is a risk analysis method that varies according to the working postures of the employee's entire body during work and the weight of the load he is exposed to during this time. When the REBA analysis method is applied to the employee, a score ranging from 1 to 15 is obtained.

In the REBA method, the body is scored by dividing it into two groups, A and B. Figure 1 shows the scoring system for group A (trunk, neck and legs). Strength/Load Score is added after neck, trunk and leg analyses. If the weight of the workpiece or material is less than 5 kg, 0 points are added, if the weight is between 5 kg and 10 kg, +1 point is added, and if the weight is more than 10 kg, +2 points are added. If there is a sudden and rapid increase in strength in addition to weight, +1 additional point should be added to find the Strength/Load score.

Figure 1 shows the scoring system for group B (upper arm, lower arm and wrist). Grip Score is added after analyzing the upper arm, lower arm and wrist. If the workpiece is grasped well, 0 points should be added, if there is a moderate grasp, +1 point, if there is a poor grasp, +2 points, and if the grip is inappropriate in any way, +3

points should be added to obtain the grip score. After A and B scores are calculated, they are marked in the C matrix in figure 1 and C score is obtained. After the C score is calculated from the matrix table, the REBA risk score is calculated by calculating the activity score.

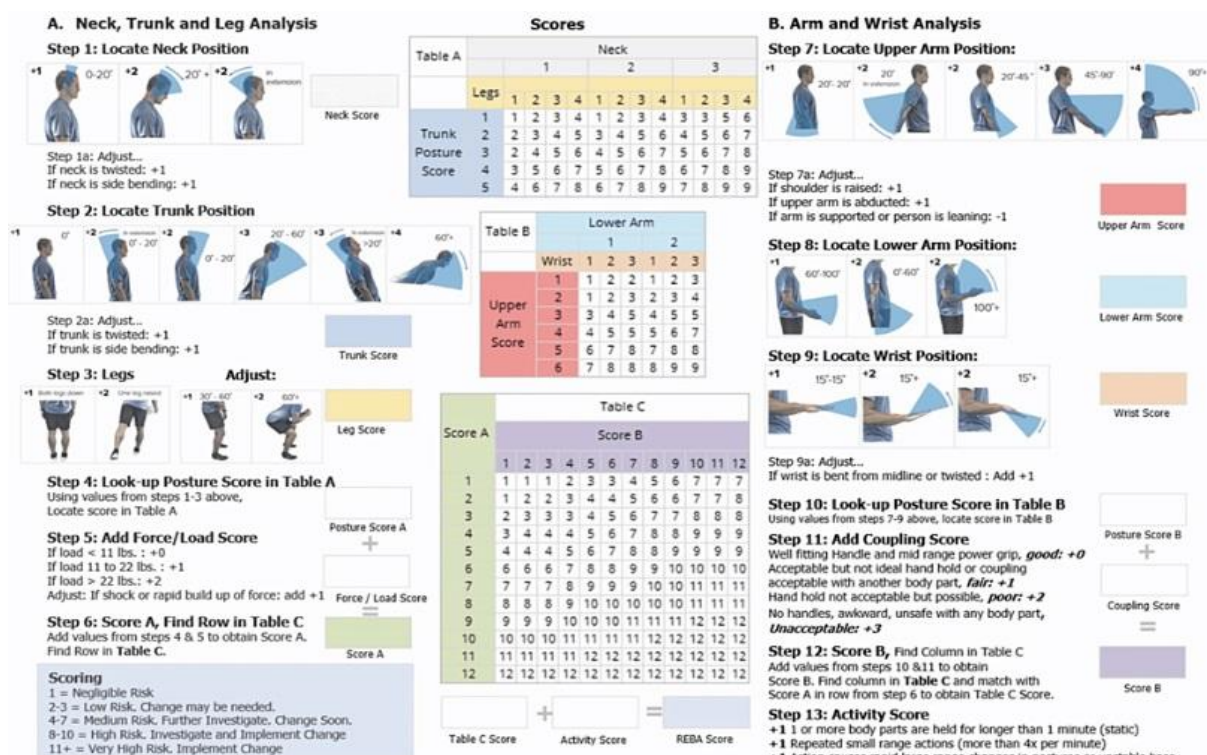


Figure 1. REBA scoring algorithm (Morrison et al., 2024)

Interpretation of the total REBA score is made as in Table 3.

Table 3. REBA action levels (Hignett & McAtamney, 2000).

Action Level	REBA Score	Risk Level
0	1	Negligible
1	2-3	Low risk
2	4-7	Medium risk
3	8-10	High risk
4	11-15	Very high risk

2.1.2. RULA (Rapid Upper Limb Assessment)

The RULA method, developed by Corlett and McAtamney (1993), is a method that allows the rapid assessment of strains in the employee's neck, trunk, upper arms, hands and legs. According to the RULA method, body parts in a working posture are divided into groups A (Upper Arm, Lower Arm and Wrists) and B (Neck, Trunk and Legs). As seen in Figure 2, the RULA method, which consists of a total of 15 steps, is an analysis method that determines whether the employee has a risky working posture or not by determining the total RULA score (McAtamney & Corlett, 1993; Namwongsa et al., 2018).

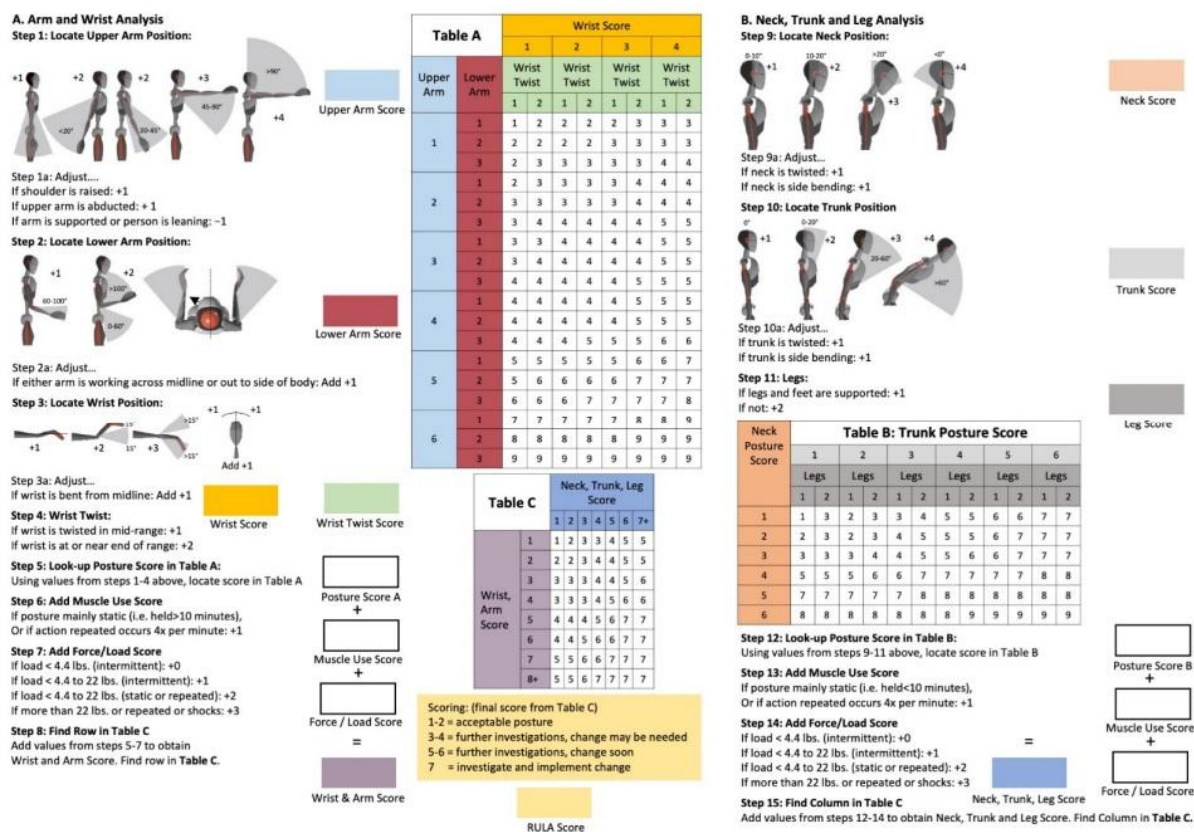


Figure 2. RULA scoring algorithm (Maurer-Grubinger et al., 2021).

Interpretation of the total RULA score is made as in Table 4.

Table 4. RULA action levels (Maurer-Grubinger et al., 2021).

Action Level	RULA Score	Risk Level
1	1-2	Low risk
2	3-4	Medium risk
3	5-6	High risk
4	7	Very high risk

2.1.3. OWAS (Owako Working Position Analysis System)

OWAS is a widely used observational assessment method to determine risk for WMSDs (Lins et al., 2021). It was developed by Karhu et al in 1977 (Karhu et al., 1977). In OWAS, worker postures are evaluated by the assessor in three or four categories (arms, legs, back, and sometimes load), usually between 30 seconds and 5 minutes. The OWAS method is a relatively simple assessment method and can therefore be applied by people without explicit training in ergonomics (Lins et al., 2021).

The OWAS classification system divides working posture into three categories: back, arms and legs (Lins et al., 2021). There are four working postures for the back, three for the arms and seven for the legs. It also defines three categories for the weight of the load carried or the amount of force used (Kee, 2022). The observer selects the working posture that is closest to the employee's actual posture and the numerical value corresponding to that posture is given. Numerical values corresponding to back, arms, legs and load/power usage form a four-digit code that defines posture (Lins et al., 2021). Figure 3 shows the OWAS method working posture and load/power usage numerical values and coding structure (Özoğul et al., 2018).

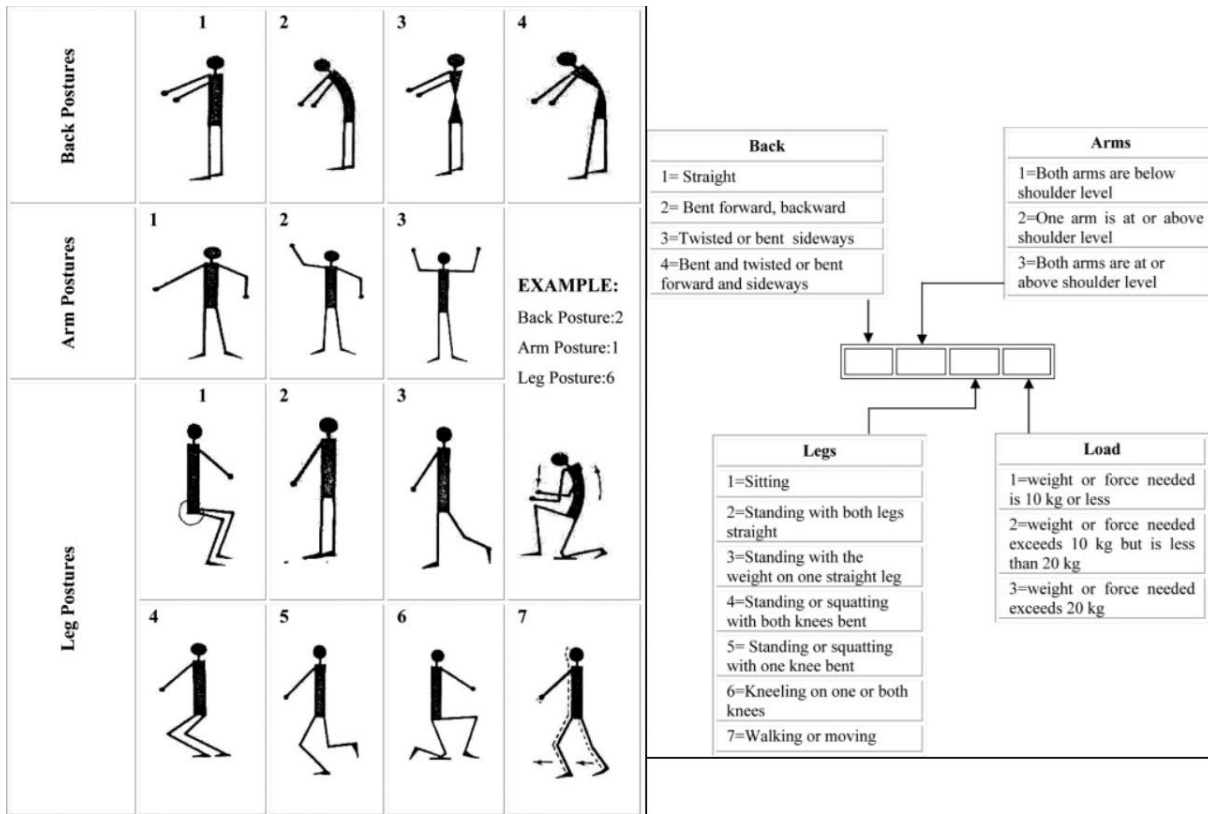


Figure 3: OWAS method working postures and coding structure (Fiğlalı et al., 2015).

Figure 4 is used to determine the common impact of the four defined codes on employees and to decide whether improvements should be made.

		Bacaklar																						
		1			2			3			4			5			6			7				
		Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet			Kuvvet				
		Kollar																						
Sırt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
		2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
		3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	2	3	1	1	1	1	1	1
	2	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3
		2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4	4
		3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	3
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1
		2	2	2	3	1	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1
		3	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
	4	1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4
		2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4
		3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4

Figure 4. OWAS action levels

In Figure 4, four different action categories can be determined as a result of stance-force combinations. These action classes are given below

- Action category 1: normal postures that do not require any special attention
- Action category 2: postures must be taken into account during the next regular check of working methods
- Action category 3: postures need to be considered in the near future
- Action category 4: postures need to be evaluated immediately (Kee, 2022).

2.2. Implementation of the Research

This study was carried out between 15 and 25 October 2023 in a tire company located in the Eastern Anatolia region of Türkiye. Auto tire workers exhibit 7 different working postures when changing car tires. Figure 5 shows the movements he makes while placing the jack under the car.



Figure 5. First working posture

Figure 6 shows the movements he makes while removing the tire from the car. Since the working postures when removing and installing the tire from the car involve the same movements, the analysis of the working posture while installing the tire was not performed.



Figure 6. Second working posture

Figure 7 shows the working movements of the employee while separating the tire from the rim. The worker exhibits three different working postures when separating the tire from the rim. The first working stop is to deflate the tire (A), the second working stop is to separate the tire from the rim (B), and the third work stop is to completely remove the tire from the rim (C).



Figure 7. Third working posture

Figure 8 shows the working postures he made while opening the tire tread (A) and the working postures he made while repairing the tire (B).



Figure 8. Fourth working posture

In the figures above, visuals are given about the work done by employees in the tire company. In this context, the ergonomic risk analyzes of the employees while repairing a tire were analyzed with REBA, RULA and OWAS methods and their action levels were compared.

2.3. Ethics Statement

This study was approved by the Scientific Research Ethics Committee of a university in Türkiye (Date: 14.09.2023 Decision No: E-18457941-050.99-104667). Permission was obtained from the tire company where the research was conducted. The employees were informed about the purpose and process of the study and their written permission was obtained.

3. Results

REBA, RULA and OWAS final scores, action levels and risk levels of tire workers' working postures are given in the tables below.

Table 6. REBA, RULA and OWAS final scores of working postures

	REBA	RULA	OWAS
First Working stance	10 points	6 points	4 points
Second Working stance	5 points	6 points	2 points
Third Working stance - A	3 points	7 points	2 points
Third Working stance - B	6 points	7 points	2 points
Third Working stance - C	2 points	6 points	1 points
Fourth Working stance - A	9 points	7 points	2 points
Fourth Working stance - B	3 points	7 points	2 points

In the ergonomic risk assessment of the work performed by the tire worker, it was determined that the highest REBA score (10 points) was the first working posture, followed by the fourth working posture-A (9 points) and the third working posture-B (6 points). When looking at the RULA score of the working postures, the highest score is in the third working posture - A/B (7 points) and in the fourth working posture - A/B (7 points), followed by the first working posture (6 points), the second working posture (6 points) and the third working posture (6 points). It is seen that the working posture follows -C (6 points). When looking at the OWAS score of working postures, it is seen that the highest working posture is the first working posture (4 points), followed by the second working posture (2 points), the third working posture - A/B (2 points) and the fourth working posture - A/B (2 points). It is seen that it follows (Table 6).

Table 7. REBA, RULA and OWAS action levels of working postures

	REBA	RULA	OWAS
First Working stance	Action level 3	Action level 3	Action level 4
Second Working stance	Action level 2	Action level 3	Action level 2
Third Working stance - A	Action level 1	Action level 4	Action level 2
Third Working stance - B	Action level 2	Action level 4	Action level 2
Third Working stance - C	Action level 1	Action level 3	Action level 1
Fourth Working stance - A	Action level 3	Action level 4	Action level 2
Fourth Working stance - B	Action level 1	Action level 4	Action level 2

Looking at the REBA action levels of the working postures in Table 7, it was determined that the highest REBA action level was the first working posture and the fourth working posture-A (Action level 3), followed by the second working posture and the third working posture-B (Action level 2). Considering the RULA action levels, the highest action level is in the third working posture-A/B and the fourth working posture-A/B (Action level 4), followed by the first working posture, the second working posture and the third working posture-C (Action level 3). can be seen. When looking at the OWAS action levels, it is seen that the highest action level is the first working stance (Action level 4), followed by the second working stance, the third working stance-A/B and the fourth working stance-A/B (Action level 2).

Table 8. REBA, RULA and OWAS risk levels of working postures

	REBA	RULA	OWAS
First Working stance	High risk	High risk	Very high risk
Second Working stance	Medium risk	High risk	Medium risk
Third Working stance - A	Low risk	Very high risk	Medium risk
Third Working stance - B	Medium risk	Very high risk	Medium risk
Third Working stance - C	Low risk	High risk	Low risk
Fourth Working stance - A	High risk	Very high risk	Medium risk
Fourth Working stance - B	Low risk	Very high risk	Medium risk

Looking at the REBA risk levels of the working postures in Table 8, the first working posture and the fourth working posture - A is the second working posture where A is high risk working posture and the third working posture is A/C where the third working posture is medium risk working posture and the fourth working posture is A/C and the fourth working posture is B has been found to be a low-risk working posture. When looking at the RULA risk levels of the working postures, it was determined that the third working posture - A/B and the fourth working posture - A/B exhibited a very high risk working posture, while the first working posture, the second working posture and the third working posture - C exhibited a high risk working posture. When the OWAS risk levels of the working postures were analyzed, it was found that the first working posture was a very high-risk working posture, the second working posture was a medium-risk working posture, the third working posture-A/B and the fourth working posture-A/B exhibited a medium-risk working posture, and the third working posture-C exhibited a low-risk working posture.

4. Result and Discussion

In this study, the ergonomic risks encountered in the workplace were evaluated in detail by using REBA, RULA and OWAS methods together. The combination of the methods allowed us to comprehensively analyze the risks in different body parts. However, certain limitations of the methods used must also be taken into account. For example, REBA and RULA focus on static postures, while lacking the continuous analysis of dynamic movements. Similarly, although the OWAS method provides general workload and posture analysis, it cannot assess detailed loads on the musculoskeletal system. These limitations suggest that the results of the study are generalizable only for static and semi-dynamic work processes. Nevertheless, the combination of the methods increased the accuracy and reliability of the results and provided a comprehensive framework for identifying the risks of musculoskeletal disorders.

When we look at the ergonomic risk assessment results made with REBA, RULA and OWAS methods, the riskiest working posture for REBA is the movements it makes while placing the jack under the car and the working posture it makes while opening the tire thread, while the most risky working posture for RULA is the movements it makes while deflating the tire and the movements it makes while separating the tire from the rim. It can be seen that there are movements, the movements he makes while opening the tire tread, and the movements he makes while repairing the tire. For OWAS, the riskiest working posture seems to be the movements made while placing a jack under the car.

While the lowest risk working postures for REBA are the movements made while deflating the tire, completely removing the tire from the rim and repairing the tire, the lowest risk working postures for RULA have not been determined. For OWAS, it was concluded that the movement to completely remove the tire from the rim was the working posture with the lowest risk.

Looking at the results of three different ergonomic risk assessments, it is seen that only the movements made while opening the tire tread give the same result for REBA and RULA. It can be seen that for REBA and OWAS, the movements when placing a jack under the car give the same result. In addition, the movements made to completely remove the tire from the rim were found to be the lowest risk of the two methods and were determined to have parallel results. No common results were found for RULA and OWAS.

In this context, when the ergonomic risk assessment results for seven different working postures are examined, it is concluded that REBA, RULA and OWAS ergonomic risk assessment methods do not give the same results. However, if this study had been conducted for a single working posture, it would be possible to comment that three different ergonomic risk analysis methods gave the same results. When we look at the REBA, RULA and OWAS ergonomic risk assessment final scores of the movements he made while placing a jack under the car, which was his first working posture (Table 9), we see that his REBA score was 10 points and he exhibited a high-risk working posture, and his RULA score was 6 points and he exhibited a high-risk working posture. It is seen that the OWAS score is 4 points and exhibits a very high risk working posture.

Table 9. First working posture REBA, RULA and OWAS scores

	final score	Action level	Risk level
REBA	10 point	Action level 3	High risk
RULA	6 point	Action level 3	High risk
OWAS	4 point	Action level 3	High risk

Looking at Table 9, it can be seen that the REBA, RULA and OWAS results of the working postures made by the employee while placing the jack under the car give parallel results. In other words, it is understood that all ergonomic risk action levels are high and regulations need to be made in the short term.

In this study, it was determined that although three different ergonomic risk assessment methods seem to give similar results for a single working posture, they do not give the same results for all working postures. When looking at the literature, there are very few studies comparing REBA, RULA and OWAS. Lee et al. compared the three most commonly used tools, OWAS, RULA and REBA, and analyzed the characteristics from working posture loads. They found that waist postures played an important role in determining the overall load level in the OWAS compared to shoulder postures, while the RULA did not adequately discriminate lower limb postures and the REBA was more suitable for assessing whole-body working postures than the other assessment tools (Lee et al., 2003).

The results of a study by Kee and Karwowski (2007) showed that the RULA predicted 56% of the risk of musculoskeletal disorders in moderate and high occupations, while the OWAS and REBA predicted 79% of the risk of musculoskeletal disorders in low and very low levels in the same occupations (Kee & Karwowski, 2007).

Sanchez et al. (2013) also showed that the RULA method does not have sufficient power to predict low risks, especially since RULA does not categorize any operation as low risk (Sanchez-Lite et al., 2013). In the analysis conducted by Yaylı and Çalışkan (2019) using REBA, RULA and OWAS methods to analyze working postures related to forest sapling works, 4.6% of employees were found to be risky according to OWAS, 8% according to REBA and 20% according to RULA method (Yayli and Caliskan 2019). The fact that the RULA method was found to be the most risky supports our study.

In an experimental study conducted with fifteen university students using REBA, RULA and OWAS methods, Kee (2020) reported that, regardless of the nature of the job, the type of work and whether the body postures are balanced, OWAS and REBA generally affected the postural loads for the analyzed postures according to RULA. He found that he underestimated (Kee, 2020). In our study, OWAS and REBA scores were lower than RULA, and this result supports our study in the literature.

Joshi and Deshpande (2021) found that OWAS may be more appropriate for assessing risk if the load/power utilization is less than 5 kg, while REBA and RULA may be more appropriate for load ranges of 5 kg - 10 kg and loads greater than 10 kg, respectively (Joshi & Deshpande, 2022).

In a study comparing REBA, RULA and OWAS methods based on the literature, Kee (2022) stated that, although it has an important limitation of containing only two classifications for leg postures, RULA is the most frequently used method among the three techniques, and in many studies, it is used for unbalanced lower extremity postures. It was determined that RULA was used even in the evaluation and studies conducted with RULA evaluated postural loads as higher risk levels (Kee, 2022). In our study, low risk level working posture for RULA was not detected and it supports Kee's study.

In this study, which examined the ergonomic risks of auto tire workers for seven different working postures, it is recommended that the working surface should be adjusted and ergonomic equipment should be used for working postures with high REBA scores, repetitive movements should be reduced and regular rest breaks should be planned for working postures with high RULA scores, and workstations should be rearranged to support postures to improve general working postures when OWAS scores are high.

The number of studies on ergonomic risks in Türkiye is quite low. For this reason, it is inevitable that employees will be exposed to musculoskeletal disorders and therefore their health expenses will become a burden on the country's economy. Ergonomic risks should be evaluated in all businesses, regardless of the number of employees. Ergonomic aspects of the equipment, equipment and tools used should be examined by technical experts. Training on ergonomic working postures should be planned and given. Visual designs and brochures regarding ergonomics should be presented. Most importantly, which ergonomic risk analysis methods will be used in which sector should be determined by experts in the field, and training on these analyzes should be given to employers, employees, occupational safety experts and workplace physicians under the name of "ergonomic risk guide".

Conflicts of Interest

Author declared no known conflicts of interest associated with this study.

Funding

No funding was used for this study.

Acknowledgements

I would like to thank the tire employees and business owners who participated in the study.

References

- Abd Rahman, M. N., Aziz, F. A., & Yusuff, R. M., 2009. Investigation of ergonomic risk factors in a car tyre service centre. *National Symposium on Advancement in Ergonomics and Safety*, 137.
- Akıncı, B., Zenginler, Y., Begüm, K., Aslıhan, K., & Yeldan, İ., 2018. Beyaz Yakalı Çalışanlarda İşe Bağlı Boyun, Sırt ve Omuz Bölgelerine Ait Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarının ve İşe Devamsızlığa Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi. *Sakarya Tıp Dergisi*, 8(4), 712-719.
- Bridger, R. 2008. *Introduction to ergonomics*. Crc Press.
- Choi, J., Gu, B., Chin, S., & Lee, J.-S., 2020. Machine learning predictive model based on national data for fatal accidents of construction workers. *Automation in Construction*, 110, 102974.

- David, G. C., 2005. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational medicine*, 55(3), 190-199.
- Diego-Mas, J.-A., Alcaide-Marzal, J., & Poveda-Bautista, R., 2017. Errors using observational methods for ergonomics assessment in real practice. *Human factors*, 59(8), 1173-1187.
- Diego-Mas, J.-A., Poveda-Bautista, R., & Garzon-Leal, D.-C., 2015. Influences on the use of observational methods by practitioners when identifying risk factors in physical work. *Ergonomics*, 58(10), 1660-1670.
- Felekoğlu, B., & Taşan, S. Ö., 2017. İş ile ilgili kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına yönelik ergonomik risk değerlendirme: Reaktif/proaktif bütünlük bir sistematik yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3).
- Fiğlalı, N., Cihan, A., Esen, H., Fiğlalı, A., Çeşmeci, D., Güllü, M. K., & Yılmaz, M. K., 2015. Image processing-aided working posture analysis: I-OWAS. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 384-394.
- Gómez-Galán, M., Callejón-Ferre, Á.-J., Pérez-Alonso, J., Díaz-Pérez, M., & Carrillo-Castrillo, J.-A., 2020. Musculoskeletal risks: RULA bibliometric review. *International journal of environmental research and public health*, 17(12), 4354.
- Gómez-Galán, M., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á.-J., & López-Martínez, J., 2017. Musculoskeletal disorders: OWAS review. *Industrial health*, 55(4), 314-337.
- Hignett, S., & McAtamney, L., 2000. Rapid entire body assessment (REBA). *Applied ergonomics*, 31(2), 201-205.
- Hita-Gutiérrez, M., Gómez-Galán, M., Díaz-Pérez, M., & Callejón-Ferre, Á.-J., 2020. An overview of REBA method applications in the world. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2635.
- Joshi, M., & Deshpande, V. (2022). Study of association between OWAS, REBA and RULA with perceived exertion rating for establishing applicability. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 23(3), 313-332.
- Karhu, O., Kansii, P., & Kuorinka, I., 1977. Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied ergonomics*, 8(4), 199-201.
- Kee, D., & Karwowski, W. (2007). A comparison of three observational techniques for assessing postural loads in industry. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 13(1), 3-14.
- Kee, D., 2020. An empirical comparison of OWAS, RULA and REBA based on self-reported discomfort. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(2), 285-295.
- Kee, D., 2022. Systematic comparison of OWAS, RULA, and REBA based on a literature review. *International journal of environmental research and public health*, 19(1), 595.
- Kong, Y.-K., Lee, S.-y., Lee, K.-S., & Kim, D.-M., 2018. Comparisons of ergonomic evaluation tools (ALLA, RULA, REBA and OWAS) for farm work. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 24(2), 218-223.
- Lins, C., Fudickar, S., & Hein, A., 2021. OWAS inter-rater reliability. *Applied ergonomics*, 93, 103357.
- Lee, I.-S., Jeong, M.-G., & Choe, G.-I. (2003). Comparison of observational posture evaluation methods based on perceived discomfort. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 22(1), 43-56.
- Marak, T. R., Bhagat, D., & Borah, S., 2020. Musculoskeletal disorders of garo women workers engaged in tea-plucking activity: An ergonomic analysis. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 24(2), 60.
- Maurer-Grubinger, C., Holzgreve, F., Fraeulin, L., Betz, W., Erbe, C., Brueggmann, D., Wanke, E. M., Nienhaus, A., Groneberg, D. A., & Ohlendorf, D., 2021. Combining ergonomic risk assessment (RULA) with inertial motion capture technology in dentistry—Using the benefits from two worlds. *Sensors*, 21(12), 4077.
- McAtamney, L., & Corlett, E. N., 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied ergonomics*, 24(2), 91-99.
- Micheletti Cremasco, M., Giustetto, A., Caffaro, F., Colantoni, A., Cavallo, E., & Grigolato, S., 2019. Risk assessment for musculoskeletal disorders in forestry: A comparison between RULA and REBA in the manual feeding of a wood-chipper. *International journal of environmental research and public health*, 16(5), 793.
- Mishra, S., & Sarkar, K., 2021. Work-related musculoskeletal disorders and associated risk factors among urban metropolitan hairdressers in India. *Journal of occupational health*, 63(1), e12200.
- Morrison, A. K., Kumar, S., Amin, A., Urban, M., Kleinman, B., & Urban, M. B., 2024. An Ergonomic Risk Assessment of Ophthalmology Residents Using the Rapid Entire Body Assessment (REBA) Scale. *Cureus*, 16(2).
- Namwongsa, S., Puntumetakul, R., Neubert, M. S., Chaiklieng, S., & Boucaut, R., 2018. Ergonomic risk assessment of smartphone users using the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) tool. *PloS one*, 13(8), e0203394.
- Norval, M., Zare, M., Brunet, R., Coutarel, F., & Roquelaure, Y., 2018. Operational leeway in work situations: do ergonomic risk assessment tools consider operational leeway for job analysis? *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*.
- Oliv, S., Gustafsson, E., Baloch, A. N., Hagberg, M., & Sandén, H., 2019. The Quick Exposure Check (QEC)—Inter-rater reliability in total score and individual items. *Applied ergonomics*, 76, 32-37.
- Özoğul, B., Çimen, B., & Kahya, E., 2018. Bir metal sanayi işletmesinde ergonomik risk analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 159-175.
- Sanchez-Lite, A., Garcia, M., Domingo, R., & Angel Sebastian, M. (2013). Novel ergonomic postural assessment method (NERPA) using product-process computer aided engineering for ergonomic workplace design. *PloS one*, 8(8), e72703.
- Sirzai, H., Dogu, B., Erdem, P., Yılmaz, F., & Kuran, B., 2015. Hastane Çalışanlarında İse Bağlı Kas İskelet Sistemi Hastalıkları: Üst Ekstremité Problemleri/Work-related musculoskeletal diseases in hospital workers: Upper extremity problems. *Şişli Etfal Hastanesi Tıp Bülteni*, 49(2), 135.
- Yaşar, M., & Saraçoğlu, T., 2021. Balıkesir ilinde tarım makinaları sanayi çalışanlarının iş güvenliği ve ergonomi algılarının değerlendirilmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 17(1), 1-13.
- Yaylı, D., & Çalışkan, E., 2019. Comparison of Ergonomic Risk Analysis Methods for Working Postures of Forest Nursery Workers. *European Journal of Forest Engineering*, 5(1), 18-24.
- Yazdanirad, S., Khoshakhlagh, A. H., Habibi, E., Zare, A., Zeinodini, M., & Dehghani, F., 2018. Comparing the effectiveness of three ergonomic risk assessment methods—RULA, LUBA, and NERPA—to predict the upper extremity musculoskeletal disorders. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 22(1), 17.



FUNCTIONAL YARN PRODUCTION CONTAINING NATURAL MATERIALS FOR MEDICAL TEXTILES

Celal DEMİRTAŞ¹, Demet YILMAZ^{1*}, Ebru ÖNEM²

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel University, Faculty of Pharmacy, Department of Basic Sciences of Pharmacy, Isparta, Türkiye

Keywords	Abstract
<i>Medical Textiles, Antibacterial Activity, Quince Seed, Thyme Oil, Functional Yarn, Ring Spun Yarn.</i>	In recent years, researchers have focused on the development of hygienic new products with less negative impact on the environment. For this reason, the use of natural/environmentally friendly materials is becoming more widespread and studies on these materials are increasing day by day. In this study, it was aimed to investigate the antibacterial activity of textile materials loaded with natural materials such as quince seed gel (QSG) and thyme oil, with a view to their use in medical textiles. This study focused on the application of QSG and thyme oil to spun yarns from staple fibers due to its advantages such as possibility to be used in yarn/fabric form, porous structure, permeability, flexibility etc. In the study, QSG and thyme oil dispersions were prepared and applied to 100% acrylic fibres during ring spinning production via an alternative application method. Various properties of the produced yarns were analysed. SEM images indicated that fibre surface was covered with QSG and thyme oil. Unlike QSG, the yarns loaded with thyme oil exhibited antibacterial activity property. The yarns produced were found to have tensile properties suitable for textile processing, although there was some reduction in strength and elongation at break. Based on the obtained results, it is believed that yarns containing natural materials may offer an alternative or complementary approach to treatment.

MEDİKAL TEKSTİLLER İÇİN DOĞAL MALZEME İÇERİKLİ FONKSİYONEL İPLİK ÜRETİMİ

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Medikal Tekstiller, Antibakteriyel Aktivite, Ayva Çekirdeği, Kekik Yağı, Fonksiyonel İplik, Ring İplik.</i>	Son yıllarda araştırmacılar, çevre üzerinde daha az olumsuz etkiye sahip hijyenik yeni ürünlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu nedenle doğal/çevre dostu malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmakta ve bu malzemeler üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada, ayva çekirdeği jeli (QSG) ve kekik yağı gibi doğal malzemelerle yüklü tekstil malzemelerinin antibakteriyel aktivitesinin tıbbi tekstillerde kullanımı açısından incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, iplik/kumaş formunda kullanılabilmesi, gözenekli yapısı, geçirgenliği, esnekliği gibi avantajları nedeniyle QSG ve kekik yağının kesikli liflerden eğrilmiş ipliklere uygulanmasına odaklanmıştır. İplik üretimi için QSG ve kekik yağı dispersiyonları hazırlanmış ve ring iplik üretimi sırasında %100 akrilik elyaflara alternatif bir uygulama yöntemi ile uygulanmıştır. Üretilen ipliklerin çeşitli özellikleri analiz edilmiştir. SEM görüntüleri, elyaf yüzeyinin QSG ve kekik yağı ile kaplandığını göstermiştir. QSG'nin aksine, kekik yağı yüklü ipliklerin antibakteriyel aktivite özelliği sergilediği belirlenmiştir. Üretilen ipliklerin, mukavemet ve kopma uzamasında bir miktar azalma olmasına rağmen, tekstil işlemeye uygun gerilme özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara dayanarak, doğal malzemeler içeren ipliklerin tedaviye alternatif veya tamamlayıcı bir yaklaşım sunabileceği düşünülmektedir.

Alıntı / Cite

Demirtaş, C., Yılmaz, D., Önem E., (2025). Functional Yarn Production Containing Natural Materials for Medical Textiles, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 13(1), 263-274.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
C. Demirtaş, 0000-0002-5143-0655	Başvuru Tarihi / Submission Date 05.07.2024
D. Yılmaz, 0000-0003-4450-5935	Revizyon Tarihi / Revision Date 17.01.2025
E. Önem, 0000-0002-7770-7958	Kabul Tarihi / Accepted Date 20.01.2025
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: demetyilmaz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1186

FUNCTIONAL YARN PRODUCTION CONTAINING NATURAL MATERIALS FOR MEDICAL TEXTILES

Celal DEMİRTAŞ¹, Demet YILMAZ^{1†}, Ebru ÖNEM²

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel University, Faculty of Pharmacy, Department of Basic Sciences of Pharmacy, Isparta, Türkiye

Highlights

- Investigation of quince seed gel (QSG) and thyme oil application to staple fibres and functional ring spun yarn production
- Evaluation of antibacterial activity of ring spun yarns containing quince seed gel (QSG) and thyme oil
- Evaluation of tensile properties of ring spun yarns containing quince seed gel (QSG) and thyme oil

Purpose and Scope

The aim of this study was to realize functional yarn production based on the application of natural materials such as quince seed gel (QSG) and thyme oil into the staple fibre bundle during ring spun yarn production and to investigate the antibacterial activity of produced ring spun yarns loaded with QSG and thyme oil, with a view to their use in medical textiles.

Design/methodology/approach

In the study, quince seed gel (QSG) and thyme oil dispersions were prepared. Prepared dispersions were applied into the staple fibre bundle by feeding in a controlled manner during spun yarn production and ring spun yarn production was realized. Yarn morphology and tensile properties of the produced yarns were analyzed. Antibacterial activity of the produced yarns was evaluated.

Findings

According to the scanning electron microscopy (SEM) images, it was observed that quince seed gel (QSG) and thyme oil covered the fibre surface. After the antibacterial activity tests, it was found that the yarns treated with thyme oil presented antibacterial activity (*S. aureus*), while the yarns loaded with quince seed gel did not show antibacterial activity due to the inability of the active substance to be sufficiently incorporated into the yarn structure. When the tensile properties of the yarns were examined, it was found that the surface structure of the fibres of the yarns and thus the fibre-fibre friction changed after the application of QSG and thyme oil, thus altering the strength and breaking elongation properties. However, the yarns were found to have sufficient tenacity and breaking elongation values for fabric production.

Practical implications

Although antibacterial activity could not be determined due to the insufficiency of the active ingredient in the quince seed gel (QSG) application, it is considered that more detailed trials should be carried out to make a more accurate assessment. However, various tests and analyses should be carried out to determine the potential of the natural materials loaded yarns as biomaterials, especially for wound healing.

Social Implications

Increasing such studies and expanding their use will also be effective in meeting the demand for natural and biocompatible medical textile products.

Originality

When the studies in the literature were examined regarding the use of quince seed gel (QSG) and thyme oil, it was observed that the studies focused on electrospinning and microencapsulation methods of these materials. There is no similar study applying quince seed gel (QSG) and thyme oil to the yarns spun from staple fibres and investigating the yarn properties, particularly antibacterial properties, with regard to their use in the medical field. Therefore, this study is the first in terms of the production of acrylic ring yarn containing QSG and thyme oil and the examination of the antibacterial properties of the yarns.

[†] Corresponding author: demetyilmaz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1186

1. Introduction

Traditional and non-traditional plants are an integral part of 5000 years of medical history. The use of plants and their extracts in the medical field is generally focused on the treatment of wounds for wound healing purposes. Studies conducted for wound healing purposes date back to very ancient times and plants were first used for this purpose. Maver *et al.* (2015) stated that herbal medicines are more preferred in wound treatment, as they provide a suitable environment to support the natural wound healing mechanism. Today, herbal solutions continue to play an important role in primary healthcare in 80% of developed and developing countries. One of the reasons for this situation is that the use of pharmaceutical drugs causes undesirable side effects, even if they are minimal. The problems caused by pharmaceutical drugs have therefore led scientists to look for alternative methods. In recent years, intensive research has been conducted on wound healing using medicinal plants (Gergeroğlu, 2017).

Nowadays, plant extracts and some of their constituents are used in the medical field as well as in various products such as cosmetics, household cleaning products and air fresheners, hygiene products, agriculture and food. Plant extracts are also used in aromatherapy and other medical applications. Many plants and their extracts have been traditionally used since ancient times due to their great potential for the management and treatment of wounds. With the development of synthetic drugs, the use of plant extracts for medical therapeutic purposes has decreased compared to their use in cosmetics and food (El-Molla *et al.*, 2015). However, as a result of consumers' concerns about the toxicity of synthetic drugs, the demand for safe and natural alternative drugs has increased. Studies on the evaluation of plant extracts have become active in recent years, especially in order to find possible alternative drugs with antibacterial and antioxidant properties of plant extracts.

In addition to the unique properties of herbal medicines, with the rapid growth of the world's population and environmental pollution, researchers in recent years have focused on developing new hygienic products with minimal negative impact on the environment. For this reason, the use of natural and environmentally friendly materials is becoming more widespread and studies on these materials are increasing day by day. In particular, biocompatibility, natural and environmentally friendly structure is desirable characteristics of materials to be used in the medical field.

In this study, it was aimed to investigate the antibacterial activity of textile materials containing natural materials such as quince seed gel (QSG) and thyme oil, with a view to their use in medical textiles.

Quince (*Cydonia oblonga* Miller) is the fruit of the Rosaceae family, which sheds its leaves in winter and has natural hard, acidic and suffocating properties. Quince is a tree species of the Rosaceae family, native to Anatolia, Turkestan and northwestern Iran (Ercan and Özkarakas, 2005, Hemmati *et al.*, 2012). In addition to its edible use as juice, jam and marmalade for nutritional purposes, it is also used in the industrial field due to its pectin and tannin content (Ercan and Özkarakas, 2005). The gel obtained by soaking quince seeds in water is called quince seed gel (QSG). QSG has been used as a natural moisturiser in the food, cosmetic, pharmaceutical and textile sectors, and recently quince seed powder and extract have been used in cosmetic products. Quince seed has been the subject of research in recent years due to its easy availability, low cost, location in the waste part of the fruit, easy gel production, adhesive properties and high viscosity (Sharma *et al.*, 2011; Jouki *et al.*, 2013; Kafkas *et al.*, 2018).

There are approximately 10 seeds in one fruit. The seeds are brown in colour, about 7 mm long and 5 mm wide (Jouki *et al.*, 2013). These kernels contain hydrocolloids. When soaked in water, a mucilage or gel can be formed. A study reported that QSG contains 45.6% glucose; 27.1% uronic acid; 10.7% xylose; 7.4% fructose and 3.2% galactose (Hakala *et al.*, 2014; Hosseinzadeh and Mohammadi, 2015).

Essential thyme oil obtained by distillation of oregano/thyme plant is used in many fields. There are many studies showing that thyme oil has analgesic, anti-inflammatory, anticarcinogenic, antibacterial, antifungal, wound healing and cell proliferation accelerator effects (Marino *vd.*, 1999; Dorman *ve* Deans, 2000; Koparal *ve* Zeytinoglu, 2003; Canbek *et al.*, 2008; Önal, 2010;).

Natural/plant-based wound healing agents used worldwide in traditional medicine for skin wound treatment have been investigated in detail. Studies on the use of quince seed gel (QSG) and thyme oil as wound healing agents were examined. In their studies, Oran *et al.* (2022) investigated the design and production of a new biocompatible scaffold with fibroblast cell proliferation, based on the promising biological materials of bacterial cellulose (BC) and QSG. Özdil (2022) aimed to obtain a hybrid film containing nanomaterials in a green synthesis perspective using natural materials, and also aimed to investigate the usability of green synthesized hybrid materials as biosensor materials in the detection of heavy metal ions exposed from many places such as tap

water. In their studies, Darvishi *et al.* (2021) used zinc oxide (ZnO) nanoparticles synthesized with quince seed mucilage (as a new biopolymer)/chitosan+PEO in the preparation of nanobandages with antibacterial activity. In the study, nanofibers were obtained by electrospinning using a 20/80% quince seed mucilage/chitosan+PEO solution mixture. As a result, it was determined that the nanofiber bandage containing ZnO nanoparticles had a significant treatment effect on second-degree burn wounds, the burn healed faster, and no infection was observed in the wound. Jafari *et al.* (2021) prepared aqueous solutions containing different amounts of polyvinyl alcohol (PVA) and QSG. They examined the morphological properties of wound dressings produced by electrostatic spinning. In the study, it was also determined that the obtained structures showed significant biocompatibility against fibroblast cells, and fibroblast cells did not adhere properly to the sample after one day of culturing. In the studies of Allafchian *et al.* (2020), the polymer consisting of the combination of QSG and polycaprolactone (PCL) was used to obtain hybrid electrospun scaffolds. The study conducted by Şimşek (2020), the gel (mucilage) obtained from the seeds of quinces (*Cydonia oblonga* Miller) collected from Çanakkale was molded and lyophilized to obtain a three-dimensional porous form. After the analysis, it was stated that the obtained structures could have a possible use in regenerative medicine and tissue engineering applications. In the study conducted by Allafchian *et al.* (2018), it was determined that cell viability was higher in hybrid nanofiber scaffolds consisting of PCL and QSG compared to pure PCL scaffolds, and that the hybrid structure provided a suitable environment for the cells with its small-diameter pores, hydrophilic and non-toxic properties. Ghafourian *et al.* (2015) studied the effect of QSG on the proliferation of human fibroblast cells and stated that QSG may contain growth factors since it may stimulate fibroblast migration to the wound area. Atalay (2013) studied the effect of wheat germ oil and QSG on cutaneous wound healing in mice. It was determined that, unlike wheat oil, the wound closure rate in mice treated with QSG was no different from the control group. Janbaz *et al.* (2013) studied the effect of QSG on the digestive system and respiratory system muscles by applying quince gel to live tissue pieces of various animals. They stated that quince gel can be used in respiratory diseases such as asthma or digestive system disorders such as diarrhea and constipation. Hemmati *et al.* (2012) investigated the healing effects of QSG on T-2 toxin-induced skin lesions in rabbits. Hemmati and Mohammadian (2000) compared wound healing rates in rabbits that received no treatment, rabbits that received Eucerin cream containing 1% phenithion, and rabbits that received Eucerin cream containing 5%, 10%, and 15% QSG. The study found that rabbits treated with Eucerin with 10% QSG healed faster.

In literature, there are also studies the usage of QSG for non-medical applications. In their study, Moghaddas *et al.* (2020) investigated the use of QSG as a stabilizing agent based on the green synthesis method in the preparation of pure zinc oxide nanoparticles to be used for the degradation of photocatalytic methylene blue. Xie *et al.* (2018) studied the synthesis of a material containing Chinese quince seed mucilage and poly (N, N-diethylacryl amide-co-methacrylic acid) via free radical polymerization for pH-sensitive polymer and controlled drug release.

When the studies on thyme oil were examined, Zaharia *et al.* (2020) prepared emulsions by changing the concentrations of propolis (2–4% w/v) and thyme oil (2–4% v/v) and impregnated them on cotton fabrics. In the study, antibacterial activity was determined. Karagönlü *et al.* (2018) aimed to develop functional textile materials with antimicrobial properties and encapsulated thyme oil (*Thymus vulgaris* L.) by complex coacervation method using gelatin (GE) and gum arabic (GA) as wall material. No crosslinking agent was used to eliminate toxic effects during the encapsulation process. These capsules were applied to a nonwoven fabric and the effects of various processing parameters, including the amount of oil and wall material concentration, on encapsulation efficiency, particle size distribution and capsule loading were investigated. The antimicrobial activities of the capsule-applied fabrics were investigated and it was determined that both microcapsules and fabrics with different microcapsule concentrations showed antimicrobial activity against *E. coli*, *S. aureus* and *C. albicans* microorganisms. Scacchetti *et al.* (2017) investigated the production of cotton plain woven fabrics with thermoregulation and antimicrobial activity properties against *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *T. rubrum* and *C. albicans* by a simple finishing method. For this purpose, PCM microcapsules and monochlorotriazinyl- β -cyclodextrin were applied in the same bath and the obtained materials were impregnated with thyme oil as an active substance. At the end of the study, it was stated that comfortable cotton materials developed with antimicrobial properties could be used in various areas of health and biomedical applications in the future. Jouki *et al.* (2014) investigated the physical, thermal, antibacterial, antioxidant and barrier properties of films containing various proportions of thyme oil and QSG. Walentowska and Foksowicz-Flaczyk (2013) aimed to increase the resistance of lignocellulosic textiles to bacteria and mold by using a plant-derived biocide. In the study, the biocide thyme essential oil was used. The antimicrobial activity of thyme oil applied to linen-cotton blended and linen fabrics was evaluated by determining the bacterial growth, mold degree and their effects on fabric strength. It was determined that thyme essential oil applied to linen-cotton blended fabric as 8% concentration in methanol showed very high antibacterial and antifungal activity.

When evaluating the literature studies in general, it is observed that they focus on using natural materials such as thyme oil by encapsulation or electrostatic fibre attraction. The aim of this study was to realize functional yarn production based on the application of natural materials such as quince seed gel (QSG) and thyme oil into the staple fibre bundle during ring spun yarn production and to investigate the antibacterial activity of produced ring spun yarns loaded with QSG and thyme oil, with a view to their use in medical textiles. In terms of use in both yarn and fabric production, the yarn form was preferred. On the other hand, ring spun yarn production method was preferred for the yarn production because of its unique properties of spun yarns such as porous structure, permeability, flexibility and durability. For the application, an alternative application method was used. This method was used for the production of functional yarns with conductive and thermoregulation property in our previous studies. The method is based on integrating the materials for conductivity, thermoregulation, antibacterial activity etc. into the open fibre bundle before yarn twisting during the ring spinning process and hence trapping the material in the twisted yarn structure (Yılmaz et al., 2023; Kayabaşı et al., 2022; Yılmaz et al., 2022). In present study, QSG and thyme oil prepared at a certain concentration were applied to acrylic staple fibres and ring spun yarn production was carried out. In reviewing the literature, there is no similar study applying QSG and thyme oil to yarns spun from staple fibres and investigating the yarn properties, particularly antibacterial properties, with regard to their use in the medical field. Therefore, this study is the first to produce acrylic ring yarn containing QSG and thyme oil and to investigate the antimicrobial properties of the yarn.

2. Material and Method

2.1. Material

Quinces were supplied from Isparta (Turkey). In the study, commercial thyme oil (0.86 g/ml) was obtained and used in the spinning process.

2.2. Method

2.2.1. Preparation of Quince Seed Gel (QSG)

Quinces were cut with a knife and their seeds were removed. The seeds were weighed on a precision scale. 2.6 g of seeds and 50 ml of water were put into the prepared bottle shaker. It was mixed at 150 rpm for 24 hours at room temperature (Figures 1a, b and c). The dispersion consisting of the mixture of quince seeds and pure water removed from the shaker and then filtered. It was observed that gelation occurred after the mixing process and white consistency dispersion was obtained. In the study, a second sample was prepared as 5.3 g of quince seeds and 50 ml of pure water to increase the usage rate of quince seeds. It was determined that gelation was more intense as expected when the number of seeds increased in the same amount of water. However, yarn spinning could not be performed at the mentioned concentration. Therefore, quince seed gel (QSG) dispersion containing 50 ml and 2.6 g of seeds was used in the yarn spinning process in the study.

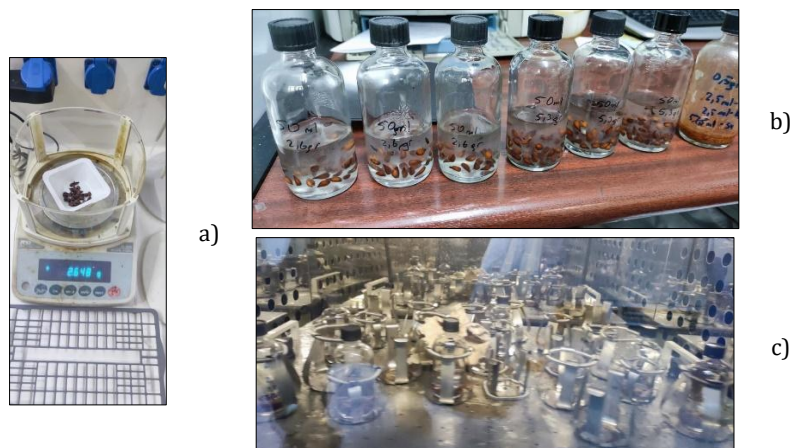


Figure 1. a, b) Preparation of quince seed gel (QSG), c) mixing in a shaker

2.2.2. Yarn Production

This study aimed to produce ring spun yarns loaded with natural materials such as quince seed gel (QSG) and thyme oil. Since spun yarns have properties such as porous structure, permeability, flexibility and strength, it was aimed to realize the application of QSG and thyme oil to the yarns spun from staple fibres. The study

employed the alternative application method developed in previous studies for the application of QSG and thyme oil into staple fibres to produce a functional yarn. An alternative application method was defined in our previous studies in detailed (Yılmaz *et al.*, 2023; Kayabaşı *et al.*, 2022; Yılmaz *et al.*, 2022; Özen *et al.*, 2022). The method provides the application of the dispersions containing various materials depending on desired functionality such as carbon powder, graphene, microcapsules to staple textile fibres in the main drafting zone of the ring spinning machine (Yılmaz *et al.*, 2023; Kayabaşı *et al.*, 2022; Yılmaz *et al.*, 2022; Özen *et al.*, 2022). The method relies on the application of the prepared dispersion opened fiber bundle during drafting process before the spun yarn production. The conventional ring spinning system was chosen for the application and spun yarn production because of its unique properties, such as being a widely used spinning method in yarn production and having no limitations in terms of fibre type and yarn count, yarn strength and other yarn properties. The prepared QSG and thyme oil dispersions were fed to the open fibre bundle during the drafting process of the ring spinning in a controlled manner (80 ml/h) using a specially designed feeding apparatus. The yarn samples obtained were wound on the cops as in ring spinning (Demirtaş, 2023).

2.3. Test and Analysis

In the study, the morphology of the yarn samples was analysed by Scanning Electron Microscopy (SEM), antibacterial activity property was investigated by AATCC-147 antibacterial activity test method and AATCC-100 test method. In order to determine the antibacterial activity property, knitted fabric samples were prepared from the ring spun yarns on a sock knitting machine.

AATCC-147 test method is a qualitative method that can be applied more easily and quickly than other test methods used for the determination of antimicrobial activity of textile materials. In this test method, *S. aureus* bacterial culture was used. According to the method, *S. aureus* bacterial culture which was incubated overnight in liquid medium was prepared the next day at 0.5 McFarland turbidity (108 cfu/ml) and 100 µl of 106 cfu/ml bacterial culture was spread on Müller-Hinton agar medium with the help of drigalski spatula. The media were allowed to dry at room temperature for a while and the fabric samples, which were previously sterilised at 121 °C at 1.5 atm pressure for 15 minutes, were placed on the media under sterile conditions with the help of pliers. The media on which the quince seed gel (QSG) and thyme oil applied samples were placed were incubated at 37 °C for 18-24 hours. At the end of incubation, the zone diameter formed around the samples on the medium was observed.

The AATCC-147 method is a qualitative method to determine the rate of antibacterial activity on textile surfaces, and the AATCC-100 test method was used to quantitatively determine the efficiency of the yarns. In this standard, samples were cut into squares of the desired size with an approximate area of 1-4 cm² and samples of the same size were sterilised. An untreated negative control was also used with the test sample. The sample fabrics were soaked with 1 ml of a solution containing bacteria at a density of 106 cfu/ml, transferred to screw-cap bottles and incubated at 37 °C for 18-24 hours. At the end of the incubation period, the fabric samples removed from the bottles were transferred to the liquid medium (Mueller-Hinton liquid medium) and thoroughly mixed by vortexing, allowing the colonised bacteria on the surface of the fabric sample to migrate into the medium. To enumerate the living organisms in this medium, serial dilutions (1/1, 1/10, 1/100, 1/1000) were prepared and inoculated on Mueller-Hinton agar medium. All petri dishes were incubated at 37 °C for 24 h. At the end of incubation, the amount of growth in each dilution was calculated by multiplying the number of growing colonies by the dilution ratio. The antimicrobial activity of the samples treated with QSG and thyme oil was determined quantitatively according to the AATCC-100 test standard, using the formula below.

$$R (\%) = 100 (B-A)/B$$

In this equation;

R = Proportional decrease,

B = Number of organisms in the solution that came into contact with the sample at the beginning,

A = Number of organisms in the neutralization solution that came into contact with the sample.

The magnitude of the R values obtained with this method is scaled as antimicrobial activity;

if $R \geq 99.99$, it is "excellent",

if $99 < R < 99.99$, it is "good",

if $0 < R < 99$, it is "acceptable".

The tenacity and elongation properties of the yarns were tested on MesdanLab Strength Tester test devices. In the tenacity and elongation properties, the test length was 500 mm and the test speed was 5000 mm/min. At least, 10 tests were performed for each sample (ASTM D2256).

3. Experimental Results

3.1. Scanning Electron Microscope (SEM) Images

SEM images of ring spun yarns loaded with and without quince seed gel (QSG) and thyme oil are given in Figures 2-4. When the images were examined, it was seen that the fibers followed a helical path and they were twisted within the yarn structure due to the real twist given by the ring-traveler of ring spinning system during the yarn production. In terms of yarn structure, it was observed that there was no significant difference between unloaded reference and QSG and thyme oil loaded ring spun yarns. No significant changes in yarn character was observed after the application with an alternative application method, consistent with our previous studies aimed at producing yarns with conductive and thermoregulatory functional properties (Özen et al., 2022; Yılmaz et al., 2022). In unloaded reference ring spun yarns, a striped structure, which is a unique feature of acrylic fibers, was observed. However, in the loaded yarns, it was determined that QSG and thyme oil covered the surface of the fibers. The fibres appeared to be coated like a film with QSG and thyme oil. Almost all fibres have a similar film-like appearance.

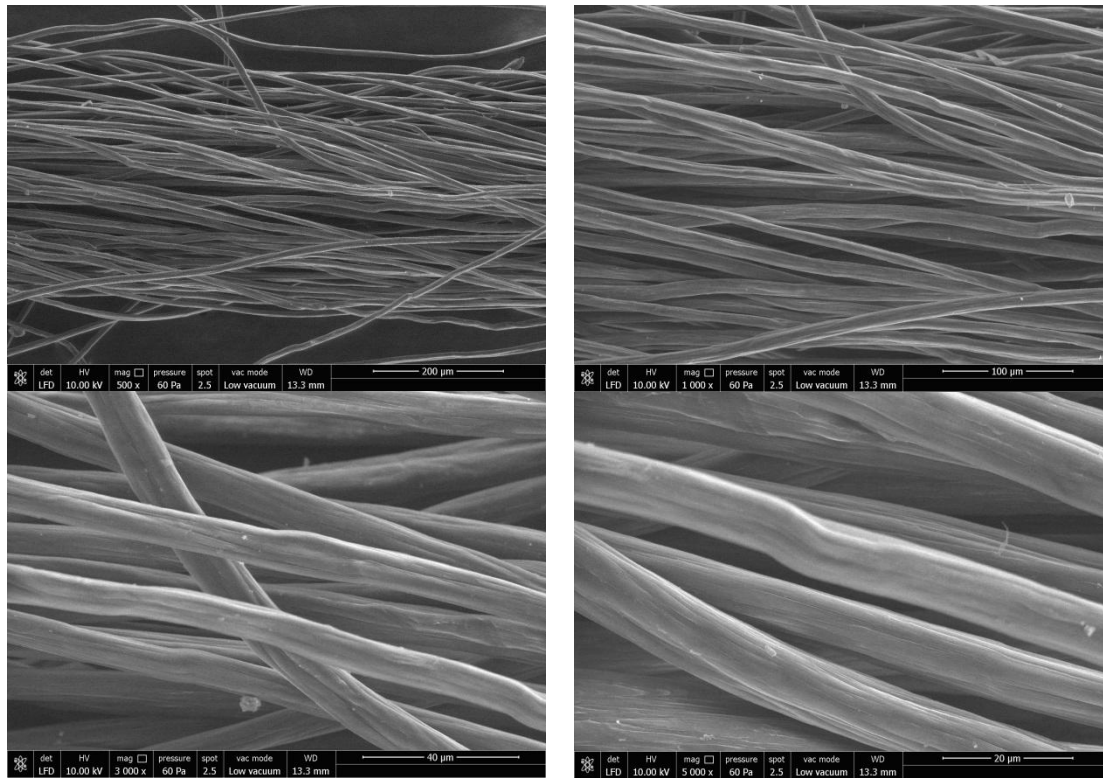


Figure 2. SEM images of reference unloaded acrylic ring yarns

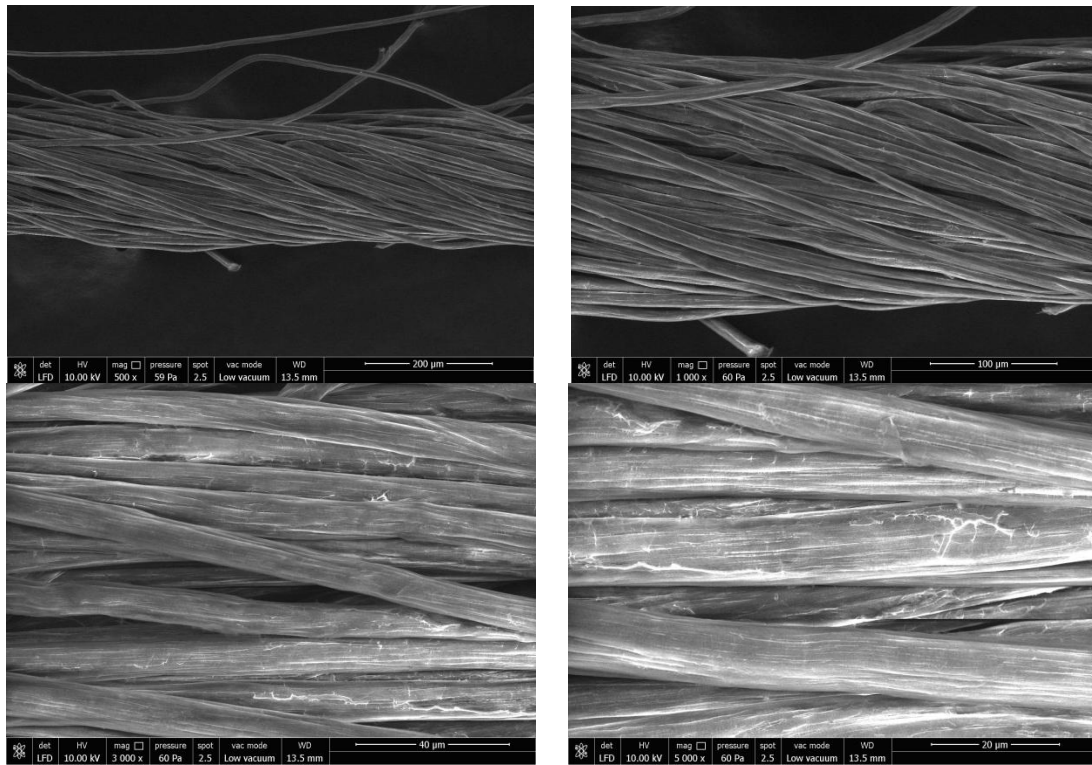


Figure 3. SEM images of acrylic ring yarns loaded with quince seed gel

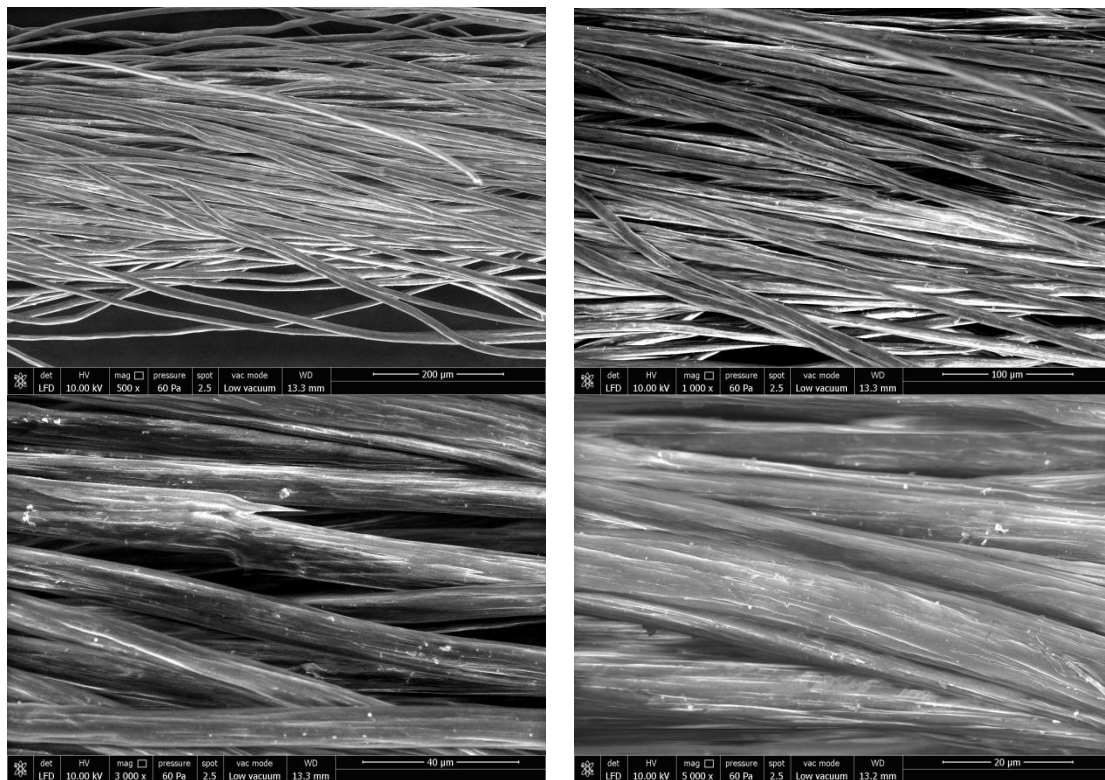


Figure 4. SEM images of acrylic ring yarns loaded with thyme oil

3.2. Antibacterial Activity

The antibacterial activation properties of the fabrics knitted from ring spun yarns loaded with quince seed gel (QSG) and thyme oil were investigated by AATCC-147 antibacterial activity test method and the AATCC-100 test method. No antibacterial activity was detected in the knitted fabrics produced from QSG loaded ring spun yarns. On the other hand, the inhibition results shown in Figure 5 were determined qualitatively at the end of the incubation in solid media on which the fabrics treated with thyme oil were placed and on which a liquid bacterial culture was spread. The experiments were continued using the AATCC-100 method for the quantitative

determination of antibacterial activity.

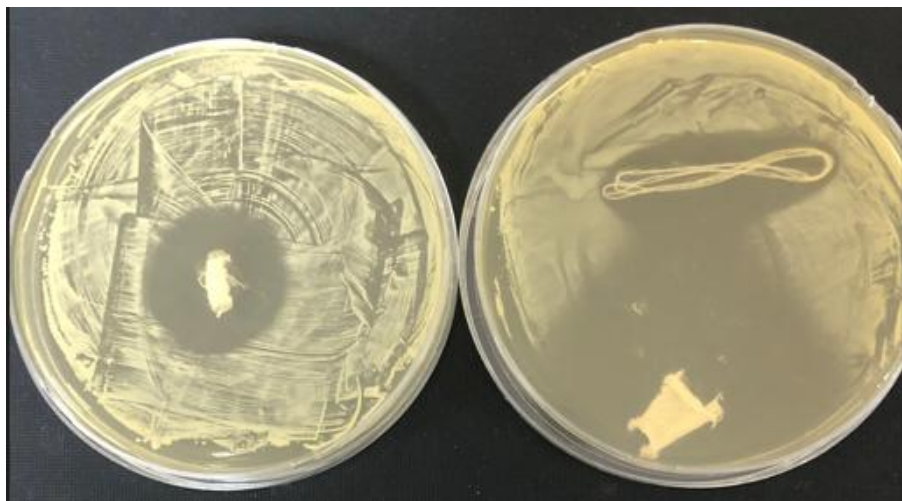


Figure 5. Inhibition zones formed around the thyme oil loaded ring spun yarn and knitted fabric obtained from these yarns

According to the results of AATCC-100 Test Method, at the end of 24 hours incubation with *S. aureus*, R (%) (proportional reduction) value of knitted fabric samples treated with thyme oil was determined between $99 < R < 99.99$ and 'good' activity result was obtained (Figure 6). Therefore, antibacterial activity was determined in thyme oil applied samples. This result is consistent with the findings in the literature (Zaharia et al., 2020; Karagönlü et al., 2018; Scacchetti et al., 2017; Walentowska and Foksowicz-Flaczyk, 2013). In the study, Zaharia et al. (2020) stated that essential thyme oil is one of the most powerful antiseptic essential oils due to the essential phenolic components in its structure. In quince seed gel (QSG), a reason might be that the active ingredients required for antibacterial activity were not sufficient in the dispersion.

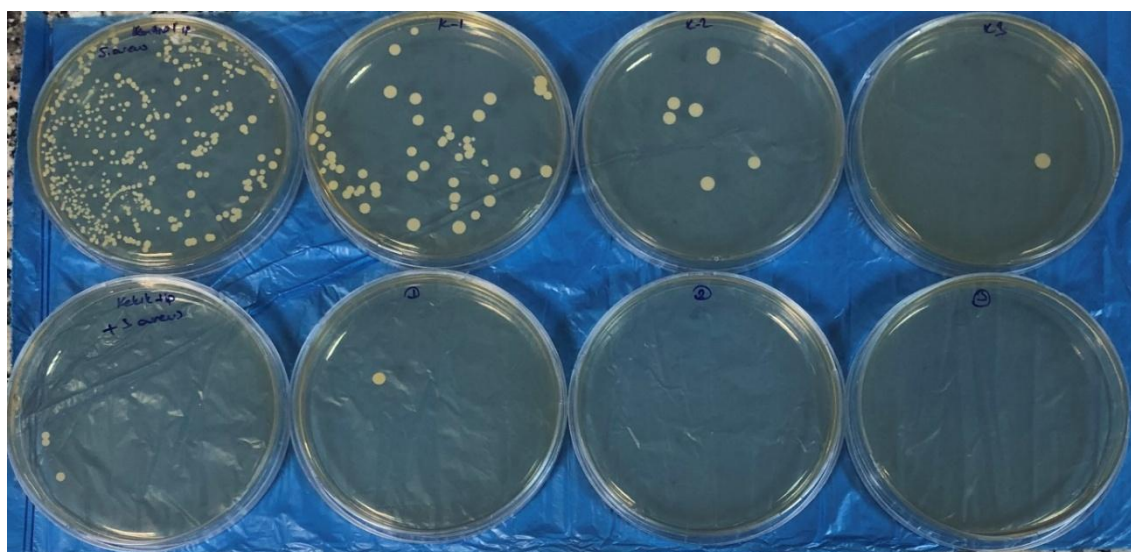


Figure 6. Colonies observed by smearing at different dilutions after 24 hours of incubation

3.3. Tensile Properties of The Yarns

The changes in yarn tensile properties of acrylic ring spun yarns loaded with natural materials such as quince seed gel (QSG) and thyme oil were investigated and compared with unloaded reference ring spun yarns. The results obtained are given in Table 1. When the yarn tenacity results were evaluated, it was determined that the unloaded ring spun yarns had the highest values and the yarns loaded with QSG had the lowest ones. The decrease in the tenacity values was 14.8% for the yarns loaded with QSG and 7.6% for the yarns with thyme oil. Therefore, a tendency to decrease in yarn tenacity values was observed in the yarns loaded with both natural materials, and the lowest decrease was found in the yarns with thyme oil. As known, the breaking behaviour of spun yarns can be explained by the sliding mechanism of the fibres and the strength of the fibres themselves. Therefore, the changes in the tenacity values of the loaded ring spun yarns could be explained by the fact that the natural materials might change the surface structure of the fibres and thus the fibre-fibre friction after the application. In particular, in the SEM images of the QSG loaded yarns, it was observed that the fibres had a

smoother structure compared to the thyme oil applied yarns. Therefore, it is thought that the fibre-fibre friction between the fibres of the QSG applied yarns was adversely affected, the fibres could not adhere to each other and therefore the yarn tenacity values decreased more. It was observed that the fibres had a rough structure in the yarns with thyme oil and a lower decrease in the tenacity values occurred due to this structure. The tensile behavior of spun yarns is a primarily function of fiber properties and yarn structure (Soltani and Johari, 2012). The yarn tensile properties are also affected by the frictional fiber properties (Sinoimeri, 2009). Friction is important in cases such as needle punching process, carding and spinning of yarns, wool felting, abrasion, and wear of cloth (Soltani and Johari, 2012). The phenomenon of friction results from the interaction between two contacting surfaces. The frictional behaviour of the two surfaces will be influenced by factors that affect this interaction system either individually or collectively (Alirezazadeh *et al.*, 2018). In our previous study, the application of nanocapsules to the cotton ring spun yarn structure increased the yarn tenacity values. This finding was explained by the increment of fiber-to-fiber friction resulting from the presence of nanoparticles on the fiber surface (Alay Aksoy *et al.*, 2024). However, in this study it is assumed that the QSG and thyme oil application had a negative effect on the friction between the fibres and therefore reduces the strength of the yarn.

Table 1. Yarn tenacity and breaking elongation results of yarn samples

Yarn Type	Tenacity (RKM)	Breaking Elongation (%)
Reference	13.922	9.468
Quince seed gel	11.856	7.692
Thyme oil	12.865	9.048

The trend in the breaking elongation results of the ring spun yarns was similar to the yarn tenacity results. The lowest breaking elongation was determined in the yarns with quince seed gel (QSG) while the highest one was determined in the yarns loaded with thyme oil. Compared to the unloaded reference yarns, the breaking elongation values decreased by 18.8% in the yarns loaded with QSG and 4.4% in the yarns with thyme oil. Particularly, it was observed that the yarns loaded QSG had a hard hold after application. It was thought that this case negatively affected the breaking elongation of the yarns. Although the tenacity and breaking elongation values of the yarns decreased to a certain extent after application, fabric production by knitting method was successfully carried out from the yarns. Therefore, the tensile properties of the yarns are comparable with the reference yarns and sufficient for fabric production (>10 cN/tex).

4. Result and Discussion

Present study aimed to investigate the possibility the application of natural materials such as quince seed gel and thyme oil to the fibre bundle during spun yarn production and to analyse the antibacterial activity functional property for an alternative or complementary approach to wound treatment. In the study, quince seeds were kept in the water for a certain period of time and quince seed gel (QSG) was obtained. Commercially available thyme oil was used. The prepared QSG and thyme oil dispersions were fed to the open fibre bundle during the ring spinning process in a controlled manner (80 ml/h) by means of a specially designed feeding apparatus. After ring spun yarn production, morphology, tenacity, breaking elongation and antibacterial activity of the yarns were analysed. According to Scanning Electron Microscopy (SEM) images, it was observed that QSG and thyme oil covered the fibre surface. Antibacterial activity tests indicated that the yarns treated with thyme oil showed antibacterial activity (*S. aureus*), while the yarns treated with QSG did not show antibacterial activity due to the inability of the active substance to be sufficiently incorporated into the yarn structure. As to tensile properties of the yarns, it was determined that surface structure of the fibres in the yarn structure and thus the fibre-fibre friction changed after the application of QSG and thyme oil, thus changing the tenacity and elongation at break properties. It was observed that the yarn tenacity and breaking elongation values decreased. The reduction in yarn tenacity was about 14.8% for the yarns loaded with QSG and 7.6% for the yarns with thyme oil. On the other hand, yarn breaking elongation decreased 18.8% for the yarns loaded with QSG and 4.4% for the yarns with thyme oil. However, it was determined that the yarns had sufficient yarn tenacity and breaking elongation values for fabric production such as weaving and knitting and were comparable to yarns without any natural materials.

In line with the findings obtained, different natural materials such as QSG and thyme oil were successfully applied to acrylic fibres by alternative application method and ring yarn production was carried out. Based on the obtained results, it is believed that yarns containing natural materials may offer an alternative or complementary approach to treatment. Although the antibacterial activity could not be determined due to the insufficiency of the active ingredient of the quince seed, it is thought that more detailed trials should be carried

out in order to make a more precise evaluation. However, different tests and analyses should be performed to determine the potential of yarns containing natural materials as biomaterials, especially for wound healing.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Alay Aksoy, S., Yilmaz, D., Maleki, H., Semnani Rahbar, R., 2024. Fabrication and characterization of nanoencapsulated PCM-doped cotton/PAN nanofiber based composite yarns for thermoregulation. *Journal of Energy Storage*, 101 (113849), 1-16.
- Alirezazadeh, A., Zarrebini, M., Ghane, M., Soltani, P., 2018. Fiber-on-fiber friction measurement using hanging fiber method. *The Journal of The Textile Institute*, 109(5), 636-646.
- Allafchian, A., Jalali, S. A. H., Mousavi, S. E., Hosseini, S. S., 2020. Preparation of cell culture scaffolds using polycaprolactone/quince seed mucilage. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 155, 1270-1276.
- Allafchian, A. R., Jalali, S. A. H., Mousavi, S. E., 2018. Biocompatible biodegradable polycaprolactone/basil seed mucilage scaffold for cell culture. *IET Nanobiotechnology*, 12 (8), 1108-1113.
- Atalay, C., 2013. Assessment of the effects of quince seed mucilage and wheat germ oil on wound healing in rats, Master Thesis, Marmara University, Institute of Health Sciences, İstanbul, Turkey.
- Canbek, M., Uyanoglu, M., Bayramoglu, G., Senturk, H., Erkasap, N., Koken, T., Uslu, S., Demirustu, C., Aral, E., Baser, K. H. C., 2008. Effects of carvacrol on defets of ischemia-reperfusion in the liver. *Phytomedicine*, 15 (6-7), 447-452.
- Darvishi, E., Kahrizi, D., Arkan, E., Hosseinabadi, S., Nematpour, N., 2021. Preparation of bio-nano bandage from quince seed mucilage/ZnO nanoparticles and its application for the treatment of burn. *Journal of Molecular Liquids*, 339, 116598.
- Demirtaş, C., 2023. Functional Yarn Production Containing Natural Materials For Medical Textiles, Master Thesis, Suleyman Demirel University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Isparta, Turkey.
- Dorman, H. J., Deans, S. G., 2000. Antimicrobial agents from plants: antibacterial activity of plant volatile oils, *Journal of Applied Microbiology*, 88 (2), 308-16.
- El-Molla, M. M., El-Ghorab, A. H., El-Massry, K. F., 2015. Preparation and characteristics of eco-friendly essential oils and its utilization for finishing cotton fabrics. *International Journal of Science and Research*, 6(11), 4-13.
- Ercan, N., Özkarakaş, Ğ., 2005. Evaluation and adaptation of some quince (*Cydonia Vulgaris Pers.*) collected from aegean region In Turkey. *AARI*, 15 (2), 27 - 42.
- Gergeroglu, H., 2017. Production of antibacterial nano-fibers and wound-healing dressing containing eco-friendly and natural compounds, Master Thesis, Eskişehir Osmangazi University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Nanoscience and Nanotechnology, Eskişehir, Turkey.
- Ghafourian, M., Tamri, P., Hemmati, A., 2015. Enhancement of Human Skin Fibroblasts Proliferation as a Result of Treating With Quince Seed Mucilage. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 10 (1), 10-13.
- Jafari, M., Baniyadi, H., Rezvanpour, A., Lotfi, M., 2021. Fabrication and characterisation of a wound dressing composed of polyvinyl alcohol and quince seed mucilage. *Journal of Wound Care*, 30 (Sup9a), XIII-XIIIx.
- Janbaz, K. H., Shabbir, A., Mehmood, M. H., Gilani, A. H. 2013. Insight into mechanism underlying the medicinal use of *Cydonia oblonga* in gut and airways disorders. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 23 (1), 330-336.
- Jouki, M., Yazdi, F. T., Mortazavi, S. A., Koocheki, A., 2014. Quince seed mucilage films incorporated with oregano essential oil: Physical, thermal, barrier, antioxidant and antibacterial properties. *Food Hydrocolloids*, 36, 9-19.
- Jouki, M., Yazdi, F.T., Mortazavi, S.A., Koocheki, A., 2013. Physical, barrier and antioxidant properties of a novel plasticized edible film from quince seed mucilage, *International Journal of Biological Macromolecules*, 62, 500-507.
- Hakala, T. J., Saikko, V., Arola, S., Ahlroos, T., Helle, A., Kuosmanen, P., Laaksonen, P., 2014. Structural characterization and tribological evaluation of quince seed mucilage. *Tribology International*, 77, 24-31.
- Hemmati, Ali A., Mohammadian, F., 2000. An Investigation into the effects of mucilage of quince seeds on wound healing in rabbit, *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 7 (4), 41-46.
- Hemmati, A. A., Kalantari, H., Jalali, A., Rezai, S., Zadeh, H. H., 2012. Healing effect of quince seed mucilage on T-2 toxin-induced dermal toxicity in rabbit. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 64 (3), 181-6.
- Hosseinzadeh, H., Mohammadi, S., 2015. Quince seed mucilage magnetic nanocomposites as novel bioadsorbents for efficient removal of cationic dyes from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 134, 213-221.
- Kafkas, S., Imrak, B., Kafkas, N. E., Sarier, A., Kuden, A., 2018. Quince (*Cydonia oblonga Mill.*) Breeding. In *Advances in Plant Breeding Strategies: Fruits*, 277-304.
- Karagonlu, S., Başal, G., Ozyıldız, F., Uzel, A., 2018. Preparation of thyme oil loaded microcapsules for textile applications. *International Journal of New Technology and Research*, 4 (3), 263122.
- Kayabaşı, G., Özen, Ö., Yilmaz, D., 2022. A novel yarn spinning method for fabricating conductive and nanofiber-coated hybrid yarns. *Journal of Industrial Textiles*, 51 (6), 953-976.
- Koparal, A.T., Zeytinoglu, M., 2003. Effects of carvacrol on a human nonsmall cell lung cancer (NSCLC) cell line. *Cytotechnology*, 43 (1-3), 149- 154.
- Marino M., Bersani, C., Comi, G., 1999. Antimicrobial activity of the essential oils of *Thymus vulgaris L.* measured using a bioimpedometric method. *Journal of Food Protection*, 62, 1017-23.
- Maver, T., Maver, U., Stana Kleinschek, K., Smrke, D.M., Kreft, S., 2015. A review of herbal medicines in wound healing. *International Journal of Dermatology*, 54 (7), 740-751.
- Moghaddas, S. M. T. H., Elahi, B., Javanbakht, V., 2020. Biosynthesis of pure zinc oxide nanoparticles using Quince seed mucilage for photocatalytic dye degradation, *Journal of Alloys and Compounds*, 821, 153519.

- Oran, D., Unal, S., Gunduz, O., 2022. Evaluation of bacterial cellulose/quince seed mucilage composite scaffold for wound dressing. *Emergent Materials*, 5 (2), 315-321.
- Önal, İ.Ö., 2010. Effects of carvacrol on acute lung injury induced by oleic acid in rats. Specialization Thesis, Hacettepe University Medical Faculty, Anesthesiology and Reanimation, Ankara, Turkey.
- Özdil, A. G., 2022. Development and characterization of biopolymernanomaterial for biosensor applications, Master Thesis, Pamukkale University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Denizli, Turkey.
- Özen, Ö., Yilmaz, D., Yapici, K., 2022. A novel method for the production of conductive ring spun yarn. *Cellulose*, 29 (8), 4767-4785.
- Scacchetti, F. A. P., Pinto, E., Soares, G. M. B., 2017. Functionalization and characterization of cotton with phase change materials and thyme oil encapsulated in beta-cyclodextrins, *Progress in Organic Coatings*, 107, 64-74.
- Sharma, R., Joshi, V. K., Rana, J. C., 2011. Nutritional composition and processed products of quince (*Cydonia oblonga* Mill.).
- Sinoimeri, A., 2009. Friction in textile fibers and its role in fiber processing. *Wear*, 267(9-10), 1619-1624.
- Soltani, P., Johari, M. S., 2012. A study on siro-, solo-, compact-, and conventional ring-spun yarns. Part II: yarn strength with relation to physical and structural properties of yarns. *Journal of The Textile Institute*, 103(9), 921-930.
- Şimşek, E., 2020. The usage of quince (*cydonia oblonga* miller) seed mucilage as a biomaterial in tissue engineering and regenerative medicine, Master Thesis, Çanakkale Onsekiz Mart University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Çanakkale, Turkey.
- Walentowska, J., Foksowicz-Flaczyk, J., 2013. Thyme essential oil for antimicrobial protection of natural textiles, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 84, 407-411.
- Xie, A. J., Yin, H. S., Liu, H. M., Zhu, C. Y., Yang, Y. J., 2018. Chinese quince seed gum and poly (N, N-diethylacryl amide-co-methacrylic acid) based pH-sensitive hydrogel for use in drug delivery, *Carbohydrate polymers*, 185, 96-104.
- Yılmaz, D., Alay Aksoy, S., Maleki, H., Rahbar, R. S., Söğüt, B., Azimi, S. S., 2023. Fabrication of PCM-loaded polylactic acid (PLA)/cotton biocomposite yarn with thermoregulation function. *Cellulose*, 30(6), 3995-4009.
- Yılmaz, D., Özen, Ö., Özkayalar, S., Alay Aksoy, S., Söğüt, B., 2022. An innovative method for microcapsule based functional yarn production. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8051-8064.
- Zaharia, C., Diaconu, M., Muresan, E. I., Danila, A., Popescu, A., Rosu, G., (2020). Bioactive emulsions with beneficial antimicrobial application in textile material production, *Cellulose*, 27, 9711-9723.



YENİŞARBADEMLİ (ISPARTA, TÜRKİYE) BATISINDAKİ MAFİK-ORTAÇ DAYKLARDAKİ EPİDOTLARIN MİNERALOGİSİ VE JEOKİMYASAL KARAKTERİ

Deniz DEDEOĞLU YILDIZ^{1*}

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Batı-Orta Toroslar, Dayk, Mineral Kimyası, Epidot.</i>	Beydağları-Karacahisar otoktonun temelini oluşturan Bozburun şistini kesen dayklar; bazalt, bazaltik andezit ve andezit bileşimlidir. Bazalt, bazaltik andezit, ve andezit bileşimli kayalarda bulunan epidotların incelenmesi bu çalışmanın konusudur. Özşekilli ve yarı özşekilli epidotların, hem magmadan doğrudan kristallenmiş hem de biyotit, hornblend ve plajioklas minerallerinin alterasyonu sonucunda oluştuğu tespit edilmiştir. Magmatik epidotların, Ps içeriği %25-32 arasında olup, genellikle allanit çekirdekli ve düşük TiO ₂ konsantrasyonuna (<%0,02) sahiptir. İkincil epidotların da Ps değeri %0-25 arasında biyotit alterasyonu ve %33-38 arasında biyotit alterasyonunu göstermektedir (Tulloch, 1979). Genellikle bunlara klorit, apatit ve titanit mineralleri eşlik etmektedir. Dayklardaki epidotların Ps içeriği %7 ile 41,5 arasında değişmektedir. XFe ⁺³ değeri 0,222-1,000 arasında olan epidot grubu mineraller, klinozoisit ve epidot kompozisyonludur. Magmatik epidotlarda gözlenen halkalı zonlanma, kristallenme sırasında magmanın kompozisyonunda veya oksijen fugasitesinde döngüsel bir değişim meydana geldiğinin göstergesidir. Dokusal ve kimyasal özellikleri ile Ps içerikleri göz önüne alındığında magmatik epidotların muhtemel yüksek H ₂ O içeriğine sahip magmadan, düşük basınç ve yüksek oksijen fugasitesi altında kristallendiği belirlenmiştir.

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF EPIDOTES IN THE MAFIC-INTERMEDIATE DYKES IN WEST OF YENİŞARBADEMLİ (ISPARTA, TURKEY)

Keywords	Abstract
<i>West-Central Taurides, Dyke, Mineral Chemistry, Epidote.</i>	The dykes cutting the Bozburun schist forming the base of the Beydağları-Karacahisar autochthonous are basalt, basaltic andesite and andesite in composition. The examination of the epidotes found in these basalt, basaltic andesite and andesite rocks is the subject of this study. It has been determined that euhedral and subhedral epidotes are formed as a result of both direct crystallization from magma and alteration of biotite, hornblende and plagioclase minerals. The Ps content of magmatic epidotes is between 25-32% and generally has an allanite core and low TiO ₂ concentration (<0.02%). The Ps value of secondary epidotes also shows biotite alteration between 0-25% and biotite alteration between 33-38% (Tulloch, 1979). They are generally accompanied by chlorite, apatite and titanite minerals. The Ps content of epidotes in the dykes varies between 7 and 41.5%. The epidote group minerals with XFe ⁺³ values between 0.222-1.000 are composed of clinzoisite and epidote. The oscillatory zoning observed in magmatic epidotes is an indication of a cyclic change in the composition or oxygen fugacity of the magma during crystallization. Considering their textural and chemical properties and Ps contents, it was determined that magmatic epidotes were crystallized from magma with a high H ₂ O content, under low pressure and high oxygen fugacity.

Alıntı / Cite

Dedeoğlu Yıldız, D., (2025). Yenişarbademli (Isparta, Türkiye) Batısındaki Mafik-Ortaç Dayklardaki Epidotların Mineralojisi ve Jeokimyasal Karakteri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 275-285.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
D. Dedeoğlu Yıldız, 0000-0002-4619-3376	Başvuru Tarihi / Submission Date 20.11.2024 Revizyon Tarihi / Revision Date 24.01.2025 Kabul Tarihi / Accepted Date 24.01.2025 Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: denizdedeoglu@sdu.edu.tr, +90-246-211-1301

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF EPIDOTES IN THE MAFIC-INTERMEDIATE DYKES IN WEST OF YENİŞARBADEMLİ (ISPARTA, TURKEY)

Deniz DEDEOĞLU YILDIZ ^{1†}

¹Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geological Engineering, Isparta, Türkiye

Highlights

- The magmatic rocks that cut the Bozburun schists in the form of dykes and sills are units containing epidote in the study area.
- According to their textural and chemical criteria, epidotes are formed both from magmatic origin and secondary.
- Magmatic epidotes crystallized from magma with high H₂O content, under low pressure and high oxygen fugacity.

Purpose and Scope

In this study, it is aimed to evaluate textural and chemical characteristics of the epidotes in the magmatic rocks that cut the Bozburun schists in the form of dykes and sills. To reveal the chemical properties of magma and properties of epidotes in the study are by using experimental studies in the literature and different diagrams.

Design/methodology/approach

In order to achieve the aim of this study, firstly the formations cropping out in the region and their relationships with each other were determined by previous scientific researches. After, detailed field studies were carried out and rock samples were taken from sample point that determined in field studies. Flat, polished sections for electron microprobe (EPMA) were prepared in the Ankara University, Earth Sciences Application and Research Center (YEBİM). Electron microprobe analyzes were carried out at the Geological Survey of Slovak Republic, Bratislava. Various diagrams and values were obtained to determine the chemical characteristics of epidotes. All this data was brought together to determine the origin of epidote and its crystallisation conditions.

Findings

It was determined that epidotes have igneous origin and secondary. The epidote crystals are mostly clinozoisite and epidote in composition. As a result of the diagrams and values, epidote is to be crystallised from a wet magma under high oxygen fugacity and low pressure conditions.

Research limitations/implications

With this study, the chemical properties of epidotes in the dykes cutting the Bozburun schist were determined. New information has been obtained about the placement mechanism of magma.

Originality

The research is an original study in which mineralogical characteristics and mineral chemistry analyzes of epidotes in the dykes of Bozburun schists are made first.

[†] Corresponding author: denizdedeoglu@sdu.edu.tr, +90-246-211-1301

1. Giriş (Introduction)

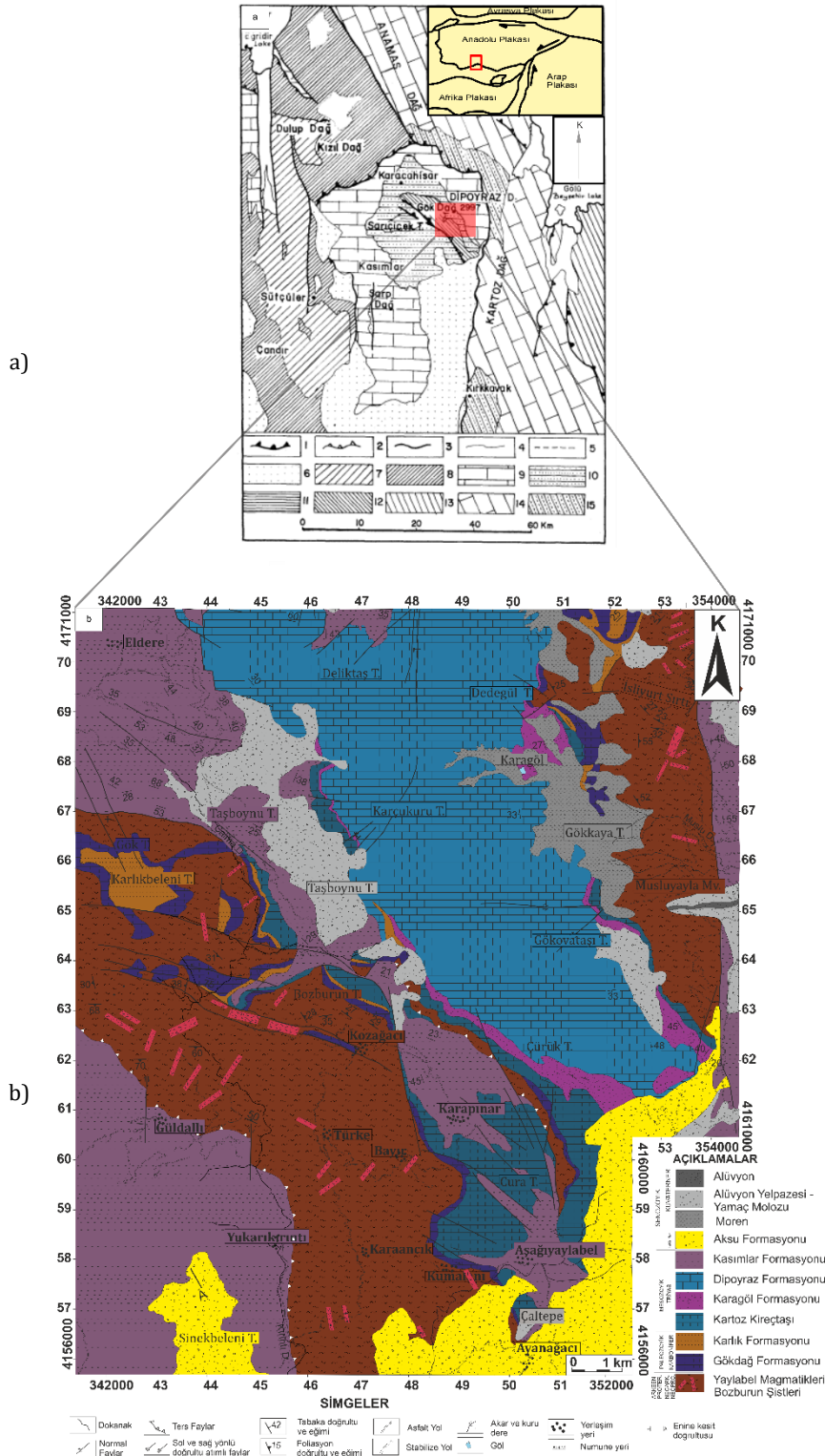
Epidot grubu mineraller, hem ortorombik hem de monoklinik sistemde kristallenen Ca,Fe ve Al sorosilikatlarıdır ve genel formülü $X_2Y_3Z_3(O,Oh,F)_{13}$ şeklindedir. Burada $X=Ca,Ce^{+3},La^{+3},Y^{+3},Th,Fe^{+2},Mn^{+2},Mn^{+3}$; $Y=Al,Fe^{+3},Mn^{+3},Fe^{+2},Mn^{+2},Ti$ ve $Z=Si'$ 'dir (Deer vd., 1966; Dollase,1969; Dollase,1973; Frei vd., 2004). Kimyasal kompozisyonları, sıcaklık, Ph, basınç, CO_2 fugasitesi, S_2 ve O_2 gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Arnason vd.,1993; Schmidt ve Poli, 2004; Bird ve Spieler, 2004). Tipik olarak ortaç-bazik kayaların orta sıcaklık alterasyonu sonucunda oluşurlar (Chukhrov,1972). Belirli magmatik koşullarda, alkali granit, grandiyorit, monzogranit, tonalit, orbiküler diyorit, gabro ve dasitlerde gözlenebilirler (Pattnaik,1996; Leterrier,1972; Cornelius,1913; Owen,1991; Korinevski,2008; Evans vd., 1987). Genel olarak bakıldığında, epidot propilitik alterasyon, bölgesel ve kontakt metamorfizma gibi koşullarda oluşabilmektedir (Baker vd., 2020; Schmidt ve Poli, 2004). Magmatik epidotlar 10 kbar basınç altında oluşurlar ve bazen de nispeten daha düşük sıcaklıklarda ve 3 kbar basınç üzerinde kararlı halde bulunabilirler (Schmidt ve Thompson, 1996). Damar ve boşluklara biyotit, klorit, pirit, kalkopirit ve hematit gibi minerallerin alterasyonu sonucu yerleşen epidotlar, hidrotermal kökenin göstergesidir (Bird vd.,1988; Bird ve Spieler,2004). Magmatik epidot ile ikincil epidotları ayırt etmek kolay değildir. Ancak çeşitli dokusal ve kimyasal özellikler ile tespiti mümkün olabilmektedir. Buna göre magmatik epidotlar; (i) biyotit içinde özsekili ve zayıf pleokrizma göstermesi (Tulloch,1979), (ii) allanit bir çekirdeğin etrafında gelişmesi (Zen ve Hammarstrom,1984; Forizs vd., 1995), (iii) plajioloklas ile kurtçuk formunda içeri büyüme göstermesi (iv) birincil muskovitte bulunması (Sial vd.,1995), (v) halkalı zonlanma göstermesi (Evans ve Vance, 1987), (vi) epidot içinde yuvarlatılmış veya körfezli dokuda hornblend kapanımı bulunması (Zen ve Hammarstrom,1984) şeklinde ayırt edilebilir. Kimyasal içerik olarak ayırt etmek için de (i) pistasit içeriği %25-35 (Liou,1973) ve (ii) % TiO_2 içeriğinin ≤ 0.137 (Liou, 1973; Tulloch, 1979; Vyhnaal vd., 1991; Sial vd., 1999; Oliveira vd., 2010; Dall'Agnol vd., 2017) değerleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Isparta (Türkiye) ilinin doğusunda yer alan Yenişarbademli ilçesinde yer alan Prekambriyen yaşlı Bozburun şistlerini dayk şeklinde kesen mafik-ortaç bileşimli magmatik kayaların içerisinde bulunan epidotların dokusal ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak oluşum mekanizması araştırılmıştır. Ayrıca magmatik epidotların yerleşim koşulları hakkında bilgi edinilmiştir.

2. Bölgesel Jeoloji (Regional Geology)

Isparta'nın doğusunda Orta- Batı Toroslarda yer alan çalışma alanı, Isparta açısı olarak tanımlanmış bölgenin doğu kanadında yer alır. Ayrıca bölgenin, Karacahisar-Beydağları otoktonu ile Anamas-Akseki otoktonunu birbirinden ayıran Kırkkavak fay zonunda yer alması farklı olmasını sağlamaktadır. Bu fayın bulunması stratigrafik ve yapısal olarak farklı özellik sunan kayaların bir arada bulunmasını sağlamaktadır. Çalışma alanının tabanında Arkeen-Proterozoyik, Paleozoyik, Mezozoyik ve Senozoyik sistemlerine ait kayalar bulunmaktadır. Bu birimler Prekambriyende Bozburun Şistleri, Gökdağ ve Karlık formasyonu ve Mesozoyikte Kartoz Kireçtaşı, Karagöl, Dipoyraz ve Kasımlar formasyonudur. Senozoyik sistemine ait kayalar ise Aksu formasyonunda yer almaktadır (Şekil 1). Bölgedeki yaygın olarak gözlenen birim Mesozoyik döneme aittir. Temelde, Arkeen-Proterozoyik yaşlı düşük derecede metamorfizmaya uğramış Bozburun şistleri (Dumont ve Kerey,1975) yer alır. Bu şistlerinin içinde yoğun alterasyona uğramış dayk ve sill şeklinde bulunan Prekambriyen yaşlı Yaylabel magmatikleri yer almaktadır. Birimi oluşturan kırıntuların yaşını tespit etmek için detritik zirkonlardan yapılan çalışmada Kröner ve Şengör (1990) $^{207}Pb/^{208}Pb$ yaş tayini ile $2522\pm 3 - 657\pm 5$ milyon yıl (My) olarak belirlenmiştir. Abbo vd. (2015), Sarıçiçek ve Bozburun şistlerinde bulunan kırıntılı zirkonlardan yapılan U-Pb yaşlandırması ile 520-600 My ve Dedeoğlu Yıldız vd. (2022)'de ise Bozburun şistlerini kesen dayklardaki zirkonlardan U-Pb yaş tayini ile 551-569 My bulunmuştur. Bu dayklar arazide kırık yüzeyinde gri, yeşilimsi gri, ayrışma yüzeyinde ise kahverengimsi grimsi renklere gözlenmektedir.

Bu çalışmada bazalt, bazaltik andezit ve andezit kayaların içinde aksesuar mineral olarak bulunan epidotlar incelenmiştir. Viziyen yaşlı Gökdağ formasyonu şelf ortamında çökelmiş, biyoklastik ve dolomitik kireçtaşından oluşmakta ve Bozburun şistleri üzerinde diskordans olarak bulunmaktadır. Gökdağ formasyonu üzerine çökme ortamı sığ deniz olan kumtaşı, konglomera ve kireçtaşı içeren Başkırıyen yaşlı Karlık formasyonu yer almaktadır. Karlık formasyonunun üstünde karbonat şelfinde çökelmiş kireçtaşı, killi kireçtaşı ve dolomitten oluşan Geç Anisiyen-Ladiniyen yaşlı Kartoz kireçtaşı diskordan yer almaktadır. Ladiniyen yaşlı sığ deniz ortamında oluşmuş kireçtaşı, kumtaşı, silttaşı ve kiltasıyla temsil edilen Karagöl formasyonu birimin üzerinde bulunmaktadır. Sığ karbonat şelf ortamında oluşmuş dolomit, dolomitik kireçtaşı ve resifal kireçtaşı ile temsil edilen Dipoyraz formasyonu alttaki birimleri üzerlemiştir. Bu masif stratigrafik olarak kumtaşı ve şeylden oluşmuş Geç Anisiyen-Ladiniyen yaşlı Kasımlar formasyonunun altında yer alır. Tortoniyen yaşlı konglomeralardan oluşmuş Aksu formasyonu, Kasımlar formasyonunun üzerinde diskordan olarak bulunmaktadır.



Şekil 1. a) Eğirdir güneydoğusunun genelleştirilmiş jeoloji haritası (Dumont ve Kerey, 1975), 1) allokton birliklere ait dokanak, 2) ters fay, 3) fay, 4) dokanak, 5) olası dokanak, 6) miyosen, 7) dulup birliği, 8) ofiyolitik birlik, 9) Alakilise kireçtaşı, 10) Kasımlar formasyonu, 11) Sarıççek şisti ve Kocaosman grubu, 12) Bozburun şisti ve Gökdağ grubu, 13) Beyşehir Hoyran allokton birliği, 14) Anamas-Akseki birliği, 15) Kırkkavak formasyonu, b) Batı-Orta Toroslarda yer alan Dedegöl Dağı ve çevresinin genelleştirilmiş jeoloji haritası (Şenel vd., 1996'dan düzenleyen Dedeoğlu Yıldız, 2021'den alınmıştır.) (a) Generalized geological map of southeast of Eğirdir (Dumont and Kerey, 1975) 1) contact of allochthonous units, 2) reverse fault, 3) fault, 4) contact, 5) possible contact, 6) miocene, 7) dulup unit, 8) ophiolitic unit, 9) Alakilise limestone, 10) Kasımlar formation, 11) Sarıççek schist and Kocaosman group, 12) Bozburun schist and Gökdağ group, 13) Beyşehir Hoyran allochthonous unit, 14) Anamas-Akseki unit, 15) Kırkkavak formation, b) generalized geological map of Dedegöl Mountain and its surroundings in the Western-Central Taurus Mountains (from Dedeoğlu Yıldız, 2021, who modified out of Şenel et al., 1996)

3. Analitik Yöntemler (Analytical Methods)

Arazi çalışmasında seçilen magmatik kayalardan alınan örneklerden elde edilen 55 tane ince kesit Süleyman Demirel Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği İnce kesit ve parlatma laboratuvarında hazırlanmıştır. Kayaç örnekleri, 2,7x4,5 cm boyutlarında cam lamel üzerine yapıştırılmış, kalınlığı 0,03 mm olana kadar inceltilmiş en son olarak lamelle üstleri kapatılmıştır. Elde edilen ince kesitlerle kayaçların mineralojik ve petrografik tayinleri yapılmıştır. Mikroskopik incelemeler sonucunda belirlenen kayaçlardan mineral kimyası analizi için uygun olanlar, Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde düz ve temiz bir yüzeye sahip parlatılmış ince kesitler (2,8x4,8 cm) haline getirilmiştir. Parlatılmış ince kesitlerin karbon kaplanması ve mineral kimyası analizleri Cameca SX100 elektron mikroprob cihazı ile Slovak Cumhuriyeti Jeolojik Araştırma Merkezi Elektron Mikroanaliz Bölümü, Brastislava'da yapılmıştır. Kullanılan ışın özellikleri 15kV ve 10Na'dır.

4. Petrografi (Petrography)

Mineral parajenezi ve mikroskobik çalışmalara göre dayklar; bazalt, bazaltik andezit ve andezit olarak tanımlanmıştır. Genel olarak porfiritik, hipokristalin porfiritik, intersertal ve glomoroporfirik doku sergilemektedir.

4.1. Bazalt (Basalt)

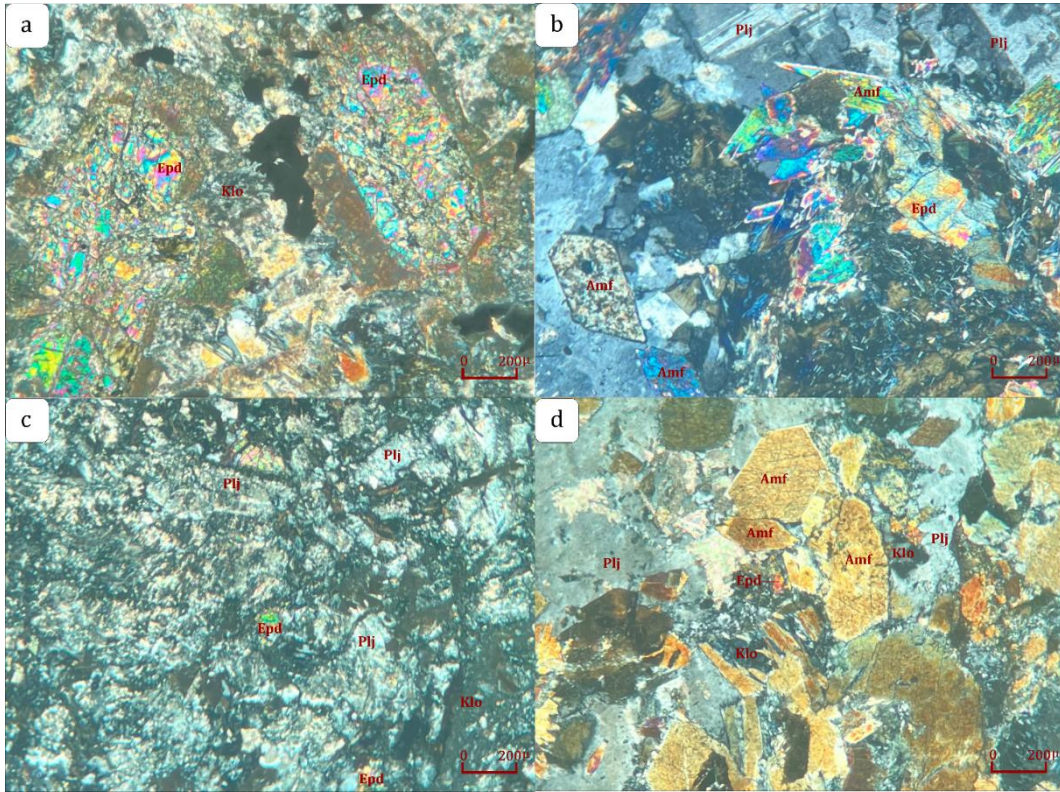
Kayaç % 50-55 plajioklas ve % 35-40 piroksen ana minerallerinden meydana gelmiştir (Şekil 2a). Tali olarak apatit, ilmenit minerallerini içerir. Hidrotermal eriyiklerden kristallenerek meydana gelmiş olan klorit ve epidot mineralleri bulunmakla birlikte, ayrışma ile oluşan klorit ve epidotlarda bulunmaktadır. Ayrışmaya bağlı olarak serpantin, serizit ve kil mineralleri de gelişmiştir. Yoğun olarak ayrılmış olan plajioklaslarda serizit, epidot ve killeşme görülür. Geniş, dikdörtgen biçimli latalar olarak görülürler. Piroksen öz şekilli-yarı öz şekilli kristaller şeklinde olup, klorit ve epidotlaşmalar oluşmuştur. Kuvarslar seyrek olarak görülürler ve bazıları hidrotermal eriyiklerden kristallenerek oluşmuşlardır. Kesişen ışıpta mavimsi, sarımsı, paralel ışıpta ise açık sarımsı renkleri bulunur. Opak mineraller ilmenit ve pirit ile temsil edilirler. İlmenit kristalleri ince-iğnemi ve iskeletimsi biçimlerde görülürler. Piritler ise kare şeklinde olup, öz şekillidirler. Apatitler; özşekilli ve yarı özşekilli olarak bulunurlar. Kısa- küçük ve bazen uzun-büyük kristaller şeklindedir. Epidotlar, yarı özşekilli ve özşekilsiz, küçük kristaller şeklinde görülür. Paralel ışıpta yeşil ve kahverengi yeşil renkler gösterirler. Kesişen ışıpta canlı renkler girişim renkleri sunarlar.

4.2. Bazaltik Andezit (Basaltic Andesite)

Kayaç yaklaşık %60-65 amfibol, %30-35 plajioklas ve %5 tali minerallerden oluşmuştur. Tali olarak ilmenit, kuvars, kalsit, klorit ve epidot mineralleri görülür. Kayacın intersertal, hipokristalin porfirik olan bir dokusu bulunur. Amfibol kristallerinin büyük çoğunluğu öz şekilli, seyrek olarak yarı öz şekillidirler. Alterasyondan etkilenerek kısmen kloritleşmiş ve bazıları ileri derecede altere olarak aktinolit dönüşmüş amfibol psödomorfları şeklinde bulunur (Şekil 2b). Paralel ışıpta kahverengi pleokroizması vardır ve mükemmel olarak gelişmiş iki yönlü dilinimleri mükemmel gösterirler. Aktinolit oluşumu amfibolun özellikle uzun eksen kenarında meydana gelmiştir. Aktinolit ince-uzun çubuksu ve iğnemi şekilde olan kristalleri belli bir yönde dizilerek akma yapısına benzer bir yapı oluştururlar. Plajioklaslar amfiboller gibi alterasyondan etkilenerek killeşmiş ve serizitleşmiştir (Şekil 2c). Uzun levhamsı ve kısa prizmatik şekillerde görülürler. Polisentetik ve bazen de girik ikizlenmeleri bulunur. Plajioklasların bazılarında amfibol kristalleri kapanımlar halindedir ve poikilitik doku sunarlar. Tektonizmaya maruz kalmış olanlarda deformasyon lamelleri oluşmuştur. Kuvarslar iki şekilde kristallenerek oluşmuşlardır. (i) magmadan doğrudan kristallenerek ve (ii) hidrotermal eriyiklerden kristallenerek oluşmuşlardır. Magmadan kristalleneler küçük kristaller halinde ve özşekilsiz olarak gözlenirler. Hidrotermal eriyiklerden oluşan kuvarslar, aynı şekilde hidrotermal olan klorit, kalsit ve epidot kristalleriyle beraber olarak bulunurlar. Kloritler küçük, seyrek orta büyüklüklerde, mavi ve açık kahverenkli, paralel ışıpta ise yeşilimsidirler. Birey taneler olarak görülürler. Gelişigüzel olarak dağılmışlardır. Kalsitler genellikle öz şekilsiz, seyrek albit ikizli olarak görülürler. Apatit mineralleri iğnemi kristaller şeklindedirler ve büyük oranda kuvars içinde inklüzyon şeklinde görülürler. Bozuşmanın hafif olduğu rutiller kahverengi tonlarında olarak görülürler. Bazıları ise alterasyon sonucunda iğnemi şekilde gözlenen ilmenit mineraline dönüşmüşlerdir. Epidot kristalleri genellikle özşekilli ve yarı özşekilli, ince- orta kristal boyutlarda ve küçük kristaller halinde bulunmaktadırlar. Kesişen ışıpta canlı renkler sunarken, paralel ışıpta hafif pembemsidirler. Kayaç içinde gelişigüzel olarak dağılmışlardır. Bazı kristallerde zonlanma gözlenmektedir.

4.3. Andezit (Andesite)

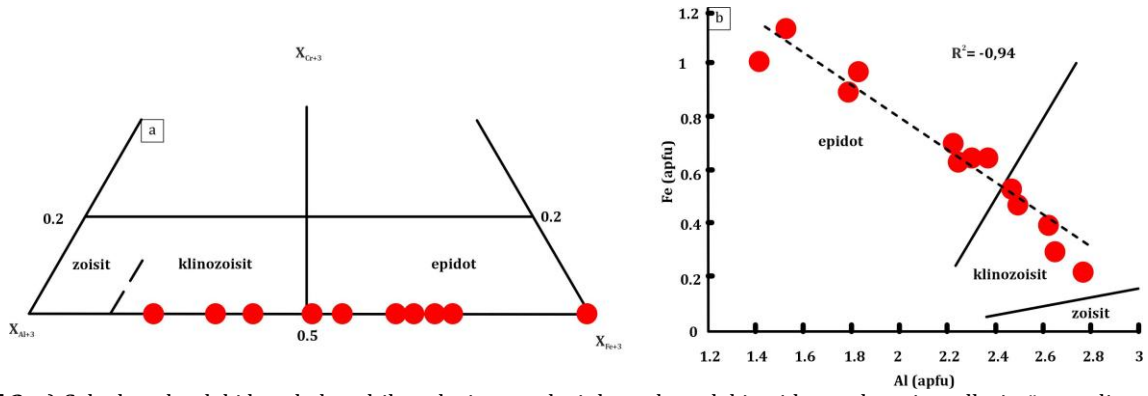
Kayaç esas olarak %55-60 plajioklas, %30-35 amfibol ve %5 kuvars ana minerallerinden meydana gelmiştir. Tali olarak apatit, epidot ve opak mineralleri bulunmaktadır. Ayrışmanın sonucunda aktinolit, epidot, klorit ve kil mineralleri oluşmuştur. İntersertal ve hipokristalen porfirik doku özelliklerine sahiptir. Kayacın esasını oluşturan plajioklas fenokristalleri öz şekilli-yarı özşekilli, uzun-ince ve bazen geniş-levhamsı olarak görülürler. Çoğunlukla killeşmiş, serizitleşmiş, epidotlaşmış ve silisleşmişlerdir. Amfibol kristalleri orta-iri boyutlu, kısa veya geniş levhamsı olarak bulunurlar. Kenarlarında alterasyon etkisiyle kloritleşme gelişmiştir (Şekil 2d). Kuvars genel olarak az miktarlarda bulunur. Mineraller arasındaki boşlukları doldurmuş olarak bulunur, Öz şekilsiz veya yarı öz şekilli olup, küçük kristaller şeklinde görülürler. Apatit kristalleri orta-kısa latalar biçiminde, bazen ince kristaller olarak bulunurlar. Kloritler kesişen ışıktaki mavimsi, paralel ışıktaki yeşilimsi renkleri sunmaktadır. Amfibollerin alterasyonuna bağlı olarak meydana gelmişlerdir. Amfibol kristallerinin uzun eksenlerinin uç kısımlarında alterasyon sonucu aktinolit kristalleri oluşmuştur. Paralel ışıktaki pembemsi ve açık yeşil renkleri vardır. Epidotlar, hidrotermal eriyiklerden oluştuğu gibi plajioklasların ayrışması ile oluşmuşlardır ve küçük kristaller olarak görülürler. Paralel ışıktaki sarımsı yeşil ve yeşil renkleri sunarken kesişen ışıktaki yüksek girişim (I. ve II. dizi) renkleri gösterirler.



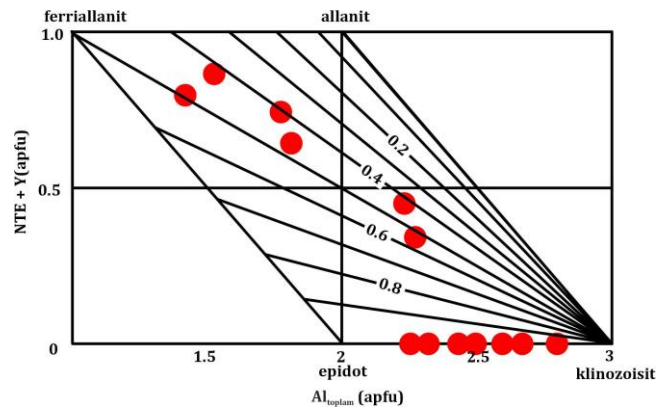
Şekil 2. a) Bazalt kayacını oluşturan piroksen ve plajioklas minerallerinin mikroskop görüntüsü (ÇN) b) bazaltik andezit kayacını oluşturan amfibollerde gözlenen kloritleşme ve aktinolitleşme, plajioklas ve tali olarak bulunan, klorit ve epidot görüntüsü (ÇN), c) ileri derecede alterasyona uğramış plajioklas kristalleri ve hidrotermal eriyiklerden kristallenerek meydana gelmiş olan klorit ve epidotların bazaltik andezitik kayadaki görüntüsü (ÇN), d) iki yönlü dilinimleri görülen, kısmen klorit ve aktinolitleşmiş amfibol kristalleri, killeşmiş plajioklaslar ve tali olarak epidot minerallerinin andezit kayacındaki görüntüsü (ÇN), (Plj: Plajioklas, Amf: Amfibol, Klo:Klorit, Epd: Epidot.) (a) Microscopic image of amphibole and plagioclase minerals forming in the basalt (CPL), (b) image of chloritization and actinolitization in amphiboles, plagioclases and accessory chlorite and epidote in basaltic andesite (CPL), (c) image of highly altered plagioclase crystals and chlorite and epidote formed by crystallization from hydrothermal melts in basaltic andesite (CPL), (d) image of amphibole crystals with bi-directional cleavages, partially chlorite and actinolitized, argillized plagioclases, accessory epidote minerals in andesite (CPL), (Plj: Plagioclase, Amf: Amphibole, Klo: Chlorite, Epd: Epidote))

5. Mineral Kimyası (Mineral Chemistry)

Bazalt, bazaltik andezit ve andezit kayalarındaki epidotlar tipik olarak %1'den daha fazla konsantrasyonlarda Ca, Fe, Al ve Si içerir (Tablo 1). Al, Fe, Ca ve Mn a.p.f.u. değerleri 12,5 oksijen üzerinden hesaplanmıştır (Pacey vd., 2020b; Zhang vd., 2023). Epidotlar, %7,4 ile % 42,9 arasında değişen bir geniş bir aralıkta pistasit ($X_{Ps} = \text{Fe}^{+3} / (\text{Fe}^{+3} + \text{Al}) \times 100$) ve CaO (%11,09-24,64) değerine sahiptir (Tablo 1). Epidot mineralleri TiO_2 (0,03-2,41), MnO (0,07-0,74) ve MgO (0,04-0,65) değerlerine sahiptir. Ayrıca tipik epidotlardan daha düşük Fe_2O_3 (%3,82-%16,45) içermektedir (Chukhrov,1972).

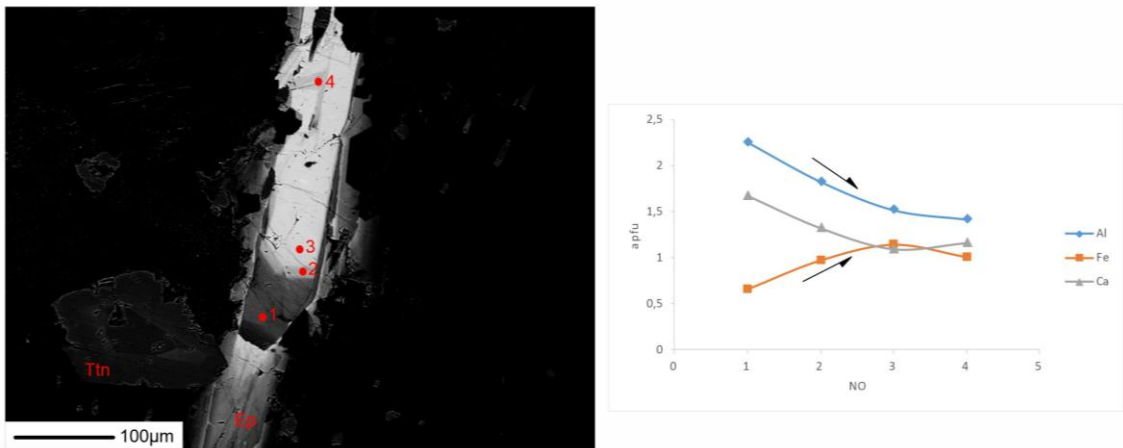


Şekil 3. a) Çalışılan alandaki bazalt, bazaltik andezit ve andezit kayalarındaki epidot grubu minerallerin üçgen diyagrama göre sınıflandırılması ($X_{Cr+3}=Cr^{+3}/(Fe^{+3}+Al^{+3}\cdot 2+Cr^{+3})$, $X_{Fe+3}=Fe^{+3}/(Fe^{+3}+Al^{+3}\cdot 2+Cr^{+3})$, $X_{Al+3}=(Al^{+3}\cdot 2)/(Fe^{+3}+Al^{+3}\cdot 2+Cr^{+3})$, b) Fe^{+3} e karşı Al^{+3} diyagramı (a) Classification of epidote group minerals in the studied area with the triangle diagram, b) Fe^{+3} vs. Al^{+3} diagram.)

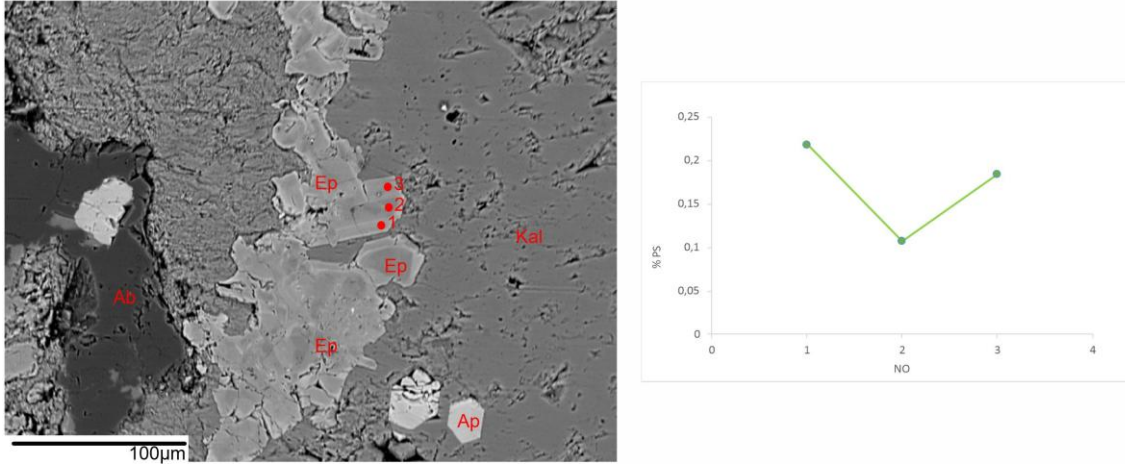


Şekil 4. Al (toplam)'a karşı NTE+ Y(apfu) diyagramda çalışılan epidot grubu minerallerin, ferriallanit-allanit-epidot-klinozoisit sistemindeki yeri (izolinler $Fe_{ox}=Fe^{+3}/Fe_{toplam}$ oranıdır) (Petrik vd., 1995) (Al_{tot} vs. REE + Y (apfu) diagram showing the position of the studied epidote mineral group in the ferriallanite-allanite-epidote-clinozoisite system. Isolinler represent the $Fe_{ox}=Fe^{3+}/Fe_{tot}$ ratio)

Şekil 5'de epidot kristalinin doğrusal konsantrasyon profilini göstermektedir. Buna göre kenardan merkeze doğru Fe'de zenginleşme ve Al'de tükenme söz konusudur. Epidot kristalinin % pistasit kontrasyonuna göre çizilen profilinde (Şekil 6) çekirdekten kenara doğru bir artış vardır. Bu şekilde allanit çekirdekli olmayan magmatik epidotun apatit, titanit ve zirkon gibi aksesuar mineral kapanımları olabilir. Bu da aksesuar mineral kapanımlarının, epidot oluşumundan sonrası süreçlerde geliştiğini göstermektedir. Çekirdekten kenara doğru Ps konsantrasyon değerinin azaldığı ve çekirdeğin allanit olduğu epidotlarda ise magmanın kristalleşmesi sırasında, granitik eriyiğin büyük ölçüde Fe^{+3} 'un azaldığını göstergesidir. Bu durum, epidotun zaten magmanın en azından üçte birinin derin magma odasında kristallendiğinin ve eriyikten çözünmeden yukarı kaçtığını ve kristallenmeye başladığını belirtmektedir (Dawes ve Evans,1991).



Şekil 5. Bazaltik andezit kayacındaki epidotun geri saçılmış elektron (BSE) görüntüsü ile Al, Fe, Ca konsantrasyon profili (Ttn: titanit) (Al, Fe, Ca concentration profile with backscattered electron (BSE) image of epidote in basaltic andesite (Ttn: titanite))



Şekil 6. Bazaltik andezit kayacındaki zonlu epidotun geri saçılmış elektron (BSE) görüntüsü ile profil boyunca Ps bileşimi (Ep: epidot, Ap:apatit, Ab:albit, Kal:kalsit) (Backscattered electron (BSE) image of zoned epidote with Ps composition along the profile in basaltic andesite (Ep: epidote, Ap:apatite, Ab:albite, Cal:calcite))

6. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Pistasit değerine göre magmatik epidot ve alterasyon sonucu oluşmuş epidot birbirinden ayırt edilebilmektedir. Bu nedenle kimyasal bileşimi bilinen epidotlarda pistasit oranını ($Ps = 100 \cdot Fe^{+3} / (Fe^{+3} + Al)$); (Armbruster vd.,2006) hesaplayarak epidotun kökenini belirlemek dokusal özelliklerden daha güvenilirdir. Epidotlar üzerine yapılan çalışmalar sonucu magmatik epidotların Ps değeri %25-33 (Liou, 1973), %25-29 (Tulloch, 1979), %23-27 (Zen ve Hammarstrom, 1984), %19-24 (Dawes ve Evans, 1991), %26-33 (Oliveira vd., 2010), %30-70 (Schmidt ve Poli, 2004), %21-26 (Korinevskii,2008) ve %16-29 (Tchameni vd., 2016) olarak belirlenmiştir. Tulloch (1979)'a göre plajioklasın alterasyonu sonucu oluşmuş epidotlardaki Ps değeri 0-25, biyotitin alterasyonu sonucu oluşmuş epidotların Ps değeri ise 33-38 arasında değişmektedir. Çalışılan epidotların Ps içeriği %7-41.5 aralığındadır. Bu da mineralojik tayinlerinde gözlenen doku, mineral birlikteliği ve kimyasal bileşimlerini destekler şekilde epidotların hem magmatik kökenli hem de ikincil olarak oluştuğunu göstermektedir. Magmatik epidotlar genellikle yarı özşekilli ve bazen halkalı zonlanma göstermektedir. İkincil epidotlar, çoğunlukla plajioklas ve amfibolun yerini almış şekilde gözlenir ve bunlar genelde klorit ve apatit mineralleri ile beraber bulunurlar.

Epidotun içerdiği TiO_2 (%) içeriği aynı zaman da köken tayini için yardımcıdır. Mazaheri (1999)a göre 0 ile 0,05 arasındaki değerler mafik minerallerin alterasyonu sonucu oluşmuş epidotları işaret etmektedir. Benzer şekilde Evans ve Vance (1987) magmatik epidotların % $TiO_2 < 0,2$ olduğunu de Oliveria vd. (2010) ise magmatik epidotların TiO_2 içeriğinin 0,2'den küçük ve ikincil epidotlar için 0,6'dan büyük olduğunu söylemişlerdir. Araştırılan epidotlar örneklerini TiO_2 (%) değerleri %0,07 ile 3,07 arasında değişmektedir.

Epidotun, deneysel araştırmalar sonucu 300 MPa üzerinde duraylı olduğu belirlenmiştir ancak epidotun kristallenmesi için minimum basınç değeri, bileşimi ve oksijen fugasitiesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Schmidt ve Poli, 2004). Crawford ve Hollister (1982)'e göre, H_2O 'e doğmuş granitlerde magmatik epidotlar minimum yaklaşık 600 MPa başıncıta oluşabilmektedir. Granitik ve tonalitik magmalarda ise epidot, solidus eğrisine yakın sıcaklıkta ve 800-1000 MPa başıncıları arasında duraylı olarak bulunmaktadır (Liou, 1973; Naney, 1983; Schmidt and Thompson, 1996). Epidotun; kristallenme derinliği, oksiyen fugasitesi (fO_2) gibi özelliklerini belirlemek için Ps değeri yol göstericidir. Epidot (Ps33), HM tamponu ile tanımlanan fO_2 içeriği için 748 °C 500 MPa, 678 °C 300 MPa ve 635 °C 200 MPa da duraylıdır. NNO tamponu ile tanımlanan fO_2 içeriği için ise epidot (Ps25) stabilite limiti 100 °C ve 500 MPa'ya düşer (Liou,1973). Yüksek pistasite içeriği yüksek oksiyen fugasitesi anlamına gelmektedir (Holdaway, 1972). Epidotun fO_2 değerininin artması ile Fe^{+3} içeriğinin arttığını ve fO_2 değerinin azalması ile de daha alüminyumlu olduğunu tespit etmiştir (Liou, 1973). Çalışılan bazalt, bazaltik andezit ve andezit kayaçlarındaki epidotların Ps değerleri 7 ile 41.5 arasında değişmektedir. Düşük pistasite değeri (Ps7-Ps28) epidotun düşük basınç altında kristallendiğini ve fO_2 şartlarının NNO-HM tamponu olduğunu göstermektedir. Daha yüksek pistasite değeri (28-41.5) ise yüksek fO_2 şartlarında ve düşük basınçta kristallendiğini göstergesidir. Naney(1983) ve Prouteau ve Scaillet (1991)'ın deneysel araştırmalarına göre, yüksek H_2O içeriği (%5 400 MPa veya %7-9 960 MPa'da) amfibollerin sıvı silikat fazından olmasına ve piroksen kristalizasyonunu engellediğini belirlemişlerdir. İncelenen magmatik kayaçlardaki amfibolun varlığı ve bazalt kayacı dışında piroksen yoksunluğu magmanın kristalizasyonun başlangıç aşamasında %5'den fazla H_2O içeriğine sahip olmasının göstergesidir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Arazi çalışmalarında bana destek olan Prof. Dr. Kamil Yılmaz'a ve mikroprop analizlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan Dr. Martin Ondrejka'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Abbo, A., Avigad, D., Gerdes, A., Güngör, T., 2015. Cadomian Basement and Paleozoic to Triassic Siliciclastics of the Taurides (Karacahisar dome, south-central Turkey): Paleogeographic Constraints from U–Pb–Hf in zircons, *Lithos* 227, 122–139.
- Armbruster, T., Bonazzi, P., Akasaka, M., Bermanec, V., Chopin, C., Gieré, R., Heuss-Assbichler, S., Liebscher, A., Menchetti, S., Pan, Y., Pasero, M., 2006. Recommended Nomenclature of Epidote-Group Minerals. *European Journal of Mineralogy* 18 (5), 551–567.
- Arnason, J.G., Bird, D.K., Liou, J.G., 1993. Variable controlling epidote composition in hydrothermal and low-pressure regional metamorphic rocks. *Abhand. Geol. Bund.* 49, 17–25.
- Baker, M.J., Wilkinson, J.J., Wilkinson, C.C., Cooke, D.R., Ireland, T., 2020. Epidote Trace Element Chemistry as an Exploration Tool in the Collahuasi District. Northern Chile. *Economic Geology* 115 (4), 749–770.
- Bird, D.K., Spieler, A.R., 2004. Epidote in geothermal systems. *Rev. Mineral. Geochem.* 56, 235–300.
- Bird, D.K., Cho, M., Janik, C.J., Liou, J.G., Caruso, L.J., 1988. Compositional, order-disorder, and stable isotope characteristics of Al–Fe epidote, State 2-14drill hole, Salton Sea geothermal system. *J. Geophys. Res.* 93, 13135–13144.
- Chukhrov, F.V., 1972. *Mineralogy (Minerals), Handbook*, (3). Moscow, Nauka.
- Cooke, D.R., et al., 2014. New Advances in Detecting the Distal Geochemical Footprints of Porphyry Systems—Epidote Mineral Chemistry as a Tool for Vectoring and Fertility Assessments, Building Exploration Capability for the 21st Century. Society of Economic Geologists.
- Cooke, D. R., Baker, M., Hollings, P., Sweet, G., Chang, Z., Danyushevsky, L., Gilbert, S., Zhou, T., White, N., Gemmell, J. B., and Inglis, S., 2014. New advances in detecting the distal geochemical footprints of porphyry systems – epidote mineral chemistry as a tool for vectoring and fertility assessments. In: Kelley, Karen D., and Golden, Howard C., (eds.) *Building Exploration Capability for the 21st Century*. SEG Special Publication, 18. Society of Economic Geologists, Boulder, CO, USA, pp. 127-152.
- Cornelius, H.P., 1913. Geologische Beobachtungen im Gebiet des Fornogletschers (Engadin), (8), 246-252.
- Crawford, M.L., Hollister, L.S., 1982. Contrast of Metamorphic and Structural Histories Across the Work Channel Lineament, Coast Plutonic Complex, British Columbia. *Journal of Geophysical Research*. 87, 3849–3860.
- Dawes, R.L., Evans, B.W., 1991. Mineralogy and Geothermobarometry of Magmatic Epidote-Bearing Dikes, Front Range, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 103(8), 1017-1031.
- Dall'Agnol R., Cunha I.R.V., Guimarães F.V., Oliveira D.C., Teixeira M.F.B., Feio G.R.L., Lamarão C.N., 2017. Mineralogy, Geochemistry, and Petrology of Neoproterozoic to Magnesian Granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The Origin of Hydrated Granites Associated with Charnokites. *Lithos*, 277, 3-32.
- Dedeoğlu Yıldız, D., 2021. Dedegöl Dağı (Yenişarbademli, Isparta) Dolayınin Jeolojisi Ve Magmatik Kayaçların Petrolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 138.
- Dedeoğlu Yıldız, D., Yılmaz, K., and Aysal, N., 2022, Petrology and zircon U–Pb Geochronology of Mafic – Intermediate Dykes in the West-Central Taurides: Implications for Magma Source During the Late Precambrian–Early Palaeozoic: *International Geology Review*, 2436–2455.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1966. *An Introduction to the rock-forming minerals*. Longman Scientific and Technical, 61-69.
- Dollase, W.A., 1969. Crystal structure and cation ordering of piemontite. *American Mineralogist* 54 (5–6), 710–717.
- Dollase, W.A., 1973. Mössbauer spectra and iron distribution in the epidote-group minerals. *Zeitschrift Für Kristallographie - Crystalline Materials* 138 (1–6), 41–63.
- Dumont, J.F., Kerey, E., 1975. Eğridir Gölü Güneyinin Temel Jeolojik Etüdü. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 18(2), 169-174.
- Evans, B.W., Vance, J.A., 1987. Epidote Phenocrysts in Dacitic Dikes, Boulder County, Colorado. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 96(2), 178-185
- Frei, D., Liebscher, A., Franz, G., Dulski, P., 2004. Trace Element Geochemistry of Epidote Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 56 (1), 553–605.
- Forizs, I., Vukov, M., Jovic, V., 1995. Significance of Magmatic Epidote in the Zeljin Pluton, Serbia Third Hutton Symposium, The Origin of Granites and Related Rocks, Abstract. University of Maryland.
- Holdaway, M.J., 1972. Thermal stability of Al–Fe–epidote as a Function of fO₂ and Fe content. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 37, 307–340.
- Korinevskii, V.G., 2008. Magmatic Epidote from Gabbro. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 159-164
- Kröner, A., Şengör, A. M. C., 1990, Archean and Proterozoic ancestry in Late Precambrian to Early Paleozoic Crustal Elements of Southern Turkey as Revealed by Single-zircon Dating. *Geology*, 18, 11, 86–90.
- Leterrier, J., 1972. *Etude Petrographique et Geochimique du Massif Granitique de Querigut (Ariege)*. (PhD), Université de Nancy, France.
- Liou, J.G., 1973. Synthesis and Stability Relations of Epidote, Ca₂Al₂FeSi₃O₁₂(OH). *Journal of Petrology* 14 (3), 381–413.

- Mazaheri, A., 1999. The Importance of Pistacite in the Diagnosis of Epidote. The 8th Seminar of Crystallography and Mineralogy of Iran. Tehran: University of Science and Technology.
- Naney, M.T., 1983. Phase-Equilibria of Rock-Forming Ferromagnesian Silicates in Granitic Systems. *American Journal of Science* 283(10), 993-1033.
- Oliveira, M.A., Dall'Agnol, R., Scaillet, B., 2010. Petrological Constraints on Crystallization Conditions of Mesoarchean Sanukitoid Rocks, Southeastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology* 51(10), 2121-2148.
- Owen, J., 1991. Significance of Epidote in Orbicular Diorite from the Grenville Front Zone, Eastern Labrador. *Mineralogical Magazine* 55(379) 173-181.
- Pacey, A., Wilkinson, J.J., Cooke, D.R., 2020b. Chlorite and Epidote Mineral Chemistry in Porphyry Ore Systems: A Case Study of the Northparkes District, New South Wales, Australia. *Economic Geology* 115 (4), 701-727.
- Pattnaik, S.K., 1996. Petrology of the Bhela-Rajna Alkaline Complex, Nuapara District, Orissa. *Journal of the Geological Society of India*, 48(1), 27-40.
- Petrik, I., Broska, I., Lipka, J., Siman, P., 1995. Granitoid Allanite-(Ce): Substitution Relations, Redox Conditions and REE Distributions (on an Example of I-Type Granitoids, Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpathica*, 46, 79-94.
- Prouteau, G., Scaillet B., 2003. Experimental Constraints on the Origin of the 1991 Pinatubo Dacite. *Journal of Petrology* 44(12), 2203-2241.
- Schmidt, M.W., Poli, S., 2004. Magmatic Epidote. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 56, 399-430.
- Schmidt, M.W., Thompson, A.B., 1996. Epidote in Calc-Alkaline Magmas: an Experimental Study of Stability, Phase Relationships, and the Role of Epidote in Magmatic Evolution. *Am. Mineral.* 81, 424-474.
- Şenel, M., Gedik, I., Dalkılıç, N., Serdaroglu, M., Bilgin, A.Z., Uğuz, M.F., Bölükbaşı, A, S., Korucu, M. ve Özgül, N., 1996. Isparta büklümü doğusunda otokton ve allohton birimlerin stratigrafisi (Batı Toroslar), *MTA Dergisi*, 118, 111-160.
- Tchameni, R., Sun, F., Dawai, D., Danra, G., Tékoum, L., Nomo Negue, E., Vanderhaeghe, O., Nzolang, C., Nguihdama D., 2016. Zircon Dating and Mineralogy of the Mokong Pan-African Magmatic Epidote-Bearing Granite (North Cameroon). *International Journal of Earth Sciences* 105(6), 1811-1830.
- Tulloch, A.J., 1979. Secondary Ca-Al Silicates as Low-Grade Alteration Products of Granitoid Biotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69(2), 105-117.
- Zen, E.A., Hammarstrom, J.M., 1984. Magmatic Epidote and Its Petrologic Significance. *Geology* 12(9), 515-518.
- Zhang, W., et al., 2023. Discriminating Characteristic of Hydrothermal Fluids Using Epidote Mineral Chemistry and Strontium Isotopes: A Case Study of Duotoushan Fe-Cu deposit, eastern Tianshan. *Earth Science Frontiers*, 30(02), 384-400.



YILDIRIM KAYNAKLI ENERJİ İLETİM HATTI ARIZALARININ İZOLATÖR BOYU VE TOPRAKLAMA DİRENCİ AÇISINDAN SINIR DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Ahmet Yaşar YOLDAŞ^{1,2*}, Hamza Feza CARLAK¹, Şükrü ÖZEN¹

¹ Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye
² TEİAŞ Genel Müdürlüğü, 19. Bölge Müdürlüğü, Tesis ve Kontrol Müdürlüğü, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Yıldırım, İletim hattı, Kesinti, Bergeron, Topraklama.</i>	Yıldırım, doğanın en etkileyici fiziksel fenomenlerinden biri olarak, yüksek enerjiye sahip elektriksel boşalma olarak tanımlanabilir. Dünya üzerinde 3 milyar yıldan beri var olduğu düşünülen ve kontrolsüz elektrik hareketi olarak özetlenebilecek yıldırım, havai enerji iletim hatları için en büyük arıza kaynağıdır. Bu çalışmada işletmede bulunan ve yıllık bazda en fazla yıldırım alan mevcut enerji iletim hattı karakter özellikleriyle (direk temel topraklama direnci, izolatör boyu, koruma iletken tipi, iletken tipi) Bergeron Yöntemi ile PSCAD kullanılarak modellenmiştir. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan yıldırım verilerine göre hangi yıldırım şiddetinde hatta arızanın meydana geldiği ve hattın enerjisiz kaldığı belirlenmiştir. Hattın işletmecisinden mesafe koruma rölesi arıza bilgileri alınarak arızanın olduğu direk belirlenmiştir. Bu veriler ışığında hazırlanan modele değişik akım şiddetlerinde yıldırım enjekte edilerek, yıldırım akım şiddeti, direk topraklama direnci ve izolatör boyu arasında korelasyon elde edilmiştir. Bu korelasyon sonucunda yıldırım akım şiddetine bağlı olarak, hangi izolatör boyunda ve direk toprak değerinde hatların enerjisiz kalıp kalmayacağı belirlenmiştir.

DETERMINATION OF LIMIT VALUES OF LIGHTNING-INDUCED POWER TRANSMISSION LINE FAULTS DUE TO INSULATOR LENGTH AND GROUNDING RESISTANCE

Keywords	Abstract
<i>Lightning, Transmission line, Outage, Bergeron, Grounding.</i>	Lightning, a spectacular natural phenomenon, can be defined as a high-energy electrical discharge. Existing on Earth for an estimated 3 billion years and characterized as uncontrolled electrical movement, lightning is a major cause of failures in overhead power transmission lines. This study models an existing power transmission line—the one experiencing the highest number of lightning strikes annually within the power company—using its characteristics (grounding resistance of the tower, insulator length, protective conductor type, conductor type) and the Bergeron Method within the PSCAD simulation software. Using lightning data obtained from the Regional Meteorological Directorate, the study determines the lightning intensity at which faults occur on the line, causing power outages. Fault location data from the line operator's distance protection relay is used to identify the specific tower where the fault occurred. By injecting lightning strikes of varying current intensities into the developed model, a correlation was established between lightning current intensity, tower grounding resistance, and insulator length. This correlation determined the insulator length and tower grounding resistance thresholds at which power outages are likely to occur depending on the lightning current intensity.

Alıntı / Cite

Yoldaş, A.Y., Carlak, H.F., Özen, Ş., (2025). Yıldırım Kaynaklı Enerji İletim Hattı Arıza Sebeplerinin İzolatör Boyu ve Topraklama Direnci Açısından Sınır Değerlerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 286-305.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
A.Y. Yoldaş, 0000-0003-4852-4076	Başvuru Tarihi / Submission Date 07.01.2025
H.F. Carlak, 0000-0002-8561-4591	Revizyon Tarihi / Revision Date 06.02.2025
Ş. Özen, 0000-0002-5538-6786	Kabul Tarihi / Accepted Date 11.03.2025
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: ahmetyoldas@gmail.com, +90-242-346-5055

DETERMINATION OF LIMIT VALUES OF LIGHTNING-INDUCED POWER TRANSMISSION LINE FAULTS DUE TO INSULATOR LENGTH AND GROUNDING RESISTANCE

Ahmet Yaşar YOLDAŞ^{1,2†}, Hamza Feza CARLAK¹, Şükrü ÖZEN¹

¹ Akdeniz University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Antalya, Türkiye
TEİAŞ General Directorate, 19. Regional Directorate, Facility and Control Department, Antalya, Türkiye

Highlights

- The current intensity of the lightning strike on the transmission line was determined by comparing data from the Regional Meteorology Directorate and transmission line data with high fault indices.
- The existing power transmission line with the highest annual lightning strikes was modeled using PSCAD, incorporating its characteristic features such as pole grounding resistance, insulator length, shielding type, and conductor type.
- By injecting lightning at different current intensities into the model, a correlation was established between lightning current intensity, pole grounding resistance, and insulator length, determining under which conditions power outage would occur.

Graphical Abstract

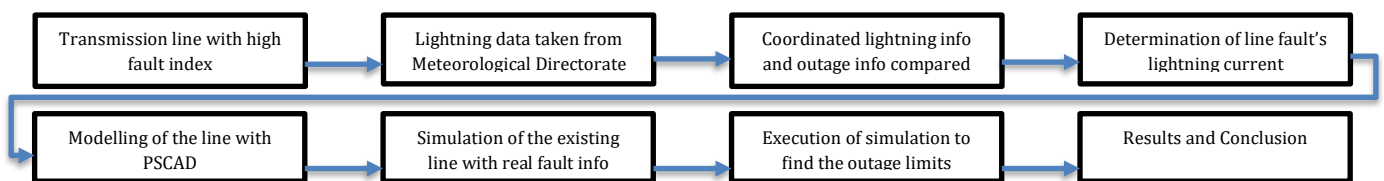


Figure. Flowchart of the Study

Purpose and Scope

Transmission line faults, predominantly caused by lightning strikes, result in significant power outages and economic losses. This study aims to investigate the correlation between lightning current intensity, tower grounding resistance, and insulator length in determining the susceptibility of transmission lines to lightning-induced failures. The study focuses on a transmission line, known for its high incidence of lightning strikes, analyzing the relationship to identify optimal parameters for improved lightning protection.

Design/methodology/approach

The research utilizes a PSCAD/EMTDC simulation model of the line, incorporating its actual characteristics including pole grounding resistance, insulator length, shielding type, and conductor type. Lightning data obtained from the Regional Directorate of Meteorology was used to establish a baseline for failure analysis. By injecting lightning impulses of varying current intensities into the model, the impact on the transmission line was assessed. Distance protection relay fault information from the line operator was used to pinpoint affected towers, validating the simulation results. Analysis was employed to determine the correlation between lightning current intensity, grounding resistance, and insulator length in causing line faults.

Findings

The simulations revealed a strong correlation between lightning current intensity, pole grounding resistance, and insulator length. Specifically, increasing grounding resistance above 19Ω significantly increased the probability of failure. Similarly, insulators shorter than 1660mm were more prone to flashover. The analysis identified specific thresholds for each parameter, indicating safe operating ranges to minimize lightning-induced faults.

Research limitations/implications

This research is limited to the specific characteristics of the transmission line. Extrapolation to other lines requires consideration of their local parameters such as grounding resistance, tower type, insulator length.

Practical implications (if applicable)

The findings of this study can be directly applied to improve the design and maintenance of transmission lines to enhance lightning protection. The identified thresholds for grounding resistance and insulator length provide valuable guidance for optimizing line design and mitigating the risk of lightning-induced faults. This can lead to reduced power outages, improved grid reliability, and significant cost savings.

Originality

The originality of this work lies in the detailed analysis of the relationship between lightning current intensity, tower grounding resistance, and insulator length using a validated PSCAD model of a specific high-risk transmission line. This provides specific, actionable data for engineers and utilities to improve lightning protection strategies in similar high-risk environments. The findings offer valuable insights for improving grid resilience and reducing the economic and social impacts of lightning strikes.

[†] Corresponding author: ahmetyoldas@gmail.com, +90-242-346-5055

1. Giriş (Introduction)

Yıldırım, dünya üzerinde yaklaşık 3 milyar yıldır var olduğu düşünülen en ilginç doğa olaylarından biridir. Eski Yunanlar, yıldırımın Zeus'un silahı olduğuna inanır ve bilgelik tanrıçası Minerva'nın bunu icat ettiğini düşünürdü. Tanrıların bir tezahürü olarak kabul edilen yıldırımın düştüğü yerler kutsal sayılırdı. Yıldırıma, İskandinav mitolojisindeki Thor'dan, panteistik Hindu inanışındaki Indra'ya kadar dünyanın hemen her yerinde kutsallık, sağlık, bereket ve şeytanları kovma gibi birçok anlam yüklenmiştir.

Dünya genelinde her yıl ortalama 8-9 milyon yıldırım gözlemlenmektedir (Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman, 2014). Buna bağlı olarak yıldırım çarpması nedeniyle yaklaşık 24.000 kişi hayatını kaybetmekte, on katı kadar insan ise yaralanmaktadır (Holle, 2008). Türkiye'de ise yıldırım kaynaklı ölüm sayısının yılda ortalama 400 olduğu tahmin edilmektedir (Kadioğlu, 2012). Yıldırım, can güvenliğinin yanı sıra konut ve endüstriyel elektrik tedarikini aksatabilecek kesintilere de yol açmaktadır. Modern yıldırım araştırmalarının temeli, Benjamin Franklin'in 1752'deki meşhur uçurtma deneyinde yıldırımın elektrik kaynaklı bir fenomen olduğunu kanıtlanmasına dayanır (Jernegan, 1928).

Yıldırım, havai enerji iletim hatlarında meydana gelen arızaların başlıca nedenlerinden biridir. Yüksek gerilim enerji iletim hatları, üretilen enerjiyi en az kayıpla tüketim merkezlerine ulaştırmayı amaçlar. Ancak yıldırım çarpması, hattın enerjisinin kesilmesine ve şebekede harmonikler, frekans dalgalanmaları gibi istenmeyen etkilere yol açabilir. Eğer yıldırım, indirici veya yükseltici merkeze yakın bir noktaya isabet ederse, yıldırımın şiddetine bağlı olarak yüksek gerilim anahtarlama elemanları (kesici, ayırıcı), ölçü transformatörleri (akım ve gerilim transformatörleri), parafudrlar ve hatta güç transformatörleri zarar görebilir (Ravaglio, ve diğerleri, 2019).

Türkiye'de ortalama yıldırım yoğunluğu 0,5-1,7 yıldırım/km²yıl iken, bu oran Antalya'dan Muğla'ya kadar Akdeniz kıyısında 4,4-7,1 yıldırım/km² yıla çıkmaktadır (Öztopal, 2017). Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden (MGM) alınan verilere göre Antalya sınırlarında 2015-2022 arası 360.000'den fazla yıldırım gözlenmiştir. Bugüne kadar dünya üzerinde ölçümlenen en yüksek yıldırım gerilimi 1,3 milyar volt (GV) olarak belirlenmiştir (Marshall & Stolzenburg, 2001). Küresel ısınmanın artması ile her yıl gözlenen yıldırım sayısında %10'luk bir artışın beklendiği görülmektedir (Price, 2009). Bu çalışmanın temelini oluşturan yüksek gerilim işletme operatöründen alınan bilgilere göre 2015 -2022 yılları arasında havai hatlarda Antalya sınırları içinde 713 yıldırım kaynaklı arıza tespit edilmiştir ve küresel ısınmayla birlikte bu sayının artacağı da öngörülmektedir.

Enterkonekte sistemin temeli olan hatların işletilmesindeki en büyük problemi yıldırım oluşturmaktadır. Hatların yıldırıma karşı korunması, işletme esnasında problem yaşanmaması, yıldırıma maruz kalınması halinde elektrik sisteminde sorun yaşanmaması enerji arz ve güvenliği için çok önemlidir. Yıldırımın oluşturduğu istenmeyen harmonikler, gerilim ve frekans dalgalanmaları, kesintiler enerjinin akışındaki arz ve güvenlik için en önemli tehdittir (Agrawal & Nigam, 2014). Bu çalışmanın temelini hatların yıldırıma karşı ne gibi analizler yapılarak korunması gerektiği ve yıldırıma karşı alınması gereken proaktif önlem olarak nitelendirilebilecek unsurların neler olması gerektiği sorgulanmaktadır.

Yıldırımın havai hatta düşmesi sonucu direkt istenmeyen elektriksel yük oluşur. Bu yükün en hızlı yolla toprağa akararak devresini tamamlaması gerekir. Direk üzerindeki bu istenmeyen yükün oluşturduğu gerilim izolatörün yalıtkanlık seviyesini geçtiği anda geri atlama (Back Flashover) meydana gelir. İzolatör yüzeyinden iletken doğru akım akmaya başlar (Hardi vd, 2021). Hatta akan kontrolsüz akımın oluşturduğu iletken kanal istenmeyen yük boşalana kadar devam eder. Boşalma tamamlandıkça iyonize olan havanın yardımıyla ters yönde hattan toprağa doğru akım akmaya başlar. Bu noktada hattın gerilim bilgisini kontrol eden gerilim transformatörüne gelen bilgi sonucunda ilgili röle devreye girerek hat kesicisine devreyi açma sinyali gönderir ve hattın enerjisi kesilir (Nguyen & Holt, 2003). Bu duruma karşı yapılabilecek önlemlerin başında direk topraklama direncinin düşürülmesi (Chisholm & Petrache, 2010) ya da izolatör boyutunda değişikliklerin yapılması gelmektedir (Visacro vd., 2021).

Bu çalışmada örnek olarak seçilen ve işletmede bulunan enerji iletim hattı (154kV Oymapınar – Mahmutlar EİH) Antalya sınırları içinde en yüksek yıldırım maruziyetine sahip olan hattır. MGM'den alınan akım şiddeti, tarihi, saati ve koordinatı bilinen yıldırım verileri ile hat güzergahı üst üste bindirilmiştir (MGM, 2025). Hattın üzerine düşen yıldırım verileri filtrelenerek, hattın işletmecisinden alınan arıza verileriyle karşılaştırılmıştır. Arıza verilerinin tarih, saat ve km bilgileri ile eşleştirilen arızalar filtrelenmiştir. Tespit edilen arıza noktalarındaki direklere ait topraklama dirençleri, izolatör boyu, direk tipi, iletken ve koruma teli kesit bilgileri belirlenmiştir. Yıldırımın düştüğü noktadaki hat ve direk bilgileri ile eşleştirilen yıldırım verisinden akım bilgisi alınarak hattın kısmi olarak modellenmesi PSCAD ortamında yapılmış ve yaşanan arızalar tekrar simüle edilmiştir. Yıldırım kendi içinde geçici durum olarak değerlendirilmekte olup bunu için geçici durum analizi (Transient Analiz) yapılmıştır. Geçici durum analizinde noktasal dağıtılmış parametreler kullanılmış olup, bu parametreler için Bergeron Yöntemi seçilmiştir. Hazırlanan simülasyonun gerçek verilerle kontrolü yapılmıştır. Yapılan kontrol sonucu modelin

sağlıklı çalıştığı tespit edilmiştir. Farklı akım şiddetinde yıldırımlar, farklı topraklama direncine sahip ve değişik izolatör boylarında simülasyonlar tekrar denenmiştir. Önce yıldırım şiddeti sabit tutularak topraklama değeri ve izolatör boyu değiştirilerek hangi izolatör boyunda kaç ohm değerde hatta arıza yaşanacağı tespit edilmiştir. Devamında direk topraklama direnci sabit tutularak yıldırım şiddeti ve izolatör boyunda değişikliklere gidilerek hangi topraklama direncinde arıza yaşanacağı belirlenmiştir. Son olarak ise izolatör boyu sabit tutulmuş ve topraklama direnç yıldırım şiddetinde değişiklik yapılarak hangi boyda izolatörün hangi yıldırım şiddetinde kullanılacağı tespit edilerek bu durumlara ilişkin oluşturulan senaryolara çözüm önerileri sunulmuştur.

Çalışmanın devamı olan ikinci bölümde literatür taraması yapılarak, konuya ilişkin yapılan benzer çalışma örnekleri sunulmuş ve bu çalışmanın literatüre katkısından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde neden Bergeron yöntemi kullanılması gerektiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca geçici durum analizleri ve kullanılan hat modeline ilişkin gerekli bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde hazırlanan PSCAD modeline ilişkin bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde ise modelin sonuçlarına ilişkin tablolar ve sayısal sonuçlar paylaşılmıştır. Son bölümde ise genel değerlendirme yapılarak çalışmanın sınırları, faydaları ve gelecekte yapılacak çalışmalara ilişkin sonuçlar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Enerji iletim hatlarının yıldırımdan korunmasına yönelik çalışmalar geniş bir literatüre sahiptir. Konuyla ilgili bazı önemli çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde Bulunan Konuya İlişkin Bazı Çalışmalar (Some Studies On The Subject In The Literature)

YAZARLAR - YILI	ÇALIŞMANIN KAPSAMI	YAKLAŞIM NOKTASI
(Alves, ve diğerleri, 2025)	Yıldırım erken uyarı sistemleri için karar destek mekanizması	Otomatik karar destek sistemi
(Dan, ve diğerleri, 2024)	Yüksek arazilerdeki direk topraklama elektrotlarının performansı	Method of Moments ve 3-probe
(Chowdhuri & Gross, 1967)	Havai hatlarda yıldırım geri dönüş darbesi	Bipolar dalga
(Chowdhuri P., 1990)	Çoklu iletkenli havai hatlarda yıldırım darbesi	Koruma telinin fonksiyonu
(Cooray, 1994)	Yıldırım kaynaklı aşırı gerilimler	Kublaj modeli
(Djalel, H., & Fayçal, 2007)	Yıldırım geri dönüş darbesinin oluşturduğu elektromanyetik alan	Yıldırım kanal modellemesi
(Erduman & Yıldız, 2019)	IEC62305-2’ye göre yıldırım risk analizi	Risk Analizi
(Chisholm, ve diğerleri, 2010)	Yıldırımın hatlardaki güç kalitesine etkisi	Topraklama ve Zed-Metre
(Luo, 2014)	Yıldırıma karşı korumada topraklama tekniği geliştirilmesi	Yanal topraklama kazığı
(Silveira, ve diğerleri, 2017)	Hibrit elektromanyetik model ve Yıkıcı etki modeli ile topraklama direnç sınırlandırması	BFOR Geri atlama kesinti oranı
(Martínez-Velasco & Castro-Aranda, 2010)	EMTP Zaman domeninde izolatör ve diğer malzeme tercihi için analiz	Monte Carlo yöntemi
(Izadi, ve diğerleri, 2017)	Yıldırıma karşı havai hatlarda izolatör seçiminde cam, seramik ve polimer karşılaştırması	Sonlu elemanlar yöntemi
(Malelak & Zoro, 2017)	Doğrudan yıldırım darbesi, koruma teli arızası ve topraklama direnci	EMT
(Tilev-Tanriover, ve diğerleri, 2015)	Türkiye’de yıldırım çarpmalarına bağlı yaralanma ve ölümler	Yıldırımın toplumsal etkileri
(Yoldaş & Özen, 2023)	Havai hatların güzergâh seçiminde yıldırım faktörü	Yıldırım yoğunluk haritaları
(Yücelbaş, ve diğerleri, 2021)	Meteorolojik parametrelerle yıldırım tahmini	Yıldırım erken uyarı sistemi
(Yan, Vukovic, & Sewell, 2024)	Yıldırım sonrası plazma oluşumu ve Elektromanyetik alan	Elektrotermal model

2.1. Yıldırımın Enerji İletim Hatlarına Etkisi (Impact of Lightning on Power Transmission Lines)

Yıldırım, havai enerji iletim hatlarında aşırı gerilimler oluşturarak sistem arızalarına, enerji kesintilerine ve ekipman hasarına neden olmaktadır. Çeşitli araştırmalar, yıldırımın enerji iletim hatlarına etkisini farklı açılardan incelemiştir. Bunların başında (Djalel, H., & Fayçal, 2007), yıldırımın oluşturduğu elektromanyetik alanların enerji iletim hatlarında neden olduğu aşırı gerilimleri analiz etmiştir. Çalışma, izolatörlerin yalıtım koordinasyonunun iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamakta ve yıldırımın geri dönüş darbesi modellemelerini karşılaştırmaktadır. Ancak, farklı yıldırım akım seviyelerinin izolatör boyu ve direk topraklama direnciyle nasıl etkileşime girdiği bu çalışmada ele alınmamıştır. Bir diğer çalışmada ise (Luo, 2014), enerji iletim hatlarını yıldırımdan korumada topraklama sistemlerinin önemini vurgulamış ve yanal topraklama kazıkları ile koruma performansının

artırılabilceğini göstermiştir. Ancak, topraklama direncinin yıldırım akım şiddetiyle nasıl değiştiği detaylı şekilde incelenmemiştir. Türkiye ölçeğinde yapılan çalışmalardan biri olan (Yoldaş & Özen, 2023), havai hat güzergâh seçiminde yıldırım yoğunluk haritalarının kullanılmasını önermektedir. Çalışma, yıldırım istatistiklerine dayalı olarak hat tasarımında proaktif önlemler alınmasının önemini vurgulamakta, ancak izolatör ve topraklama direnci parametreleri üzerine odaklanmamaktadır.

Yıldırımın havai hatlarda geri dönüş darbesi oluşturduğunu ve bunun aşırı gerilimlere neden olabileceğini (Chowdhuri & Gross, 1967) göstermiştir. Daha sonra (Chowdhuri P., 1990), çoklu iletkenli havai hatlarda yıldırım darbelerinin nasıl yayıldığını incelemiş ve koruma tellerinin etkisini analiz etmiştir. Yıldırım çarpmasının fiziksel ve elektromanyetik etkilerini inceleyen bir diğer çalışma ise (Yan, ve diğerleri, 2024) tarafından önerilen iki boyutlu elektrotermal modeldir. Bu model, yıldırım çarpması sırasında oluşan plazma kanalını Drude modeli kullanarak simüle etmekte ve elektromanyetik alan ile sıcaklık değişimlerini zaman içinde analiz etmektedir. Bu tür simülasyonlar, havai enerji iletim hatlarında yıldırım sonrası oluşabilecek aşırı gerilimlerin ve ısınma etkilerinin daha gerçekçi şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. (Yan, ve diğerleri, 2024) çalışması bu çalışmanın devamında gelecek araştırmalar için yön gösterici olacaktır.

(Cooray, 1994) çalışmasında ise yıldırım kaynaklı aşırı gerilimleri öngörmek için kullanılan mevcut modelleri kıyaslamış ve bazı modelleme yöntemlerinin eksikliklerini vurgulamıştır. Daha güncel çalışmalardan biri olan (Yücelbaş, ve diğerleri, 2021), meteorolojik parametreleri kullanarak yıldırım düşme mesafesini tahmin etmeye yönelik bir model geliştirmiştir. Bu çalışma, yıldırımın düşme olasılığını öngörmeye yönelik önemli bir katkı sağlasa da enerji iletim hatlarının yıldırıma karşı korunması açısından spesifik mühendislik çözümleri sunmamaktadır. Standartlar üzerinden (Erduman & Yıldız, 2019) tarafından yapılan bir diğer çalışma, IEC 62305-2 standardına göre yıldırım risk analizlerini ele almış ve bir üniversite kampüsü için yıldırım risk değerlendirmesi yapmıştır. Ancak bu çalışma, doğrudan enerji iletim hatları üzerinde değil, bina ve tesisler açısından risk analizi sağlamaktadır. Türkiye’de yıldırım kaynaklı ölüm ve yaralanmalar üzerine yapılan bir analizde, (Tiliev-Tanriover, ve diğerleri, 2015), 1930-2013 yılları arasında Türkiye’de yıldırım çarpması nedeniyle 1000’den fazla ölüm vakasının rapor edildiğini belirlemiştir. Ölümün büyük çoğunluğu açık alanlarda meydana gelmiştir. Çalışma, yıldırımın genel etkilerine dair kapsamlı bir istatistiksel analiz sunmaktadır; ancak mühendislik çözümleri açısından doğrudan bir öneri içermemektedir.

2.2. Yıldırımdan Korunma Stratejileri (Lightning Protection Strategies)

Enerji iletim hatlarını yıldırımdan koruma stratejileri, genellikle topraklama sistemlerinin iyileştirilmesi, izolatör tasarımının optimize edilmesi ve yıldırım erken uyarı sistemlerinin kullanılması üzerine yoğunlaşmaktadır. (Chisholm, ve diğerleri, 2010), iyileştirilmiş topraklamanın koruma telleri ile kullanılması halinde yıldırım kaynaklı arızaların önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir ancak mevcut topraklama hesaplama ve ölçüm yöntemleri, özellikle eğimli ve yüksek rakımlı arazilerde önemli hatalara neden olabilmektedir. (Dan, ve diğerleri, 2024) tarafından yapılan çalışma, kule topraklama elektrotlarının yüksek rakımlı arazilerde nasıl farklı davrandığını ve yaygın olarak kullanılan 3-probe yöntemi ile yapılan ölçümlerin bu tür arazilerde doğruluk açısından sınırlamalar taşıdığını ortaya koymuştur. Çalışma, eğimli arazilerde geleneksel topraklama hesaplama yöntemlerinin kullanılması durumunda, yıldırımın oluşturduğu gerilim yükselmelerinin yanlış değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, yıldırım çarpmasının etkilerini en aza indirebilmek için doğru ölçüm ve hesaplama yöntemleri geliştirilmelidir. Ancak, bu çalışmada hangi topraklama direnci seviyelerinde arızaların tamamen önlenilebileceği belirtilmemiştir. (Martínez-Velasco & Castro-Aranda, 2010), EMTP simülasyonları kullanarak farklı izolatör tiplerinin yıldırım dayanıklılığı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Bulgular, izolatörlerin mekanik yapısının yıldırım karşısında büyük önem taşıdığını göstermiştir. Ancak, bu çalışmada farklı yıldırım akım seviyelerine göre optimal izolatör boyu belirlenmemiştir. Farklı bir strateji olarak (Izadi, ve diğerleri, 2017), cam, seramik ve polimer izolatörlerin yıldırıma karşı dayanıklılığını karşılaştırmış ve polimer izolatörlerin daha üstün performans gösterdiğini tespit etmiştir. Ancak, bu çalışma yalnızca malzeme özelliklerine odaklanmış olup, izolatör boyu ve direk topraklama direncinin yıldırım performansına etkisini incelememiştir. (Alves, ve diğerleri, 2025) tarafından yapılan güncel çalışmada, otomatik karar destek sistemleri kullanılarak yıldırım erken uyarı sistemleri geliştirilmiştir. Çalışma, meteorolojik ve elektriksel verileri analiz ederek olası yıldırım düşme noktalarını tahmin etmeye odaklanmaktadır. Ancak, bu modelin enerji iletim hatlarında nasıl uygulanabileceği ayrıntılı şekilde ele alınmamıştır.

2.3. Mevcut Literatürdeki Eksiklikler ve Bu Çalışmanın Katkısı (Gaps in the Existing Literature and Contribution of This Study)

Yukarıda özetlenen çalışmalar, yıldırımın enerji iletim hatlarına etkilerini ve yıldırımdan korunma yöntemlerini kapsamlı şekilde ele almaktadır. Ancak, literatürde belirli yıldırım akım seviyelerinde hangi izolatör boyu ve topraklama direnci kombinasyonunun optimal koruma sağladığına dair eksiklikler bulunmaktadır.

Bu çalışma, bu eksiklikleri gidermek amacıyla aşağıdaki katkıları sunmaktadır:

- Farklı yıldırım akım seviyeleri için optimal izolatör boyu ve direk topraklama direnci sınırlarını belirlemek
- Bergeron yöntemi ve PSCAD simülasyonlarını kullanarak, enerji iletim hatlarının yıldırıma karşı hassasiyetini mühendislik temelli verilerle ortaya koymak
- Gerçek hat verileri kullanılarak, yıldırım şiddeti ile arıza oluşum eşiği arasındaki korelasyonu modellemek

Bu bağlamda, çalışma enerji iletim hatlarının yıldırımdan korunmasına yönelik daha kesin mühendislik parametreleri sunarak mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Yıldırım, mikrosaniye mertebesinde yüksek akım (kiloamper) ve gerilim atlaması (megavolt) oluşturan ani bir elektriksel boşalmadır. Bu boşalmalar, enerji iletim hatlarında geçici durum etkilerine neden olur. Bu nedenle, yıldırım kaynaklı arızaların analizinde geçici durum tepkilerinin modellenmesi büyük önem taşır. Bir sistemin geçici durum cevabı, giriş sinyalinin uygulanmasından durağan hale gelene kadar geçen süreçte gösterdiği davranıştır. Yüksek gerilim elemanlarının analizi için her bileşenin uygun bir güç sistemi içinde modellenmesi gerekmektedir (Yu & Watson, 2007; Farzanehrafat & Watson, 2013). Elektrik güç sistemleri; kaynak (generatör), güç transformatörü, iletim hattı ve yük bileşenlerinden oluşur (Özen, 2017). Bu bileşenlerin her biri, geçici durum analizinde belirleyici bir rol oynar. İletim hatları uzunluklarına göre sınıflandırılır (Enyong, 2017). İletim hatları, uzunluklarına bağlı olarak kısa, orta ve uzun mesafeli hatlar şeklinde sınıflandırılır. 0-80km arası olan kısa iletim hattı modelinde hat bir direnç ve ona seri bağlı bir bobinle modellenir. 80-240km arası orta uzunluktaki iletim hatları nominal π ve T eşdeğer devreleriyle ifade edilir. 240km ve üstü olan hatlar ise uzun iletim hattı olarak tanımlanırken, hat sabitlerinin homojen olarak dağıldığı modellerle analiz edilir (Leonidopoulos, 2019).

Uzun iletim hattı modeli, farklı hat uzunlukları için kullanılabilir. Daha kesin analizler yapmak için gezen dalga teorisine dayalı dağıtılmış hat modeli tercih edilir (Junzhang & Zhonghui, 2010; Zhong, ve diğerleri, 2014). Kısa mesafeli hatlar için de dağıtılmış parametrelere dayanan π modeli uygulanabilir (Yu & Watson, 2007; Monzani, 2012). Geçici durumların analizi için kullanılan Bergeron Modeli'nde, iletim hatlarının noktasal dağıtılmış parametreleri ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Junzhang & Zhonghui, 2010; Shariatinasab & Gholinezhad, 2017).

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Geçici durum analizinde yaygın olarak kullanılan Bergeron Modeli, iletim hatlarının noktasal dağıtılmış parametrelerini temel alır (Junzhang & Zhonghui, 2010). Bu model, dalga yayılım süresi ve karakteristik empedansı dikkate alarak yıldırım kaynaklı aşırı gerilim ve akım değişimlerini hesaplar (Watson & Arrillaga, 2003). Frekans Bağımlı Model, iletim hattı parametrelerinin frekansa bağlı değişimini dikkate alarak yüksek frekanslı bileşenleri daha ayrıntılı analiz edebilir. Ancak bazı dezavantajları vardır. Daha karmaşık matematiksel işlemler gerektirir ve PSCAD gibi simülasyon yazılımlarında hesaplama süresini uzatır. Yüksek frekanslı bileşenler için avantaj sağlasa da, ana şebeke frekansında (50-60 Hz) çalışan güç sistemleri için her zaman kritik değildir.

Bergeron Modeli ise geçici aşırı gerilimlerin analizi için daha stabil ve hesaplama açısından daha verimli bir seçenek sunar. Özellikle enerji iletim hatlarının temel frekans bileşenleri dikkate alındığında, Bergeron Modeli'nin sonuçları, saha ölçüleriyle daha iyi uyumaktadır. Bunun nedeni, bu modelin dalga yayılım süresini ve karakteristik empedansı doğrudan modellemesi, ancak yüksek frekans bileşenleri için gereksiz karmaşıklıkları içermemesidir. Buna ek olarak, PSCAD gibi elektromanyetik transient analizlerinde kullanılan yazılımlarda, Bergeron Modeli'nin numerik stabilitesi daha yüksektir. Frekans Bağımlı Model kullanıldığında bazı durumlarda stabilite sorunları ve hesaplama hataları ortaya çıkabilmektedir. Özellikle uzun süreli simülasyonlar ve karmaşık şebeke modellerinde, Frekans Bağımlı Model yerine daha az hesaplama yükü gerektiren Bergeron Modeli'nin kullanılması pratik mühendislik açısından daha uygundur.

Bu nedenlerle çalışmada Bergeron Modeli kullanılmış ve elde edilen sonuçlar saha verileri ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

Elektrik güç sistemlerinde RLC (direnç, endüktans, kapasitans) bileşenleri, kısa iletim hatları için genellikle π (π) ve T modelleri ile ifade edilir (Dommel, 1969). Ancak 15 km ve üzeri iletim hatlarında, Bergeron Modeli daha uygun bir yaklaşımdır çünkü dalga yayılım süresi (traveling wave time) çözüm adım süresinden daha büyük hale

gelir (Mamiş vd., 2010). İletim hatları yeterince uzunsa, gezen dalğanın hareket süresi çözüm süresi adımından daha büyük olacaktır. Örneğin; adım zamanı 50 μ s'lik genel bir çözüm durumunda, gezi zamanı için minimum hat uzunluğu limiti c^{-1} 'dir (c ışık hızı: 3×10^8 m/s). Bundan dolayı 15 km'den büyük hatlarda Bergeron Modeli kullanılmaktadır.

Bergeron Modeli'nde dağıtılmış LC (Endüktans ve Kapasite) hattı modeli 2 kavramla tanımlanır. İlki karakteristik empedans $Z_c = \sqrt{l/c}$ diğeri ise faz hızı $v = 1/\sqrt{lc}$ 'dir. l uzunluğu (metre) ve c ışık hızı (m/s) değişkenleri ile tanımlanmış olup, bunlar sırasıyla birim uzunluk başına hat empedansı ve hat kapasitansını temsil etmektedir. Şekil 5, 2 portlu kayıpsız Bergeron Modeli eşdeğer devresidir. Gelen bara ve giden bara arasındaki iletim hattının gezi zamanı, eşitlik 1'de belirtilmiştir (Mamiş vd., 2010). Dalga gezi süresi:

$$\tau = l/v = l/\sqrt{lc} \quad (1)$$

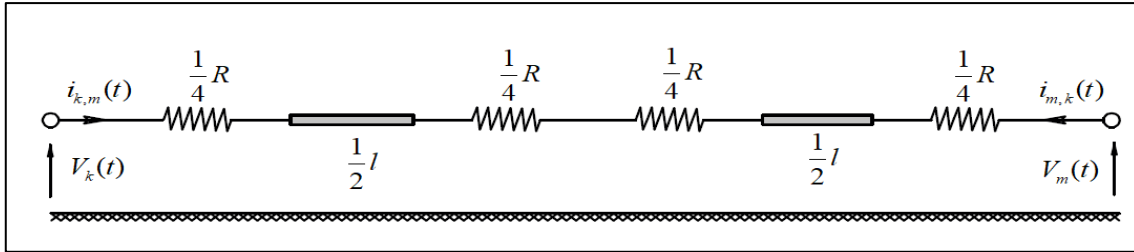
Bu çalışmada standart bir iletim hattı modelinde bulunan kaynağına seri L endüktansı ve paralel RC yükü eklenerek şekil 3 elde edilmiştir (Mamiş vd., 2010) Şekil 3'te kullanılan formüller eşitlik 2 ve 3:

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{l}{\sqrt{yc}} \quad (2)$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \quad (3)$$

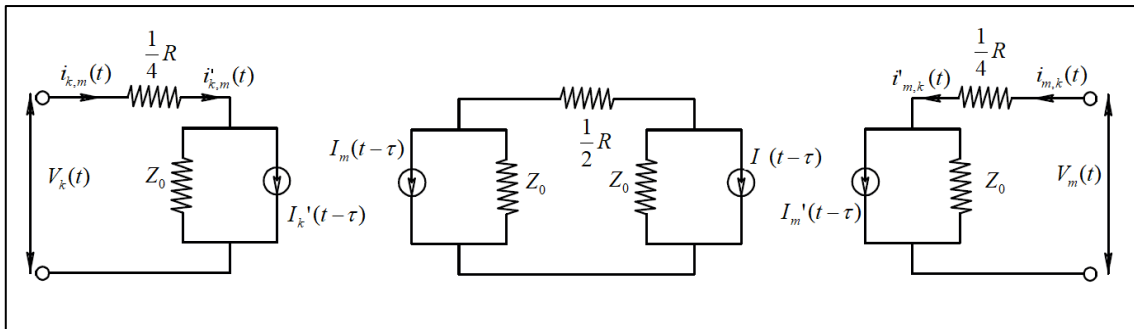
β : Geri dönüş darbe hızının ışık hızına oranı

Bergeron Modeli'nin sağladığı avantajlardan biri de çalışmaya hat direncinin dahil edilmesiyle ortaya çıkar. Bu nokta "Karakteristikler Yöntemi" ile yakından ilişkilidir. Hat boyunca dağıtılmış endüktans ve kapasite (L-C) ile gösterilen ideal modele sistem kayıpları için bir "R" direncini ekleyerek toplu direnç özelliğini dahil eder. Karakteristikler yöntemi üzerine eklenen seri toplu dirençler ile kayıplara daha doğru yaklaşımlar sunmaktadır. Toplam sistem direnci R olarak verildiğinde kayıpsız hat her iki uçta da $\frac{1}{4}R$ direnci olan ikiye ayrılır. Bu kısımlar birleştirildiğinde ortada 2 adet $\frac{1}{4}R$ ve her 2 uçta $\frac{1}{4}R$ toplu dirençleri oluşturur. Burada R iletim sisteminin toplam direnci olup ek direnç elemanları ile sistemin 2 ayrı kısma ayrılmasını şekil 2'de gösterilen kayıpsız hattın norton gösteriminde değişikliğe neden olur.



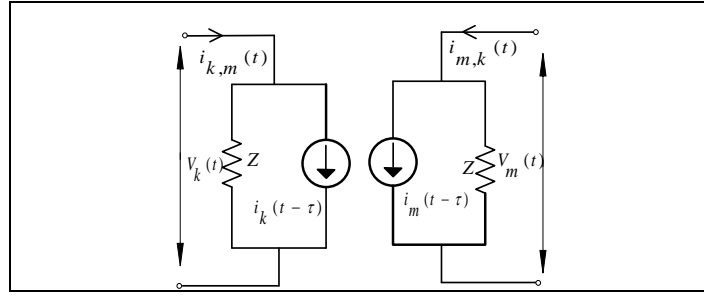
Şekil 2. Toplu direnç dahil edilmiş kayıpsız hat modeli (Loss-Less Line with Lumped Resistance Included)

Toplu hat direncine sahip kayıpsız hat modelinin eşdeğer devresi şekil 3 de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kayıpsız direnç ekli eşdeğer devre (Loss-Less Line with Lumped Resistance Equivalent Circuit)

Şekil 3'teki model 2 bağlantı noktalı olarak tekrar modellenirse şekil 4 elde edilir.



Şekil 4. 1 fazlı EMT Bergeron Modeli Zaman alanı (Single Phase EMTDC Bergeron Model Time Domain Interface)

Hattın her iki ucundaki Norton empedansı Z altta verilmektedir (Özen, Elektrik Elektronik Mühendisliğine Giriş, 2021).

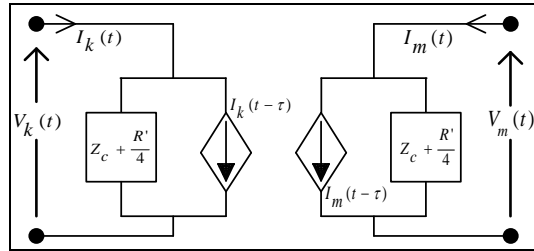
$$Z = Z_0 + \frac{R}{4} \quad (4)$$

Norton empedansı olan Z 'deki değişiklik Norton akım enjeksiyonları I_k ve I_m 'nin tanımına aşağıdaki şekilde yansıtılır:

$$I_k(t - \tau) = \left(\frac{1+H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_m(t - \tau) - H \cdot i_{m,k}(t - \tau)\right\} + \left(\frac{1-H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_k(t - \tau) - H \cdot i_{k,m}(t - \tau)\right\} \quad (5)$$

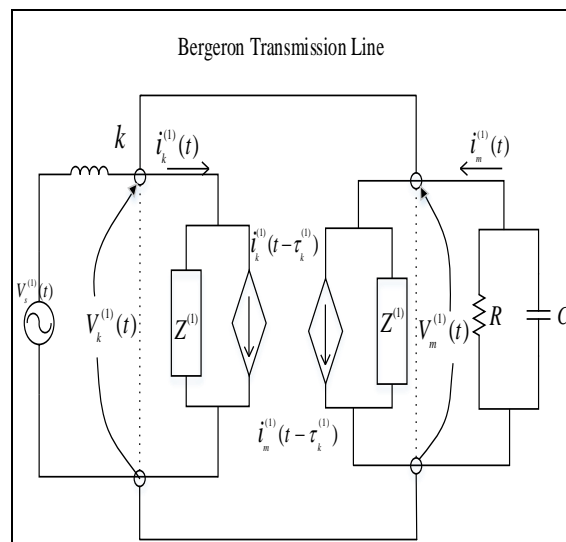
$$I_m(t - \tau) = \left(\frac{1+H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_k(t - \tau) - H \cdot i_{k,m}(t - \tau)\right\} + \left(\frac{1-H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_m(t - \tau) - H \cdot i_{m,k}(t - \tau)\right\} \quad (6)$$

$$H = \frac{Z_0 - \frac{R}{4}}{Z_0 + \frac{R}{4}} \quad (7)$$



Şekil 5. Çift Portlu Kayıpsız Eşdeğer Bergeron Modeli Devresi (Two-Port Lossless Equivalent Bergeron Model Circuit)

Bu çalışmada ele alınan Bergeron iletim hattı modeli, gerilim kontrollü gerilim kaynağı, seri endüktans ve paralel RC yüküyle Şekil 6'te pozitif sekans için tanımlanmıştır (Shariatinasab & Gholinezhad, 2017).



Şekil 6. Pozitif Sekans İletim Hattı İçin Bergeron Eşdeğer Devre Modeli (Bergeron Equivalent Circuit Model for Positive Sequence Transmission Line)

İndüktans akımı ve kapasitör gerilimi durum değişkenleri seçilerek diferansiyel eşitliklerle ifade edilir. Bergeron Modeli için tek fazlı durum eşitlikleri eşitlik 8'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_k}{dt} \\ \frac{dv_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c} \left(\frac{Z+R}{ZR} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ v_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{Z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s(t) \\ I_k(t-\tau) \\ I_m(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Bağımlı değişken eşitlikleri veya çıkış eşitlikleri, gönderilen uç gerilimi ve alınan uç gerilimleri eşitlik 9'da ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_k \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ v_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s(t) \\ I_k(t-\tau) \\ I_m(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (9)$$

i_k ve i_m gönderen ve alan uç akımları, V_k ve V_m gönderen ve alan uç bara gerilimleridir. Akım kaynakları, tek ve çok fazlı sistemlerin elektromanyetik transienlerinin analizinde belirtildiği gibi altta kabul edilmiştir (Mamiş vd., 2010) (Watson & Arrillaga, 2003) (Dommel, 1969).

$$I_k(t-\tau) = \frac{-Z_c}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_m(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_m(t-\tau) \right] + \frac{\frac{R'}{4}}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_k(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_k(t-\tau) \right] \quad (10)$$

$$I_m(t-\tau) = \frac{-Z_c}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_k(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_k(t-\tau) \right] + \frac{\frac{R'}{4}}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_m(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_m(t-\tau) \right] \quad (11)$$

Karakteristikler yöntemi, kayıpsız (idealize) bir hattın modellenmesi için geçerlidir. Bu yöntemle kayıplı bir hat için de ayrı dirençlerle bağlanmış hatların parçaları incelenir. Efektif hat seri direnci, toplu dirençler ile temsil edilir. Hat zayıflamasının etkisi ise hat uçlarına $R'/4$ ve hattın ortasına $R'/2$ eklenerek ifade edilir. Sonuç olarak, Şekil 2'den şekil 5'teki $Z_c + R'/4$ empedansı üzerinden geçen akımlar belirlenir.

Eşitlik 8 ve 9, iki baralı tek fazlı Bergeron iletim hattı modelinin eşitlik gösterimidir ve üç fazlı sistemler için de kullanılabilir. Bergeron Modeli toprak arızası, aşırı gerilim ve yıldırım değerlendirmesinde Conseil International des Grands Reseaux Electriques (CIGRE) tarafından önerilmektedir ve Bergeron Modeli'nin önerildiği diğer konularla birlikte gösterilmektedir (Yoldaş A., 2019). CIGRE'nin raporlarına göre, temel frekans analizlerinde, yük akışı hesaplamalarında, rölelerin test edilmesinde ve yeraltı kablolarındaki aşırı akım arızalarının belirlenmesinde güvenilir ve doğru sonuçlar elde edilmiştir (Furgal, 2020).

Bergeron Modeli durum eşitliğinde, belirleyici olan sabit frekanslı sistemler için modelleme yapmaktır. Z_0 gibi hesaplanan tüm parametreler sabit frekansta bulunur (Bu çalışma için 50Hz). Bergeron Modeli, özellikle enerji iletim hatlarının yıldırım darbeleri gibi kısa süreli olaylara verdiği tepkiyi analiz etmek için uygun bir yöntemdir. Bergeron Modeli, iletim hattının karakteristik empedansını ve dalga yayılım süresini dikkate alarak, dalga yayılımını modelleyen bir yöntemdir (Velasco, 2019).

Alternatif olarak Frekans Bağımlı Model (Frequency Dependent Model) de kullanılabilir. Ancak Frekans Bağımlı Model, iletim hattının parametrelerinin frekansa bağlı değişimini dikkate alarak özellikle yüksek frekanslı bileşenleri daha detaylı analiz edebilmesine rağmen, hesaplama süresi açısından daha maliyetlidir ve PSCAD gibi simülasyon yazılımlarında stabilite sorunlarına neden olabilir (Tossani vd., 2018). Özellikle yüksek frekans bileşenleri ve fazlar arası kuplajın kritik olduğu durumlarda avantajlı olmasına rağmen, bu model aşırı karmaşık hesaplamalar gerektirir ve pratik mühendislik uygulamalarında her zaman tercih edilmez (Cooray, 1994).

Bergeron Modeli'nin bu çalışmada tercih edilmesinin başlıca nedenleri, Enerji iletim hatlarının kısa süreli geçici durum analizlerinde güvenilir sonuçlar vermesidir. Ayrıca temel frekans bileşenlerine (50 Hz - 60 Hz) odaklanarak mühendislik uygulamalarında pratik olması ve daha düşük hesaplama yükü ile hızlı ve stabil çözümler sunmasıdır. Bunlarla birlikte gerçek arıza verileri ile doğrulandığında güvenilir sonuçlar vermesi Bergeron Modelinin geçici aşırı gerilimlerin analizinde mühendislik uygulamaları açısından en uygulanabilir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Djalel, ve diğerleri, 2007; Silva, 2016). Bergeron Modeli'nin bir diğer avantajı da geçici durum analizlerinde gecikmeleri dikkate almasıdır. Aynı zamanda dezavantaj olarak yüksek frekanslarda yapay rezonanslar getirebilir (Watson & Yu, 2008). Yıldırım frekansı önceden bilinmediği için Bergeron Modeli'nde sistem durum vektörünü ilişkilendirmek için "z" gibi ölçüm vektör kümesinin olduğu bir "x" fonksiyonu kullanılır (Yoldaş A., 2019). Bu durum, Eşitlik (12)'da gösterilmiştir.

$$z = [H]\chi + \varepsilon \quad (12)$$

Burada, $[H]$ ölçüm matrisi ve ε ise hata vektörüdür. Eşitlik 8'de d_{ik}/dt operatörünü içeren iletim hattının önceki durum formülasyonu, $t-\Delta t$ zamanındaki önceki sistem durumu açısından eşitlik 9 olarak düşünülebilir ve eşitlik 13 ve 14'teki gibi yeniden yazılır.

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(t)+i(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} \approx \frac{V(t)+V(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (14)$$

Bu çalışmada, üç fazlı iletim hattının sürekli eşitliklerini ayrıık eşitliklere dönüştürmek için modal dönüşüm tekniği ele alınmıştır. Bu sayede fazlar arasındaki ilave gerilim indüklenme etkisi ihmal edilebilmiştir. Üç fazlı gerilim ve akım üç bağımsız mod olarak hesaplanabilir ve her mod, tek fazlı bir iletim hattı olarak değerlendirilir (Dommel, 1969) (Suyaraj vd., 2017).

Modal ve faz arasındaki ilişki, Eşitlik (15) ve (16)'da gösterilmiştir.

$$[V_{mode}] = [T]^{-1}[V_{phase}] \quad (15)$$

$$[i_{mode}] = [T]^{-1}[i_{phase}] \quad (16)$$

Burada, V_{mode} , i_{mode} , V_{phase} ve i_{phase} sırasıyla modal gerilimi, modal akımı, faz gerilimi ve faz akımını gösterir. $[T]$ modal dönüşüm matrisidir ve $[T]^{-1}$ ise $[T]$ matrisinin tersi olarak kabul edilir. Transpoze üç fazlı bir hat için $[T]$ ifadesi ile matrisin tersi, eşitlik 17'de belirtilmiştir (Mamiş vd., 2013).

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} [T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

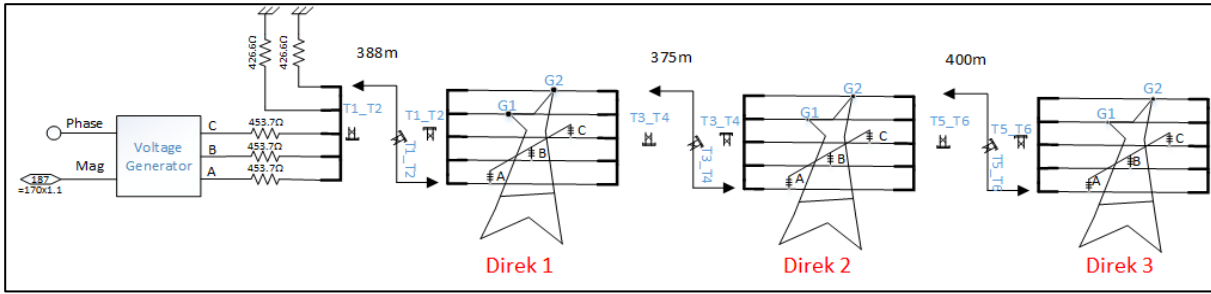
Bu yaklaşımlar göz önüne alındığında Bergeron iletim hattı, durum uzay eşitliğinde bir mod bölgesi olarak oluşturulabilir ve eşitlik 18 olarak tanımlanır.

$$\begin{bmatrix} i_k^{(0)} \\ i_k^{(1)} \\ i_k^{(2)} \\ V_k^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_k^{(2)} \end{bmatrix} t - \Delta t \begin{bmatrix} -\frac{Z^{(0)}}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} \frac{Z^{(0)}+R}{Z^{(0)R}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k^{(0)} \\ i_k^{(1)} \\ i_k^{(2)} \\ V_k^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_k^{(2)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

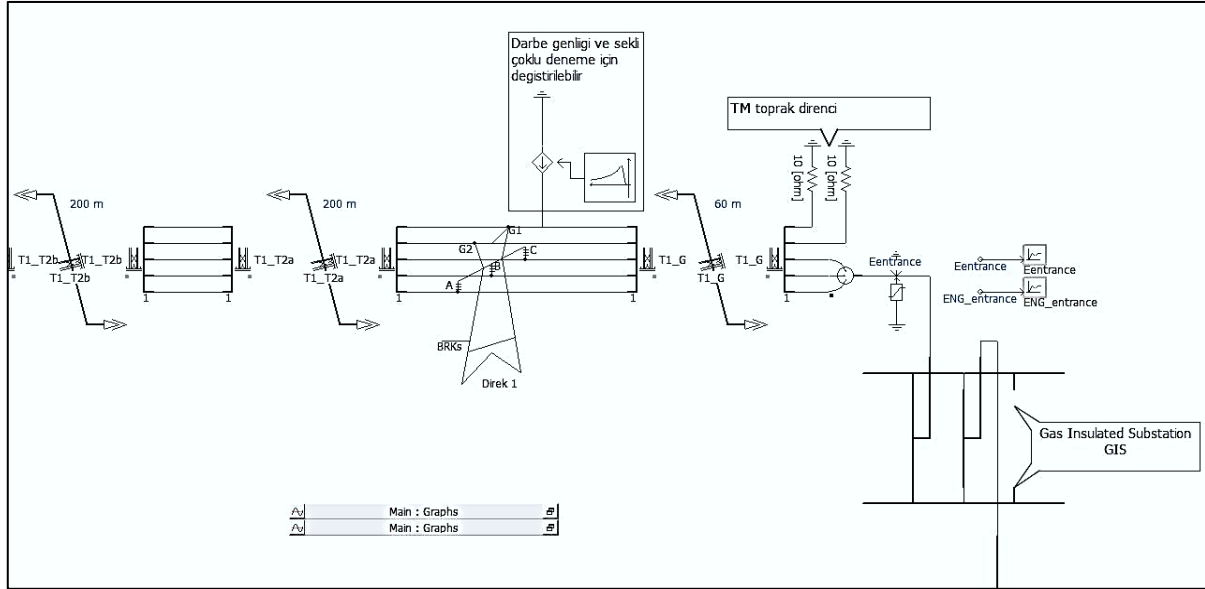
Eşitlik 18'teki üst simgeler ((0), (1) ve (2)) sırasıyla sıfır, pozitif ve negatif dizi parametrelerini belirtir. Her dizide $L^{(0)}=L^{(1)}=L^{(2)}=L$ olarak bir seri endüktans belirtilir. Her seri için direnç ve kapasitör ise sırasıyla $R^{(0)}=R^{(1)}=R^{(2)}=R$ ve $C^{(0)}=C^{(1)}=C^{(2)}=C$ olarak atanır. Model çözümlemesi V_k ve i_k olarak tamamlanır.

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

PSCAD programı ile EMTDC (Electromagnetic Transients including DC) analiz problemleri çözülmektedir. Güç sistemlerinde kısa süreli olayların analizini yapmak için kullanılan EMTDC tabanlı yazılımlar özellikle anlık gerilim değişimleri, kısa devreler, geri besleme olayları gibi hızlı dinamiklerin simülasyonunu gerçekleştirmek için kullanılır. EMTP yazılımı diferansiyel denklemler, zaman alaşımli çözümler, nümerik integrasyon, durum uzay modelleri, Fourier ve Laplace dönüşümleri kullanılır (Chowdhuri P. , 1996). Ayrıca zaman ve fazör düzleminde μs ölçeğinde incelemeler yapılabilmektedir (Yoldaş A. , 2019). Yıldırımın genel yapısı, oluşma ve arıza süreleri göz önüne alındığında bu ihtiyaca cevap vermekte ve seri modelleme yapılabilmektedir (Araneo vd., 2019). Şekil 7 iletim hattının PSCAD ile genel modellenmesi, Şekil 8 ise PSCAD ortamında arıza noktasının tasarımı sunulmuştur.

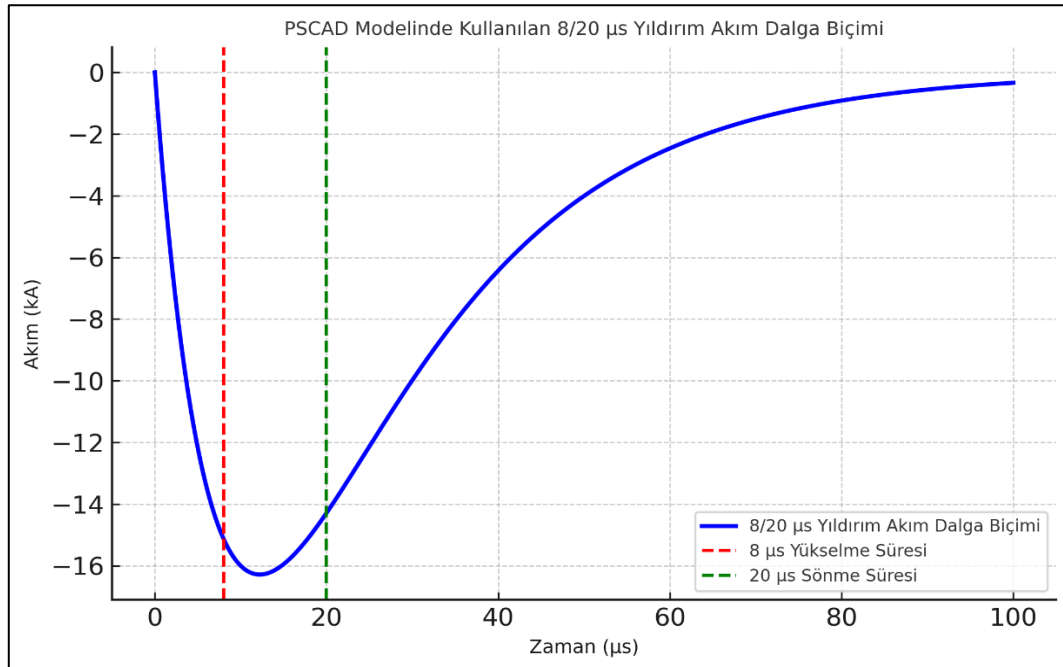


Şekil 7. Genel PSCAD Hat Modeli (General PSCAD Transmission Line Model)



Şekil 8. Arıza Noktaları ile PSCAD Hat Modeli (PSCAD Transmission Line Model with Failure Points)

Yıldırımın hatta düşürülmesinin simülasyonu için PSCAD ortamında paket olarak hazır bulunan akım darbe generatörü kullanılmıştır. Ayrıca yıldırım modellemesi yapılırken (IEEE Standard 1410, 2010) standardında verilen yıldırım modeli kullanılmıştır. Arıza kayıtlarına göre hattın en yüksek yıldırıma maruz kaldığı noktalar belirlenmiş ve modelleme bu noktalara göre hazırlanmıştır. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan yıldırım bilgileri doğrultusunda net yıldırım akımı simülasyona dahil edilmiştir (MGM, 2025).



Şekil 9. PSCAD Modelinde kullanılan 8/20µs yıldırım akım dalga biçimi (8/20µs Lightning Current Waveform Used in the PSCAD Model)

Yıldırımın enerji iletim hatları üzerindeki etkilerini analiz etmek için IEEE Standard 1410 (2010) ve IEC 62305-1 (2010) yönergelerine uygun olarak yıldırım darbe akımı modeli kullanılmıştır. Yıldırım akımı zaman içinde değişen eksponansiyel bir dalga biçimi gösterir ve tipik olarak 10/350 µs veya 8/20 µs darbe akımları kullanılır (Chowdhuri, 1996; Cooray, 1994). Bu çalışmada PSCAD ortamında yıldırım darbesi modellenmesi yapılırken şekil 9'da gösterilen 8/20 µs standardında darbe akımı formu tercih edilmiştir. Bu dalga biçimi doğrudan yıldırım darbesini temsil eden bir akım dalgasıdır ve özellikle elektriksel izolasyon ve aşırı gerilim hesaplamalarında sıkça kullanılır (Marshall & Stolzenburg, 2001). Yıldırım akımı aşağıdaki eksponansiyel fonksiyon ile modellenmiştir:

$$I(t) = I_0 x (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (19)$$

Burada:

I_0 : Yıldırımın tepe akımı (kA)

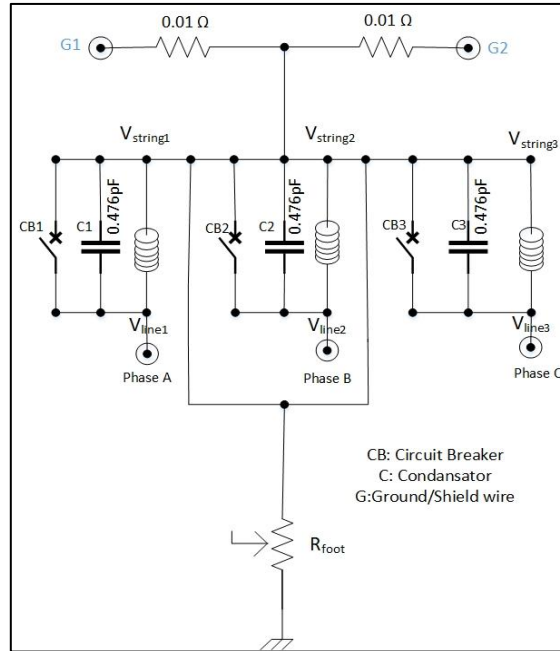
t: Zaman (µs)

α ve β : Yükselme ve düşme katsayısı

Yıldırım, havai hattın koruma teline gelecek şekilde tasarlanarak oluşan arızalar değerlendirilmiştir. İşletmede kullanılmakta olan hat karakteristiği 1x154 kV, 1272 MCM olup PA tipi direkler sahada bulunmaktadır. PA serisi direkler 154kV hatlarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. PA, PB, PC tipi direkler hafif, orta, ağır taşıyıcı direkler, PD ve PE tipi direkler ise durdurucu ve ağır durdurucu direklerdir (Arı, 2012). Direğin ve izolatörün PSCAD modellenmesi Şekil 10'da gösterilmektedir.

İzolatör üzerinde arızanın incelenebilmesi için devrede 1460 mm izolatörden başlayarak eşdeğer kondansatörler kullanılmıştır. Atlama mesafesini arttırmak için İzolatör boyu arttıkça kapasitans değeri de yükselmektedir. Direk üzerinde izolatör modeli tasarlanırken, ayarlanabilir kondansatörün paraleline yaylı, SF6 gazlı, devre kesici modeli yerleştirilmiştir. Atlama mesafesi ve zamana göre gerilim artış hızına bağlı olarak kesici çalışmaktadır (Simka, Straumann, & Franck, 2012). Kesici devreye girdiğinde yani atlama gerçekleştiğinde yük akışı durdurmaktadır. Bu durum grafikler yardımıyla incelenmiş, direk ve temel topraklama dirençleri kaynaklı oluşan istenmeyen gerilimin tepe değerleri tespit edilmiştir. Arıza noktaları da gerilimin pik yaptığı değerlerdir.

İlk model hazırlanırken direğe doğrudan gelen yıldırım baz alınmış ve diğer direkler arıza incelemesi için konuya dâhil edilmemiştir. İnceleme MKR'den alınan bilgiler doğrultusunda yapılmıştır (Zhao vd., 2011). Çalışmanın amacı, izolatör ile direk direnci arasında yıldırım akım bilgisine göre referans olabilecek değerler bulmaktır. Bu noktadaki amaç yine sınır değer tespiti ile arızaların önüne geçmektir.



Şekil 10. PSCAD Direk Modeli (PSCAD Tower Model)

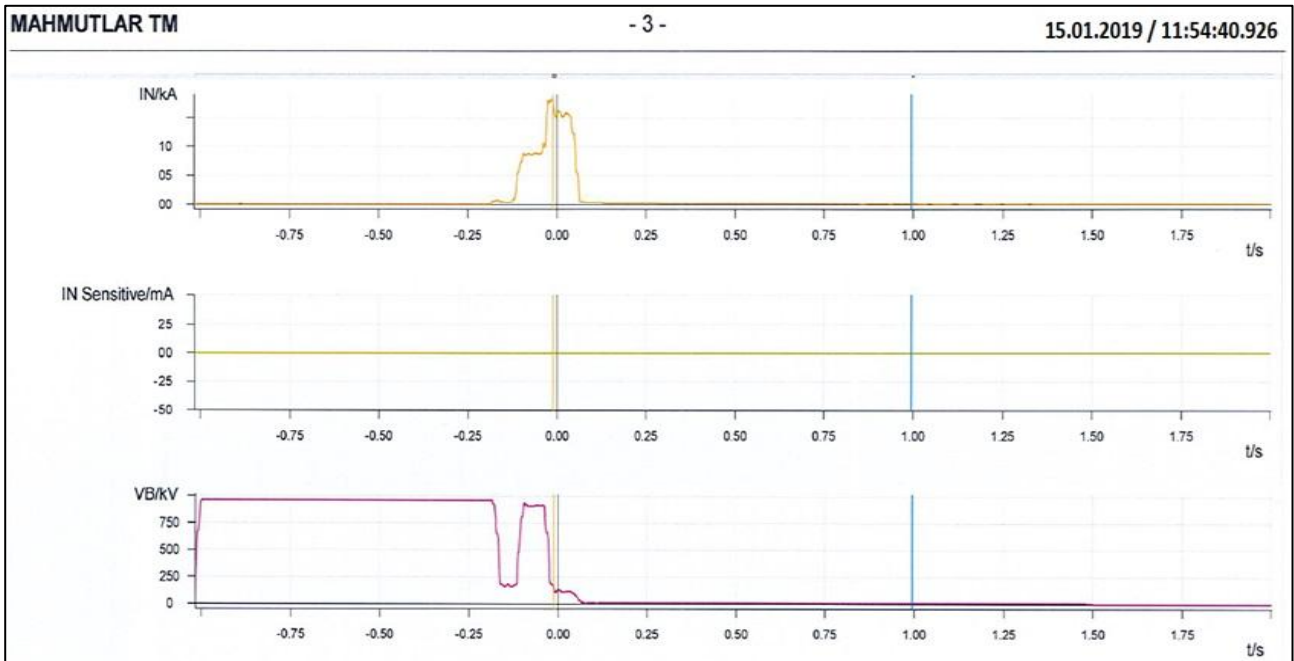
Yıldırım, öncül lider veya öncül yayılma adı verilen deşarjlar ile yaklaşık her 40 µs'de bir meydana gelir ve bu süreç ortalama 10-20 milisaniye devam eder (Shehab, 2013). Bu olayı elektriksel açıdan incelediğimizde (direk ve yıldırım kanalı birer elektrot olarak düşünülürse), ya tek elektrottan gelen lider akım diğer elektroda ulaştığında, ya da her iki uçtan gelen akım, izolasyon boşluğunun ortasında karşılaşıncaya devre tamamlanır. Bu karşılaşma

noktası, arızanın gerçekleştiği yerdir. Bu noktanın modellenmesinde PSCAD yazılımında oluşturulan direk, programın kütüphanesindeki çift koruma telli, tek devreli çatal direk modelinden yararlanılarak tasarlanmıştır. Model oluşturulurken PA serisindeki PB+12 tipi orta taşıyıcı direğin özellikleri temel alınmış; iletkenler arası mesafe, iletkenlerin yerden yüksekliği ve koruma tellerinin konumları buna göre belirlenmiştir (Zhao vd., 2011). Program, girilen iletken yüksekliği ve koruma parametrelerine dayanarak direk direncini otomatik olarak hesaplamıştır. Modelde iletken olarak 1272 MCM Pheasant kullanılmış ve koruma tellerinin kesiti 70 milimetrekare olarak ayarlanmıştır

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Hat karakteristikleri ve arıza bilgileri belirlendikten sonra, yıldırım kaynaklı arızanın meydana geldiği tarih tespit edilmiştir. Yıldırım ve arıza verileri eşleştirilerek, Şekil 10'da mesafe koruma rölesinden (MKR) alınan kayıt gösterilmiştir.

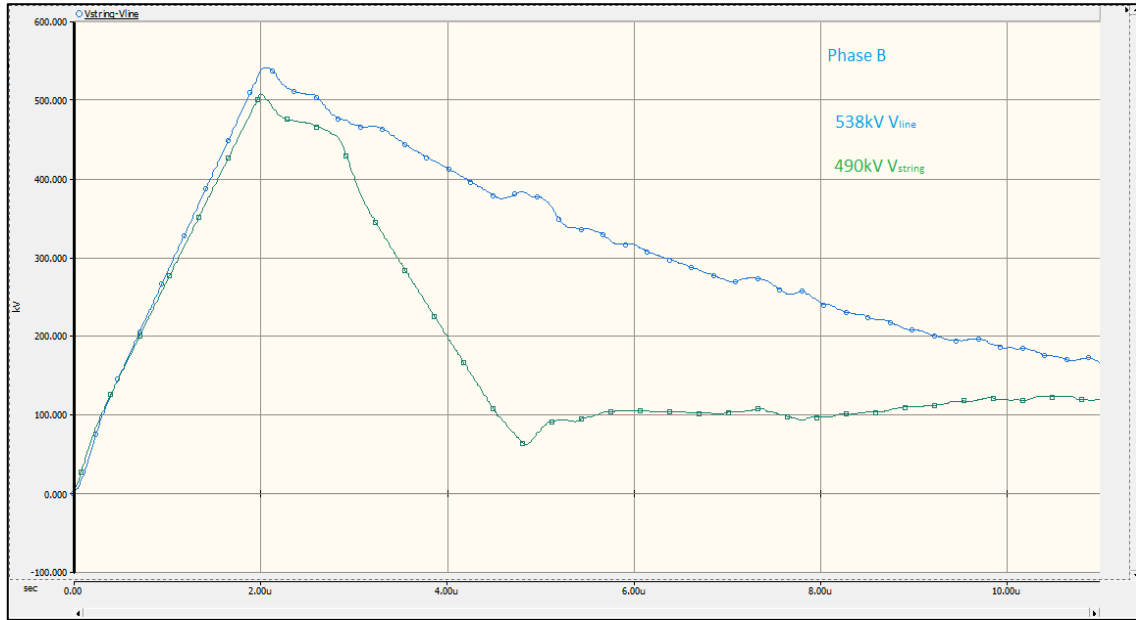
15 Ocak 2019'da saat 11:54'te yıldırım, 62 numaralı direğe düşmüştür. Arıza, B-Faz toprak olarak kaydedilmiş olup, B fazı orta konsolda yer almaktadır. MKR arıza kaydına göre arızanın meydana geldiği nokta 18.23 km'de yer almakta ve direk tipi PB olarak belirlenmiştir. Direğin +12 metre ilave gövdesi ile faz iletkeni arasındaki mesafe 31 metredir. 61-62 numaralı direkler arası 379 metre, 62-63 direkleri arası ise 424 metredir. 1460 mm izolatör kullanılan 62 numaralı direğin topraklama direnci 149 Ω olarak ölçülmüştür. Direğin bulunduğu zemin genel olarak kayalıktır.



Şekil 11. Oymapınar TM'den Mahmutlar TM'ye bakan Mesafe Koruma Rölesi bilgisi (Distance Protection Relay Information from Oymapınar Substation to Mahmutlar Substation)

(MGM, 2025)'den alınan verilere göre, 10 kA ve 25 kA şiddetinde iki yıldırım tespit edilmiş ve Tablo 12'de sunulmuştur. 10 kA yıldırım şiddeti için yapılan simülasyonda, hat üzerinde herhangi bir arıza meydana gelmediği Şekil 12'de gösterilmiştir.

Şekil 11'deki mesafe koruma rölesi arıza kaydı incelendiğinde hattın B fazında arıza yaşandığı ve bu arıza esnasındaki gerilimin 940kV, akımın ise 16.9 kA olduğu görülmektedir. Şekil 12'den de görüleceği üzere tablo 2'den alınan 10kA yıldırım şiddeti için hazırlanan simülasyona göre arıza oluşmamıştır. Tablo 2'de görüldüğü gibi, aynı anda birden fazla yıldırım düşebilir. Yakın noktalara arka arkaya yıldırım düşmesi, iyonizasyon nedeniyle ortam direncinin azalmasına yol açabilir. Bu da iletim hattını arızalara karşı daha hassas hale getirir. Bu nedenle, sık yıldırım alan bölgelerde topraklama direnç ölçümlerinin düzenli olarak güncellenmesi ve gerekirse ek iyileştirmeler yapılması önerilmektedir.



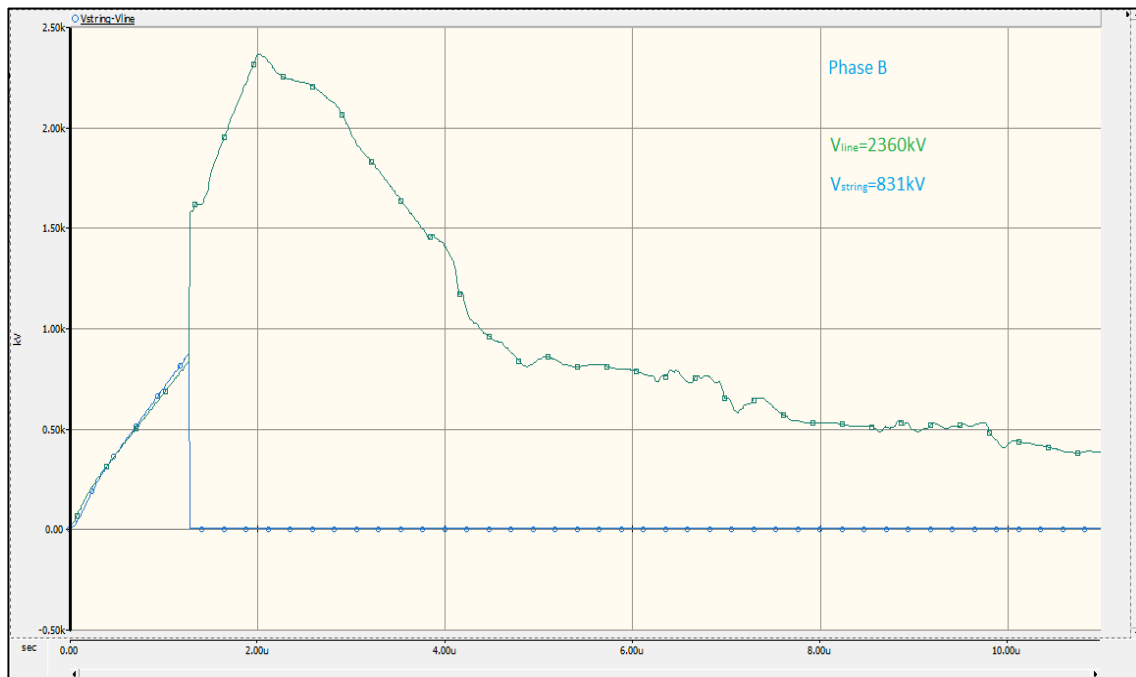
Şekil 12. 10 kA Yıldırım Şiddeti için Simülasyon Sonucu (Simulation Results for 10kA Lightning)

Tablo 2’de ise MGM’den alınan, 154kV Oymapınar Mahmutlar EİH güzergahıyla eşleştirilen yıldırım verileri bulunmaktadır. Bu veriler ile hattın işletme operatöründen alınan arıza verileri eşleştirilmiştir.

Tablo 2. MGM’den alınan koordinatlı yıldırım verileri (Coordinated Lightning Data taken from MDD)

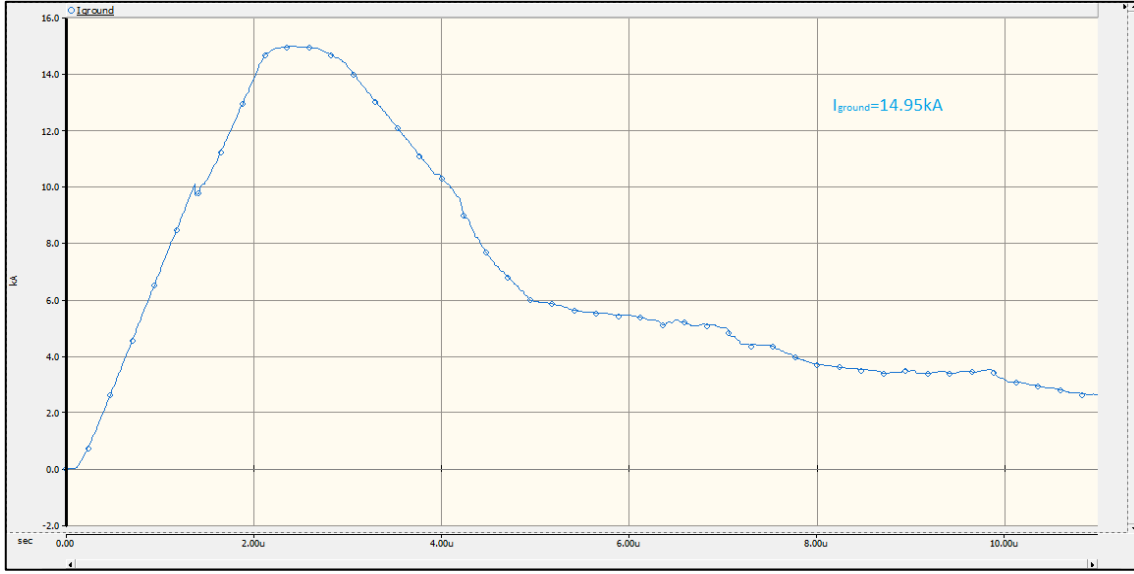
SAAT-TARİH	ENLEM	BOYLAM	YERDEN YÜKSEKLİK(km)	AKIM(kA)
15/01/2019- 11:54	36° 44' 33.69" N	31° 46' 57.06" E	7.9	24.95
15/01/2019- 11:54	36° 44' 33.67" N	31° 46' 57.07" E	10.1	10.02

25kA yıldırım şiddeti için oluşturulan simülasyon sonucu şekil 13’te verilmekte olup arıza görülmektedir. Elde edilen veri ile mesafe koruma rölesi verileri karşılaştırıldığında arıza esnasında toprağa 14.95kA akım aktığı (şekil 13), gerilimin tepe değerinin ise 831kV olduğu görülmüştür. Akım ve gerilim değerleri karşılaştırıldığında aradaki %7’lik farkın topraklama ölçümü yapılan tarihteki zeminin nemlilik durumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil13. 25kA yıldırım şiddeti için simülasyon sonucu (Simulation results for 25kA Lightning)

Çalışma kapsamında, 62 numaralı direğin bulunduğu bölgede ortalama yıldırım şiddeti 36 kA olarak belirlenmiştir. 1460 mm izolatör kullanıldığında arızanın kaçınılmaz olduğu görülmüştür. Ancak, izolatör boyu 1660 mm'ye çıkarıldığında, 36 kA yıldırım şiddetinde toprak üst direnç değeri 19 Ω olarak hesaplanmıştır. Direk topraklamasının iyileştirilmesi veya daha uzun izolatör kullanılması halinde arıza önlenir. Simülasyon verileri doğrultusunda farklı senaryolar analiz edilmiştir.



Şekil 14. 15/01/2019 Tarihli Arıza Esnasında Toprağa Akan Akım (Fault Current at 15/01/2019)

4.1. Farklı İzolatör Boylarına Göre Oluşan Gerilimler (Voltages According to Different Grounding Values)

"Tablo 3'teki veriler incelendiğinde, izolatör uzunluğunun artmasıyla birlikte direkte oluşan aşırı gerilimlerin atlama yapmasını önlemek için gereken arıza gerilim seviyesinin de yükseldiği görülmüştür. 10 kA şiddetindeki yıldırım için analiz yapıldığında:

- 1660 mm izolatör için arıza sınır direnç 525 Ω 'dur.
- İzolatör boyu 2460 mm'ye çıkarıldığında direnç sınır değeri 1411 Ω 'a yükselmiştir
- 1660 mm'lik izolatörde arıza gerilimi 870 kV olarak ölçülmüştür.
- Direk ayak direnci 525 Ω 'un altında olduğunda hatta arıza oluşmamaktadır.

Bu senaryo 50 kA şiddetindeki yıldırım için incelendiğindeyse:

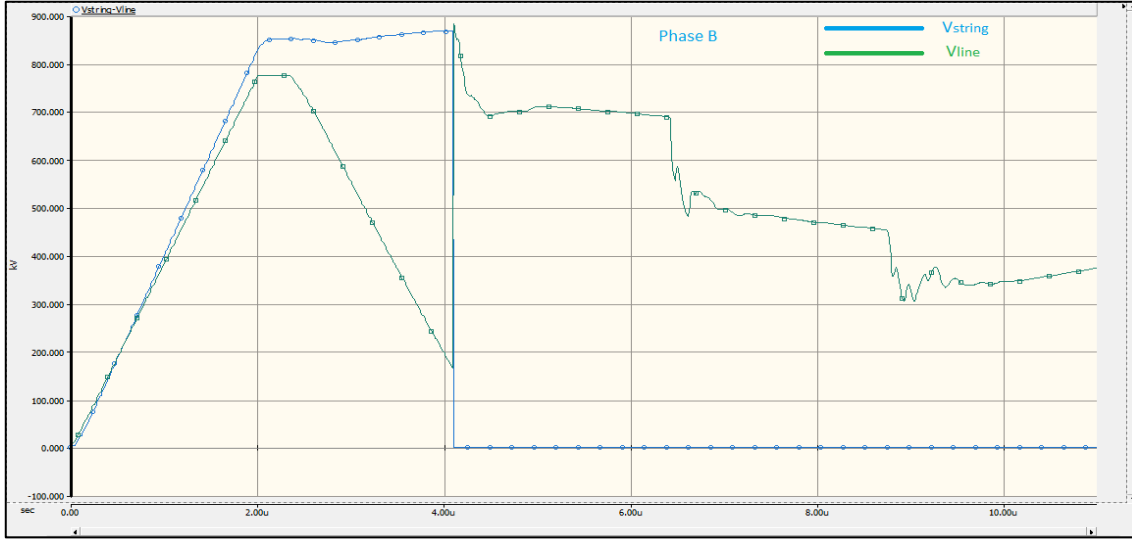
- 1660 mm'lik izolatörde arıza oluşması için sınır direnç 11 Ω 'dur.
- 2460 mm'lik izolatörde bu değer 34 Ω 'a yükselmiştir.
- 1660 mm'lik izolatörde arıza anındaki hat gerilimi 1550 kV olarak ölçülmüş ve 11 Ω ve üzerindeki tüm direk dirençlerinde arıza meydana gelmektedir.

Tablo 3. 1660, 2060 ve 2460 mm İzolatör için Değişen Yıldırım Akım Şiddetinde Arıza Limit Değerleri (Outage Limit Values for 1660, 2060 and 2460 mm Insulators at Varying Lightning Current Intensity)

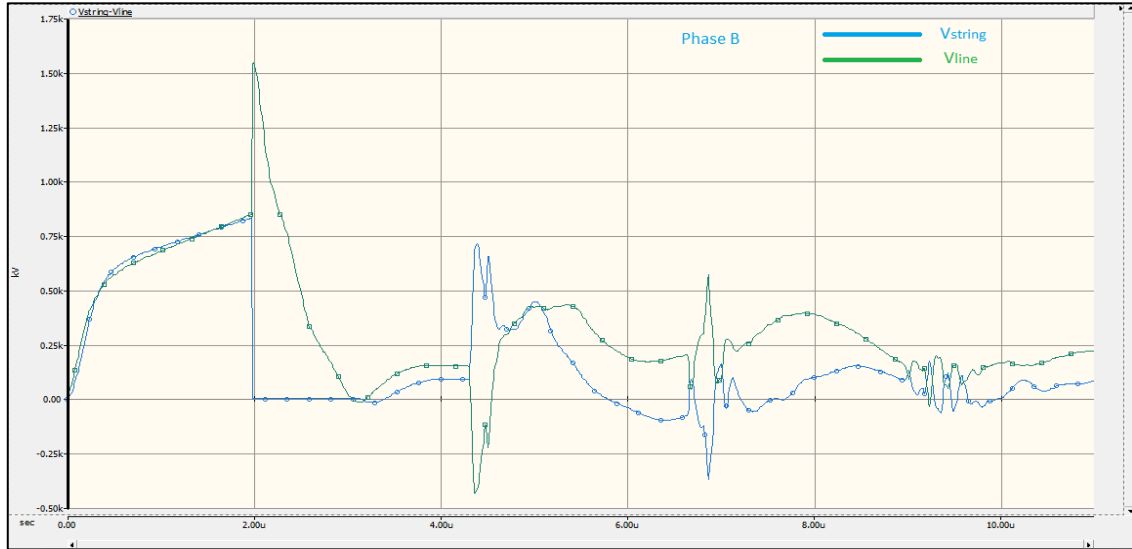
İZOLATÖR BOYU	1660 mm		2060 mm		2460 mm	
	R _{direk} (Ω)	Hat Gerilimi (kV)	R _{direk} (Ω)	Hat Gerilimi (kV)	R _{direk} (Ω)	Hat Gerilimi (kV)
10	525	871	835	1100	1411	1300
20	95	1550	149	1850	224	2250
30	43	1590	66	1900	93	2300
40	19	1500	37	1900	53	2330
50	11	1550	20	1800	34	2380
60	5	1590	12	1830	19	2180
75	1	1800	5	1900	10	2200
100	1	2500	1	2500	2	2500

Şekil 15'ten görüleceği üzere hatta yıldırım düştükten sonra 4 μ s içinde arıza gerilimi tepe noktasına çıkmakta, arıza oluştuğu anda PSCAD devre modelindeki devre kesici devreyi açmaktadır. İzolatör üzerindeki gerilim

sıfırlanırken hattaki gerilim harmonikler oluşturarak 100ms sonra tamamen sönümlenmektedir.



Şekil 15. 1660 mm izolatör boyunda 10kA yıldırımda 525Ω dirençte atlamının olduğu hat ve izolatör gerilimi (Line and insulator voltage at which a flashover occurs in 525Ω resistance in 10kA lightning with 1660 mm insulator length)



Şekil 16. 1660 mm İzolatör Boyunda 50kA Yıldırımda 11Ω Dirençte Atlamanın Oluştugu Hat ve İzolatör Gerilimi (Line and Insulator Voltage at Which a Flashover Occurs in 11Ω Resistance in a 50kA Lightning With 1660 mm Insulator Length)

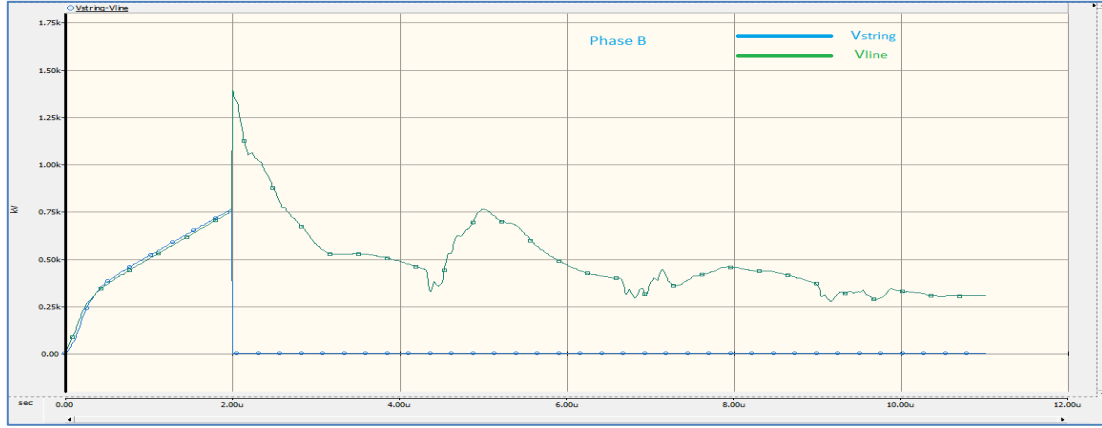
4.2. Farklı İzolatör Boylarına Göre Oluşan Gerilimler (Voltages According to Different Grounding Values)

Tablo 4'te, izolatör boyu ve direk topraklama direnci sabit tutulduğunda, hangi yıldırım şiddetinde arıza oluşacağı gösterilmektedir. İzolatör boyu arttıkça, arızaya neden olabilecek yıldırım şiddetinin de yükseldiği gözlenmiştir.

Tablo 4. Değişen İzolatör Boyuna Göre Direk Temel Direncinin 10 Ω Olması Halinde Atlama Gerilimleri (Fault Voltages in Case The Pole Base Resistance is 10 Ω According to the Varying Insulator Length)

İZOLATÖR BOYU	1460 mm		1860 mm		2460 mm	
	V _{İZOLATÖR} (kV)	V _{HAT} (kV)	V _{İZOLATÖR} (kV)	V _{HAT} (kV)	V _{İZOLATÖR} (kV)	V _{HAT} (kV)
10	161	165	163	167	163	167
20	325	333	323	332	325	333
30	486	497	488	489	488	500
40	651	651	648	662	649	663
45	728	1272 (arıza)	488	488	733	750
60	-	-	928	1819 (arıza)	977	1000
75	-	-	-	-	1220(arıza)	2146 (arıza)

Direk topraklamasının 10Ω , izolatör boylarının sırasıyla 1460, 1860 ve 2460 mm olması halinde 45 kA yıldırım şiddetinde arıza oluşmamaktadır. Bu durum 1860 mm izolatör kullanılması halinde 60kA yıldırımında arıza yaşanmıştır. İzolatörün uzatılarak 2460 mm'ye çıkartılması halinde ise 75kA yıldırım şiddetinde arıza meydana gelmiştir. Tablo 4'te arıza yaşandıktan sonraki veriler boş bırakılmıştır.



Şekil 17. 40 kA Yıldırım, 1460 mm İzolatör İçin 13Ω Sınır Değeri (13Ω Limit Value for 1460 mm Isolator in 40 kA Lightning) Tablo 4'te görülen 10Ω için 45 kA de yaşanan arıza, yıldırım şiddeti 40 kA'e düşürüldüğünde 13Ω 'da görülmektedir. Bu durum şekil 17'de gösterilmektedir.

4.3. Yıldırım Akım Değerinin Sabit Olduğu Anda Yaşanan Arızaya Esas Topraklama Değerleri (Fault Grounding Values On Constant Lightning Values)

Yapılan çalışmanın kapsamında yıldırımın akım değerinin sabit tutulması ve izolatör boyunun değiştirilmesi halinde hangi topraklama direnç değerlerinde açmaların yaşanacağına dair hazırlanan simülasyon çıktısı Tablo 5'te verilmektedir. Bu tabloda hatta okunan gerilimler anlık gerilimler olup simülasyonda tespit edilen tepe gerilim değerleridir. Okunan gerilimlerin tamamında arıza yaşanmıştır. Bir örnekle açıklanacak olursa; 30kA yıldırım için direktte 1660 mm izolatör kullanıldığı takdirde 43Ω ve üzeri tüm topraklama dirençlerinde arıza yaşanacaktır. Hatta görülen gerilim tepe değeri ise 1590kV olacaktır.

Tablo 5. 10,30 ve 50kA Yıldırımında Arıza Sınır Değerleri (Outage Limit Values for 10,30 and 50kA Lightning)

YILDIRIM ŞİDDETİ	10kA		30 kA		50 kA	
	$R_{direk} \Omega$	$V_{HAT} (kV)$	$R_{direk} \Omega$	$V_{HAT} (kV)$	$R_{direk} \Omega$	$V_{HAT} (kV)$
Lizolatör(mm)						
1460	357	710	33	1500	7	1510
1660	525	875	43	1590	11	1550
1860	664	990	54	1750	14	1610
2060	835	1100	66	1900	20	1800
2260	1068	1180	79	2120	28	2180
2460	1411	1300	93	2300	34	2380
2660	1953	1400	109	2500	40	2580

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yıldırımın mevcut teknoloji ve yöntemlerle tamamen önlenmesi veya tehlikesiz hale getirilmesi mümkün değildir. Elektrik sistemleri modern yaşamın en temel gereksinimlerinden biridir. Ancak yıldırım, bu sistemler için en büyük risklerden birini oluşturmaktadır. Havai enerji iletim hatları, enerji sistemlerinin temel taşıdır ve dış etkilere karşı hassastır. Bu çalışmada, arıza indeksi yüksek olan bir havai iletim hattı incelenerek, yıldırım kaynaklı arızaların önlenmesi için alınabilecek önlemler değerlendirilmiştir. Seçilen hat üzerinde yıldırım kaynaklı arızalar belirlenmiş ve MGM'den alınan koordinatlı yıldırım verileriyle eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme sonucunda; yıldırımın koordinatı, akım şiddeti, direklerin topraklama direnci, direk tipi, izolatör boyu ve arıza kayıtları ayrıntılı olarak elde edilmiştir. PSCAD programı ile eldeki arıza verileri ve işletmedeki hat bilgileri kullanılarak hat modellenmiştir. Alınan arıza kayıtları ile karşılaştırma yapılarak modelin doğruluğu sağlanmıştır. Modelleme sonucunda üç değişkenli bir sistem oluşturulmuştur:

1. Yıldırım şiddeti sabit tutularak izolatör boyu ve toprak direnci değiştirilmiştir.

2. İzolatör boyu sabit tutularak yıldırım şiddeti ve toprak direnci değiştirilmiştir.
3. Toprak direnci sabit tutularak yıldırım şiddeti ve izolatör boyu değiştirilmiştir.

Bu analizler sayesinde, bu parametrelerden herhangi biri bilindiğinde, iletim hattının yıldırıma karşı güvenli işletme koşulları belirlenebilmektedir.

Yıldırım şiddeti, ülke ve bölgelere göre büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Türkiye'de sahil bölgelerindeki yıldırım şiddeti, iç kesimlere kıyasla 10 kat daha yüksek olabilir (Öztopal, 2017). Bu çalışmada incelenen bölgede ortalama yıldırım şiddeti 20-30 kA olarak belirlenmiştir.

- 1460 mm izolatör için: 30 kA yıldırımda maksimum direnç değeri 33 Ω 'dur.
- 1660 mm izolatör için: Aynı yıldırım şiddetinde direnç değeri 74 Ω 'a çıkmaktadır.
- 1660 mm izolatör ile 20 kA yıldırım için: Limit direnç değeri 96 Ω olarak hesaplanmıştır.

İncelenen bölgede ortalama yıldırım şiddeti 20-30 kA olduğu düşünüldüğünde, 1460 mm izolatör için 30 kA yıldırıma karşılık maksimum direnç değeri 33 Ω olarak belirlenmiştir. 1660 mm izolatör kullanıldığında bu değer 74 Ω 'a çıkmaktadır. Analizler, 1660 mm izolatör için 20 kA yıldırımın kullanılması durumunda 96 Ω 'u limit değer olarak göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, yıldırım şiddeti 20-30 kA ve üzeri olan bölgelerde topraklama sistemlerinin iyileştirilmesi zorunludur. Topraklama direncinin düşürülemediği durumlarda, izolatör boyunun artırılması önerilmektedir.

- Direk ayak direnci 10 Ω olduğunda: 45 kA yıldırımda arıza oluşmamaktadır.
- İzolatör boyu 1660 mm olduğunda: 50 kA'ya kadar güvenli sınır sağlanmaktadır.
- İzolatör boyu 2660 mm olduğunda: 80 kA'ya kadar arıza oluşmamaktadır

Türkiye'nin Akdeniz sahil şeridinde yıldırım ortalama şiddeti genellikle 20-30 kA arasında seyrederken, bu değer yıldan yıla ve bölgenin konumuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Yıldırım şiddeti 30-40 kA aralığında olduğunda, 1660 mm izolatör boyuyla maksimum topraklama direnci 19 Ω olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma yüksek gerilim havai hatların modellemesiyle, bölgesel yıldırım verileri kullanılarak muhtemel arıza noktalarının önceden belirlenebileceğini göstermektedir. 154kV havai hatlarda sıklıkla kullanılan izolatör tipi 1660 mm'ye çekilmiş olup, bu değerde yıldırım kaynaklı arızaları önlemek için topraklama direncinin 19 Ω 'un altında tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. Topraklama direnci bu değer ne kadar altına düşürülürse, yıldırım kaynaklı arızaların o oranda azalacağı öngörülmektedir. Bunların yanı sıra yıldırıma karşı topraklama ve izolatör boylarında değişiklik yapılmasıyla kısa, orta ve uzun vadede sağlanacak faydalar altta verilmiştir.

- İletim hatlarında tespit edilen yıldırıma karşı zayıf noktalara müdahale edilerek kalıcı arıza sayısı düşürülerek elektriğin arz ve güvenliğinde iyileşme sağlanacaktır.
- Kalıcı arızalarda zarar gören hırdavat değişimi, tamir maliyeti ve arızanın giderilmesi için kullanılan iş gücü azalacaktır.
- Yeni hatların tasarımında yıldırım göz önüne alınarak orta ve uzun vadede işletme giderlerinde azalma meydana gelecektir.
- Enerji kesintilerinde meydana gelen mali kayıp, birim maliyet düşünüldüğünde tüketicilerin lehine yarar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın devamında yıldırım kaynaklı kalıcı arızaların ayrıntılı analiz edilmesiyle yıldırıma karşı farklı topraklama modellerinin simülasyonu ve uygulaması yapılması planlanmaktadır. Yıldırım şiddeti, topraklama direnci ve izolatör uzunlukları arasındaki korelasyon kullanılarak farklı izolatör modellerinin (Genişlik, tasarım vb.) yıldırım karşısındaki tepkileri elektrik alan açısından incelenecektir. Bununla birlikte yıldırım kaynaklı arızaların önüne geçebilmek için yapay zekâ destekli güzergâh seçim çalışmaları yapılacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Agrawal, S., & Nigam, M. (2014). Lightning phenomena and its effect on transmission line. *Recent Research in Science and Technology*, 183-187.
- Alves, M., Oliveira, B., Ferreira, D., Santos, A., Maia, W., Soares, W., . . . Pinto, O. (2025). An automated technique and decision support system for lightning early warning. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2289-2304.
- Araneo, R., Celozzi, S., Brandão, J., Andreotti, A., & Verolino, L. (2019). Lightning Performance of Overhead Distribution Lines with Underbuilt Ground Wires. *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)* (s. 1-2). Miami: IEEE.
- Arı, M. (2012). 154/380 kv Enerji İletim Hatları Proje Uygulamaları. Ankara: Karaca.
- Chisholm, W. A., Petrache, E., & Bologna, F. (2010). Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* (s. 1-6). New Orleans: IEEE.
- Chisholm, W., & Petrache, E. (2010). Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*. Bologna: IEEE.
- Chowdhuri, P. (1990). Lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 658-667.
- Chowdhuri, P. (1996). *Electromagnetic Transients in Power Systems (High-Voltage Power Transmission Series)*. Tennessee: Research Studies Pre.
- Chowdhuri, P., & Gross, E. T. (1967). Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 114(12).
- Cooray, V. (1994). Calculating Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: A Comparison of Two Coupling Models. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 179-182.
- Dan, Y., Zhang, Z., Bu, S., Wong, C.-N., & Lin, P. (2024). Analysis of Grounding Performance of Tower Grounding Electrodes in Elevated Terrain. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3305-3315.
- Djalel, D., Ali, H., & Fayçal, C. (2007). The Return-Stroke of Lightning Current, Source of Electromagnetic Fields (Study, Analysis and Modelling). *American Journal of Applied Sciences*, 42-48.
- Dommel, H. (1969). Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 388-399.
- Enyong, P. (2017). Performance of a Developed Short Transmission Line Module: A Survey of Load Power-Factor Effects. *London Journals of Engineering Research*, 7-18.
- Erduman, A., & Yıldız, F. (2019). IEC62305-2'ye Göre Yıldırım Risk Analizi: Hakkâri Üniversitesi Örneği. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 58-65.
- Farzanehrafat, A., & Watson, N. (2013). Power Quality State Estimator for Smart Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2183-2191.
- Furgal, J. (2020). Influence of Lightning Current Model on Simulations of Overvoltages in High Voltage Overhead Transmission Systems. *Energies*, 13(2), 1-10.
- Hardi, S., Mirza, F., Bukit, F., & Rohana, R. (2021). Influence of Lightning Characteristics on Back Flashover in Extra High Voltage Transmission Line: A case study. *Journal of Physics*, 1811.
- Holle, R. L. (2008). Annual rates of lightning fatalities by country. *20th International Lightning Detect, on Conference* (s. 1-14). Tucson, Arizona: mtmt.
- IEEE Standard 1410. (2010, 9 30). IEEE 1410-2010. Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. IEEE.
- Izadi, M., Abd Rahman, M., & Zaina, M. (2017). The influence of lightning induced voltage on the distribution power line polymer insulators. *PLoS ONE*, 12(2).
- Jernegan, M. (1928). Benjamin Franklin's "Electrical Kite" and Lightning Rod. *The New England Quarterly*, 180-196.
- Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman. (2014). The physics of lightning. *Atmospheric Research*, 147-241.
- Junzhang, O., & Zhonghui, Z. (2010). The Research of Fault Location of Transmission Line Based on Bergeron Model. *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)* (s. V5-300-V5-304). Chengdu, China : IEEE Xplore.
- Kadioğlu, M. (2012). Türkiye'de iklim değişikliği risk yönetimi. Ankara: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- Leonidopoulos, G. (2019). Analysis of Electric Power Transmission Line Presenting Only Long-Wise Inductance. *Modelling, Measurement and Control*, 94-97.
- Luo, L. (2014). Research on grounding technique used in lightning protection of transmission line. *BioTechnology*, 8787-8794.
- Malelak, M., & Zoro, R. (2017). Lightning Protection System for High Voltage Transmission Line in Area with High Grounding Resistance. *International Conference on High Voltage Engineering and Power System (ICHVEPS)* (s. 350-355). Denpasar, Indonesia: IEEE Xplore.
- Mamiş, M., Arkan, M., & Keleş, C. (2013). Transmission Lines Fault Location Using Transient Signal Spectrum. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 714-718.
- Mamiş, M., Kaygusuz, A., & Köksal, M. (2010). State Variable Distributed-Parameter Representation of Transmission Line for Transient Simulations. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science*, 31-42.
- Marshall, T., & Stolzenburg, M. (2001). Voltages inside and just above thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D5), 4757-4768.
- Martínez-Velasco, J. A., & Castro-Aranda, F. (2010). Modeling of overhead transmission lines for lightning overvoltage calculations. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 120-131.
- MGM. (2025, 01 05). Yıldırım Takip Sistemi. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI Meteoroloji Genel Müdürlüğü: <https://www.mgm.gov.tr/sondurum/yildirim-takip.aspx> adresinden alındı

- Monzani, R. C., Prado, A. J., Kurokawa, S., Bovolato, L. F., & Filho, J. P. (2012). Using a Low Complexity Numeric Routine for Solving Electromagnetic Transient Simulations. V. Katsikis içinde, *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 3* (s. 463-484). Rijeka Hırvatistan: IntechOpen.
- Nguyen, T., & Holt, R. (2003). Lightning protection of transmission lines: Optimal shielding design procedure. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 659-667.
- Özen, Ş. (2017). *Düşük Gerilim Güç Sistemleri*. Ankara: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- Özen, Ş. (2021). *Elektrik Elektronik Mühendisliğine Giriş*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Öztopal, A. (2017, Mayıs 02). Türkiye'nin Yıldırım ve Şimşek Gözlemlerinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, s. 304-313.
- Price, C. (2009). *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. C. Price içinde, *Thunderstorms, Lightning and Climate Change* (s. 521-535). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Ravaglio, M. A., Küster, K. K., França Santos, S. L., Ribeiro Barrozo Toledo, L. F., Piantini, A., Lazzaretti, A. E., . . . da Silva Pinto, C. L. (2019). Evaluation of lightning-related faults that lead to distribution network outages: An experimental case study. *Electric Power Systems Research*, 174.
- Shariatinasab, R., & Gholinezhad, J. (2017). The Effect of Grounding System Modeling on Lightning-Related Studies of Transmission Lines. *Journal of Applied Research and Technology*, 545-554.
- Shehab, A. (2013). Design of Lightning Arresters for Electrical Power Systems Protection. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 11(6), 433-442.
- Silva, F. (2016). Comparison of Bergeron and Frequency-dependent cable models for the simulation of electromagnetic transients. 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (s. 1-6). Coimbra: Portugal.
- Silveira, F. H., Visacro, S., & Souza, R. E. (2017). Lightning performance of transmission lines: Assessing the quality of traditional methodologies to determine backflashover rate of transmission lines taking as reference results provided by an advanced approach. *Electric Power Systems Research*, 60-65.
- Simka, P., Straumann, U., & Franck, C. (2012). SF6 high voltage circuit breaker contact systems under lightning impulse and very fast transient voltage stress. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 855-864.
- Suyaraj, N., Premrudeepreechacharn, S., & Watson, N. (2017). Transient state estimation with the Bergeron transmission line model. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 806-819.
- Tilev-Tanriover, Ş., Kahraman, A., Kadioğlu, M., & Schultz, D. (2015). Lightning fatalities and injuries in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Science*, 1881-1888.
- Tossani, F., Borghetti, A., Napolitano, F., Piantini, A., & Nucci, C. (2018). Lightning Performance of Overhead Power Distribution Lines in Urban Areas. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 581-588.
- Velasco, J. M. (2019). *Transient Analysis of Power Systems: A Practical Approach*. Barcelona: Wiley.
- Visacro, S., Silveira, F. H., Vale, M. H., & Pomar, G. D. (2021). Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures. *Electric Power Systems Research*, 195.
- Watson, N., & Arrillaga, J. (2003). *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*. London: UK: IE54.
- Watson, N., & Yu, K. (2008). Transient State Estimation. 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power (s. 1-6). Wollongong, NSW, Australia: IEEE.
- Yan, K., Vukovic, A., & Sewell, P. (2024). Two-Dimensional Coupled Electrothermal Method Based on the Unstructured Transmission-Line Modelling Method for Lightning Protection Simulations. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 208-217.
- Yoldaş, A. (2019). Yıldırım Elektromanyetik Darbelerinin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkilerinin İzolatörler ve Topraklama Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Antalya, Türkiye.
- Yoldaş, A. Y., & Özen, Ş. (2023). Enerji İletim Hattı Güzergâh Seçiminde Yıldırım Faktörünün. ETUK VII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi (s. 1-9). İzmir, Türkiye: EMO.
- Yu, K., & Watson, N. (2007). An Approximate Method for Transient State Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(22), 1680-1687.
- Yücelbaş, Ş., Erduman, A., Yücelbaş, C., & Yıldız, F. (2021). Pre-estimation of Distance-Based Lightning Using Effective Meteorological Parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1529-1539.
- Zhao, Z., Dang, D., Wu, G., Cao, X., Zhu, J., & Chen, L. (2011). Simulation Study on Transient Performance of Lightning Over-voltage of Transmission Lines. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (s. 520-524). Chengdu, China: IEEE.
- Zhao, Z., Dang, D., Wu, G., Cao, X., & Zhu, J. (2011). Simulation Study on Transient Performance of Lightning Over-voltage of Transmission Lines. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (s. 520-524). Chengdu, China: IEEE.
- Zhong, Y., Kang, X., & Jiao, Z. (2014). A novel distance protection algorithm for long-distance transmission lines. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014) (s. 1-5). Copenhagen, Denmark: IET.



DÖKÜMHANE MAÇA ÜRETİM PROSESİNDE MAKİNE PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU İLE AMİN GAZI TÜKETİMİNİN AZALTILMASI

Onur ŞAHİN^{1*}, Müge Ensari ÖZAY¹, Rüstü UÇAN¹ Emine CAN²

¹Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Döküm,
Maça,
Dimetiletilamin,
Makine
parametreleri,
Kesirli faktöryel
deney.

Dökümhane maça üretim sürecinde en önemli tehlikelerden biri dimetiletilamin gazıdır. DMEA (Dimetiletilamin) maça sertleştirmede kullanılan aşırı uçucu bir bileşik olup kansere ve göz hasarına sebep olduğu bildirilmiştir. Ayrıca proses güvenliğini riske sokmaktadır. Bunun önüne geçmek için DMEA miktarının maça kalitesine negatif etki yapmadan maçaya enjekte edilen miktarının azaltılması gerekir. Bunu yapabilmeyen yolu da maça üretimi sırasında kullanılan makine parametrelerinin optimum değerlere ayarlanması ile minimum miktarda DMEA ile istenen maça sertliğinin elde edilmesidir. Bu makalede faktöryel deney tasarımı metodu kullanılarak deneysel araştırma ile DMEA miktarının azaltılması için maça sertliğine etki eden parametrelerin optimizasyonu elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bir dökümhanenin maça üretim bölümünde 10 adet maça üretim parametresinin iki seviyesi ile 32 adet maça üretim reçetesi oluşturulmuştur. Üretilen maçaların batma sertlikleri ölçülmüş ve kayıt edilmiştir. Ortaya çıkan sonuçların Minitab 22 paket program ile analizleri yapılmıştır. Sertlik çıktısının faktörlere bağlı regresyon eşitliği elde edilmiştir. En önemli bulgulardan biri istenen maça sertliğini olumsuz etkilemeden gaz sıcaklığının artırılması ve gazlama süresinin düşürülmesi ile kullanılan DMEA miktarının azaltılabileceği olmuştur. Ayrıca, işletme verimliliği açısından da gazlama süresinin düşürülmesi birim zamanda üretilen maça sayısını artıracaktır. Amin gazının daha az kullanılması ile de döküm parça kalitesine olumlu yansımalar olacaktır.

REDUCING AMINE GAS CONSUMPTION IN FOUNDRY CORE PRODUCTION PROCESS BY OPTIMIZATION OF MACHINE PARAMETERS

Keywords

Casting,
Core,
Dimethylethylamine,
Machine parameters,
Fractional factorial
test.

Abstract

One of the most important hazards in the foundry core production process is dimethylethylamine gas. DMEA (Dimethylethylamine) is an extremely volatile compound used in core hardening and has been reported to cause cancer and eye damage. It also risks process safety. In order to prevent this, the amount of DMEA injected into the core should be reduced without negatively affecting the core quality. The way to do this is to adjust the machine parameters used during core production to optimum values and to obtain the desired core hardness with the minimum amount of DMEA. In this article, it is aimed to obtain the optimization of the parameters affecting the core hardness in order to reduce the amount of DMEA by experimental research using the factorial design of experiments. For this purpose, 32 core production recipes were created with two levels of 10 core production parameters in the core production department of a foundry. The indentation hardness of the produced cores was measured and recorded. The results were analyzed with the Minitab 22 package program. The regression equation of the hardness output depending on the factors was obtained. One of the most important findings was that the amount of DMEA used could be reduced by increasing the gas temperature and reducing the gassing time without adversely affecting the desired core hardness. In addition, in terms of operational efficiency, reducing the gassing time will increase the number of cores produced per unit time. Less use of amine gas will also have positive effects on the quality of the casting part.

Alıntı / Cite

Şahin, O., Özay, E., Uçan, R., Can, E., (2025), Dökümhane Maça Üretim Prosesinde Makine Parametreleri Optimizasyonu ile Amin Gazı Tüketiminin Azaltılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 306-324.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

O. Şahin, 0000-0003-0712-2978
M.E.Özay, 0000-0002-4785-5503
R.Uçan, 0000-0003-2389-8231
E.Can, 0000-0003-1192-2994

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 04.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date 04.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date 13.03.2025
Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: onursahin6677@gmail.com +90 224 573 42 63

REDUCING AMINE GAS CONSUMPTION IN FOUNDRY CORE PRODUCTION PROCESS BY OPTIMIZATION OF MACHINE PARAMETERS

Onur ŞAHİN^{1†}, Müge Ensari ÖZAY¹, Rüştü UÇAN¹ Emine CAN²

¹Uskudar University, Graduate School of Health Sciences, Occupational Health and Safety Department, İstanbul, Türkiye

²Istanbul Medeniyet University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, İstanbul, Türkiye

Highlights

- In this study, the effects of the factors (parameters) affecting the core hardness were investigated.
- Machine parameters were optimized to reduce the core curing gas (DMEA).
- It was shown that cores can be produced with low curing gas by adjusting the machine parameters without adversely affecting the core hardness.
- Machine parameters can be adjusted for the desired hardness values with the obtained regression model.

Graphical Abstract

In this article, productions were made with the experimental plan consisting of the factors affecting the core hardness and the hardness values were recorded. Fractional factorial experimental design was used as the method. The obtained results were analyzed. The hardness equation (1) and optimization of factors affecting hardness value consisting of the factors affecting the core hardness is given below.

$$\text{Core hardness} = 8,412 - 0,1047(\text{pre DMEA dosing, cc}) - 0,676(\text{final DMEA dosing, cc}) - 0,0325(\text{gassing time, s}) - 0,2328(\text{shooting pressure, bar}) - 1,898(\text{gasket}) - 0,0174(\text{DMEA temp. } ^\circ\text{C}) + 0,2451(\text{vent hole area, mm}^2) + 0,0257(\text{final DMEA cc} * \text{gassing time, s}) + 0,0226(\text{gasket} * \text{DMEA temp. } ^\circ\text{C}) + 0,2319(\text{gasket} * \text{vent hole area, mm}^2) \quad (1)$$



Figure. Optimization of factors affecting hardness value

Purpose and Scope

The aim of this study is to reduce the amount of amine gas (DMEA) by optimizing the machine parameters of the core production process in foundries. By obtaining optimum core hardness with the machine parameters, the amount of DMEA will be reduced and the health of the workers will be protected.

Design/methodology/approach

The study is an experimental study and fractional factorial experimental design method was used. The target is to reduce DMEA gas. For this target, core production parameters were optimized and optimum core hardness was obtained with min DMEA. Analyses were made with Minitab 22 package program.

Findings

One of the most important findings obtained from the experiment is the gassing time-final dosage interaction. When the final dosage is selected high, increasing the gassing time parameter significantly affects the hardness output. However, if the final dosage is selected low, the effect of the gassing time level on the output becomes insignificant. This relationship shows that there is an option that will reduce the gassing time without disrupting the hardness output.

Research limitations/implications

In this study, experiments were conducted by keeping some core parameters constant. Researchers can also investigate the effects of the parameters kept constant on the core hardness.

Practical implications

With this study, foundries can review core production processes and production parameters and determine the optimum hardness value for each product type and reach this hardness value by using minimum chemicals.

Social Implications

With this study, the amount of chemicals in core production will be reduced, providing benefits to both employee health, productivity and the environment.

Originality

Although there are many studies in the literature with similar methods, it will be the first experimental study that optimizes parameters especially for the purpose of protecting employee health. The article will be useful for foundries.

[†] Corresponding author: onursahin6677@gmail.com +90 224 573 42 63

1. Giriş (Introduction)

Döküm, metallerin ocaklarda ergitilip hazırlanan kalıplara dökülmesi ve kalıbın şeklini alması, soğuduktan sonra çıkarılarak temizlenmesi prosesine verilen isimdir (Krishnaraj, 2015; Treyger, 2018). Döküm işlemi, hammadde hazırlama, ergitme, maça yapımı, kalıp hazırlanması, döküm ve dökülen parçayı temizleme proseslerinden oluşur (Barot vd., 2020). Metal döküm, Kanicki tarafından "bileşen tasarımından üretime giden doğrudan ve en kısa yol" olarak tanımlanmıştır (Kanicki, 1994).

Dökümhane operasyonları, yüksek seviyede döküm kalitesi sağlamak ve sürdürmek için beceri, teknik ve dikkat gerektiren, doğası gereği karmaşık olan birçok birbirine bağlı dinamik süreçlerden oluşur. Çok sayıda işlem parametresi değişkenine sahip bu tür metodolojik olarak karmaşık işlemler, aynı zamanda bazı sağlık ve emniyet problemlerini ortaya çıkarır. Ergitme, kalıplama ve taşlama operasyonlarının yanında maça üretim operasyonları da sağlık ve emniyet açısından en riskli faaliyetlerdendir (Pandit ve Deshpande, 2021). Yapılan araştırmalar sonucunda Amerikan demir dökümhanelerinde kaydedilebilir iş kazası oranı 6.4 olarak kayıtlara geçmiştir (Schorn, 2020). Türkiyede ise 2022 yılı SGK verilerine göre anametal sanayiinde toplam 22.775, metal döküm sanayiinde 7.081 ve demir döküm tesislerinde ise 4.382 iş kazası meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra ana metal sanayiinde çalışan toplam 42 kişi, metal döküm sanayiinde 22 ve demir döküm tesislerinde ise 15 kişi meslek hastalığına yakalanmıştır (SGK, 2022). Rakamlara bakıldığında döküm sektörünün hem iş kazaları bakımından hem de kimyasal maddelere maruziyet açısından riskli tesisler olduğu görülmektedir.

Birçok döküm yöntemi mevcut olup en yaygın olarak kullanılan yöntem kum kalıba yapılan döküm yöntemidir. Metal döküm için birçok yeni ileri teknoloji olmasına rağmen kum döküm, hammaddelerin düşük maliyeti, boyut ve bileşim açısından çok çeşitli dökümler sunması ve kalıplamanın geri dönüşüm olasılığı nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan döküm yöntemlerinden biri olmaya devam etmektedir (Saikaew ve Wiengwiset, 2012). Kum döküm işlemi, demir, bakır ve nikel gibi yüksek erime sıcaklıklarına sahip çoğu metal ve alaşımın dökümünde kullanıldığı için imalattaki en yaygın yöntemdir. Döküm yöntemi ile üretim yapmanın en büyük avantajı maça kullanılmasıdır. İç boşlukları oluşturan maça sayesinde çok karmaşık döküm parçalar üretilebilir (Bargaoui vd., 2017).

Döküm parçanın iç boşluklarını oluşturan maça dökümden hemen önce kalıba yerleştirilen ve üç fazdan oluşan heterojen bir malzemedir. İçeriğinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı kum, bağlayıcı reçine ve kürleşmeyi hızlandıran gaz (amin gazı) bulunur. Dökülen parçaya bağlı olarak birçok proses ve reçine bağlayıcı kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem cold-box (soğuk kutu)'tur (Bargaoui vd., 2017).

Soğuk kutu yöntemi ile üretilen maçaların üretimi sırasında bir çok farklı kum çeşidi ve kimyasal madde kullanılmaktadır. Kullanılan kimyasal maddeler, kumların birbirine yapışması ve kumun en optimum sertlik düzeyine ulaşabilmesini sağlamaktadır (Rodríguez, 2019). Her kimyasal madde gibi maça üretimi sırasında kullanılan kimyasal maddelerin kontrolsüz kullanımı sonucu çalışanlara ve çevreye zararları olabilmektedir. Özellikle maçanın sertleştirilmesi sırasında kullanılan amonyak bazlı kimyasal maddeler mutajen özellikte olup maça üretimi yapılan işletmeler için tehlike ihtiva etmektedir (Türk, 2022). Dökümhanelerde meslek hastalıkları içinde en yaygın olanı akciğer hastalıkları olup toza ve gazlara maruziyet sonucu oluştuğu bildirilmiştir (Zhang vd., 2010). Bu riskin de en yaygın görülebileceği proses maça üretim prosesidir. Maça üretim süreci, bir dökümhanenin en çok ve en tehlikeli kimyasal madde kullanılan prosesidir (Mirer, 1989).

Maça üretimi, silis kumu, bağlayıcı reçine ve reçine katalizörünün bir mikserde karıştırılması ardından hava ile kalıp içine sürüklenmesi ile yapılır. Kürleşmeyi hızlandırmak ve maçaya sertlik kazandırmak için katölizör gaz enjekte edilir (Tong vd., 2019). Tüm bu işlemler maça üretim makinesine ürüne göre kaydedilmiş maça parametrelerine göre yapılır (Gyarmati vd., 2021). Maçanın kalıba yerleştirilmeden önce uygun olup olmadığına karar verilen en önemli kontrol kriterlerinden birisi de maçanın çizilme sertliğidir (Pandit ve Deshpande, 2021). Optimum bir sertlik değeri taşıyan maça hem döküm sırasında yüksek sıcaklığa dayanacak hem de katılaşmadan sonra kolaylıkla dağılarak parçanın içinden çıkacaktır. Bu yüzden maça üretimi sırasında kullanılan makine parametrelerinin ayarlanması ile minimum kimyasal malzeme kullanılarak optimum sertlik elde edilmesi ile maça üretim tesislerinde gereksiz amin gazı kullanımının önlenmesi son derece önemlidir. Eğer maça imalatı sırasında reçetede belirtilen miktardan fazla reçine kullanılırsa döküm sırasında maça yanacağı için ortama atık reçine gazı çıkacaktır. Aynı şekilde aşırı aktivatör amin gazı kullanımı hem ortamda kimyasal uçuşmasına sebep olacak hem de proses güvenliğini riske sokacaktır (Udayan vd., 2021).

Maça sertliği yanında diğer bir belirleyici özelliğide maçanın mükavemetidir. Sertlik ve mukavemet (dayanıklılık) birbiri ile ilişkilidir ancak farklı özelliklerdir. Sertlik, bir maçanın çizilme veya çatlama direncini ifade ederken, dayanıklılık ise maçanın uygulanan bir kuvvete karşı kalıcı bir şekilde dayanabilme veya şekil değiştirmeden direnme yeteneğini ifade eder. Sertlik katalizör gaz tarafından sağlanır. Mukavemet ise reçine miktarı ile doğru orantılıdır (Beeley, 1972).

Maçada ki reçine miktarının etkisi de son derece önemlidir. Deney yapılan tesiste genellikle ağırlıkça %0,7-0,8-0,9 bağlayıcı yüzdeleriyle üretim yapılmaktadır. Tesisin laboratuvarındaki mukavemet değerleri incelendiğinde dört nokta bükme test sonuçları, yüksek reçine içeriği durumunda maçanın daha güçlü olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara dayanarak, daha yüksek bir reçine yüzdesinin daha iyi mekanik özellikler sağladığı görülmektedir. Ancak tam tersine, bu durum, çekirdeğin soğutulmuş metalik parçadan çıkarılması sırasında zorluklara neden olur ve reçinenin ayrışması nedeniyle döküm sırasında daha fazla gaz yayılır. Bu gazlar döküm parçanın içinde sıkışabilir ve nihai üründe kusurlara neden olabilir (Bargaoui vd., 2017). Nihayi üründe peynir gözeneği hatası ile karşılaşmamak için minimum gaz sağlayan bir bağlayıcı sistemi seçmek ve bunu minimum düzeyde dozajlamak gerekir (Primafound, 2023).

Hem maça sertliği hem de maça dayanıklılığı, döküm süreci sırasında maçanın bütünlüğünü ve performansını sağlamak için önemlidir. Bunları optimize etmek çeşitli faktörleri dikkate almayı ve uygun test ve kalite kontrol önlemlerini uygulamayı gerektirir. Bu sebeple deneysel olarak üretimi yapılacak maçanın üretim reçetesindeki kullanılan reçinenin %0,7 oranı korunarak ve sabit tutularak deneyler yapılmış, bu çalışmada sadece katalizör gaz (DMEA) miktarının azaltılabilmesi için formüller aranmıştır.

Bu çalışma ile maça üretim reçetesine giren özellikle kimyasal malzemelerin minimum miktarda kullanılması ile ortama yayılan kimyasal madde miktarının kaynağında önlenmesi amaçlanmıştır. Maça sandığına (kalıp) giren malzemelerin kalıba girmeden önce makine üzerinden basınç, sıcaklık, süre gibi parametrelerin kombinasyonları ile deneme üretimi yapılarak bir anlamda maça üretim formülü (reçetesi) elde edilmeye çalışılacaktır.

Literatürde bulunan ve benzer yöntemlerle araştırılmış çalışmalar genellikle maça veya kalıp kalitesini etkileyen parametreler üzerinde durmuştur. Bu çalışma ile maça kalitesi ve üretim verimliliğinin yanında çalışan sağlığını etkileyen kimyasal maddelerin daha az kullanımına olanak sağlayacak formüller elde edilmesinden dolayı literatürde ki boşluğa katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Maça sertliğinin döküm kalitesini olumsuz etkilemeyecek seviyede tutularak diğer makine parametrelerinin ayarlanması ile kimyasal madde miktarının azaltılmasına benzer çalışmaların literatürde araştırması yapılmış ve benzer çalışmalara rastlanmıştır.

Bargaoui ve arkadaşları 2017 yılında "Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting" adlı makalede maça kalitesine reçine oranının etkisini araştırılmıştır. Yapılan deneysel üretimlerde kuma ağırlıkça sırasıyla %0,8, %1 ve %1,3'lük toplam bağlayıcı katılmıştır. Numuneler, 0,5 °C/dak ve 2 °C/dak ısıtma hızlarında 200 °C'ye kadar dört nokta bükülme altında test edilmiştir. Yüksek reçine içeriği durumunda kum çekirdeğin daha güçlü olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlara göre, daha yüksek reçine yüzdesinin daha iyi mekanik özellikler sağladığı görülmektedir (Bargaoui vd., 2017). Makalede çeşitli sıcaklık değerleri kıyaslanırken bu çalışmada da makine parametreleri ile optimum sertlik elde edilmeye çalışılmıştır.

Stauder ve arkadaşları tarafından 2016 yılında "Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation" adlı çalışmalarında dört bağlayıcı sistem deneysel çalışmalar ile test edilmiş ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Cold box sistemindeki mukavemet değerlerinin hot box sistemlere göre düşük olduğu tespit edilmiştir. (Stauder vd., 2016). Makalede bağlayıcı sistemleri kıyaslanırken bu çalışmada da makine parametreleri ile optimum sertlik elde edilmeye çalışılmıştır.

Chate ve arkadaşları 2014 yılında "Process parameter setting for core shooter" adlı yayınladıkları bir makalede maça kalitesi ve kimyasal madde tüketimi açısından maça üretimlerinde makine parametrelerini araştırmışlardır. Kumdaki reçine oranı, kum hazırlama süresi, gazlama süresi, amin gazını basınçlı hava ile yıkama süresi parametrelerinin maça kalitesine etkisini araştırmışlardır. Maça sertlik değeri 70 mm batma derinliği kabul edilirken bazı deneylerde 82-93 mm arasında sertlik değerleri elde etmişlerdir. Chate ve arkadaşlarının çalışması ile makale çalışmamız yöntem ve araştırma parametreleri açısından benzerlik göstermektedir (Chate vd., 2014). Burada maça içine katılan kimyasallardan dolayı döküm parçada sıvı metalle buluşma sırasında sıcaklıktan dolayı gaz çıkışının minimize edilmesi için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada ise gereğinden çok kimyasal kullanımı ve yaratacağı tehlikeler belirtilmiştir.

2021 yılında Pandit ve Deshpande en iyi kalıp kum dayanımı elde etmek için çeşitli döküm parametreleri ile deney seti oluşturmuş, deneyler gerçekleştirmiş sonuçlar için regresyon analizi yapmış ve bir formül elde etmişlerdir. Çeşitli kum proses parametrelerinin tahmini için çoklu regresyon analizi ile sonuçlar gösterilmiştir. Tane inceliği sayısı, kil yüzdesi gibi beş kalıp özelliğinin girişiyle yeşil kum kalıp sisteminin modellenmesi için MINITAB 15 yazılımını kullanarak toplanan örnek verileri çoklu regresyon analizi için test etmişlerdir. Çıktı olarak nem, öğütme

süresi, numunenin sertliği ve ham basınç dayanımı elde edilmiştir (Pandit ve Deshpande, 2021). Bizim çalışmamızda ise aynı şekilde en optimum kimyasallar ile ideal sertlik için deneysel çalışmalar yapılmış olup sonuçlar tıpkı Pandit ve Dasphane'nin yaptığı gibi istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiş ve reçeteler elde edilmiştir. Bu yönüyle literatürde ki bu çalışma yapılan amin gazı azaltma çalışması ile benzerlik içermekte olup kalıp özellikleri yerine maça formülü ortaya çıkaracağı için bu konudaki boşluğu da doldurmaya katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada en iyi kum dayanımı elde etmek için regresyon analizi yapılmış ve bir formül elde edilmiştir. Bu çalışmada da aynı şekilde en optimum kimyasallar ile ideal sertlik için analizler yapılmıştır.

Danko ve arkadaşları 2023 yılında Sustainable Materials and Technologies dergisinde yayınlanan "Development of inorganic binder systems to minimise emissions in ferrous foundries" adlı makalelerinde döküm esnasında kalıptan yayılan emisyonları ölçmüşler ve inorganik bağlayıcı kumların döküm sırasında diğer kumlara göre daha az emisyon yaydığını tespit etmişlerdir (Danko vd., 2023). Bu makalede kalıp kumu özelliklerinin bağlayıcılar ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bu yönüyle bizim çalışmamıza benzerlik göstermektedir.

Schneider ve Stevenson 2012'de yaptıkları bir çalışmada bir maçanın nihai kalitesinin etkileşimde bulunan çok sayıda değişkenden kaynaklandığını, maça üfleme prosesinde atış nozullarının ve havalandırma deliklerinin toplam sayısı ve ayrıca kullanılan nozüllerin ve havalandırma deliklerinin boyutu ve konumları çoğu zaman bir maçanın nihai kalitesi üzerinde çarpıcı bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, maça üfleme sırasında uygulanan basınç miktarı, toplam atış süresi ve kum/bağlayıcı oranı gibi proses parametreleri de maça sandığını doldurulmasında etkileyebildiğini, maça kutusu doldurulduktan sonra, maçaya yeterli mukavemeti kazandırmak için bağlayıcının kürlenmesi veya sertleştirilmesi gerektiğini ve maça kürlenme süreci aynı zamanda maçanın nihai kalitesini etkileyecek birçok değişkeni olduğunu bildirmişlerdir (Schneider ve Stevenson, 2012). Makale çalışmasında da maça sandıklarındaki hava kanallarının alanı bağımsız değişken olarak ele alınmış ve daha bir çok parametrenin analizi yapılmıştır.

Gyarmati ve arkadaşları 2021 yılında "The effect of sand quality on the bending strength and thermal distortion of chemically bonded sand cores" adlı çalışmalarında iki maça kumunun çeşitli reçine sistemleri ile mukavemet özelliklerini kıyaslamışlardır. Araştırmacılar yeni kum ve rejenere kumun stabilitesini incelemiş ve yeni kumun daha iyi mukavemet değerleri verdiğini bulmuşlardır (Gyarmati vd., 2021). Makalede maça kumları kıyaslanırken bu çalışmada makine parametreleri ile optimum sertlik elde edilmeye çalışılmıştır.

Behara ve arkadaşları, bağlayıcı içeriğinin, kum tanecik inceliğinin ve sertleşme süresinin, pişmeyen kimyasal olarak bağlanmış kum kalıp maçalarının sıkıştırma mukavemeti, maça sertliği ve kesme mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. 50 tane inceliği, 2,4 bağlayıcı yüzdesi ve 3 saatlik kürlenme süresinin maksimum faktör ayarı olduğu bulunmuştur. Sertleşme süresinin en etkili ve önemli faktör olduğunu göstermişlerdir (Behara vd., 2022). Bu çalışmada da benzer şekilde en ideal sertlik değeri için maça üretim formülü elde edilmiştir.

Kumar ve Prakash 2015'de yaptıkları bir deneysel çalışmada döküm kusurlarına sebep olan parametreleri araştırmışlardır. Çalışma büzülme, kum hatası, kum üfleme delikleri, kabuklanma, iğne delikleri gibi döküm kusurlarını Taquchi optimizasyon tekniği kullanılarak en aza indirilmeyi amaçlamışlardır. Hesaplanan parametreler için optimum koşullar; sıkıştırma dayanımı 1300 g/cm², nem İçeriği %3,5) geçirgenlik 163 ve kalıp sertlik sayısını 95 olarak tespit etmişlerdir (Kumar ve Prakash, 2015). Bu çalışma yöntem olarak benzerlik içermektedir.

Singh ve Kumar 2016'da yaptıkları bir deneysel araştırmada çeşitli deneyler ve test teknikleri uygulandıktan sonra, döküm sıcaklığının optimum değerinin 1340, geçirgenliğin 150, kum parçacık boyutunun 42 AFS olduğu sonucuna varmışlardır (Singh ve Kumar, 2016). Makale çalışmasında da benzer bir yaklaşımla her bir parametrenin maça sertliğine etkileri araştırılmıştır.

Upadhye ve Keswani, 2012 yılında yaptıkları bir çalışmada döküm kalitesini etkileyen parametreleri araştırmışlar ve optimum değerlerini nem:3,5, sıkıştırma mukavemeti:900, geçirgenlik:185, dökme sıcaklığı:1420°C olarak tespit etmişlerdir (Upadhye ve Keswani, 2012). Bu makalede de 10 adet parametre test edilmiş ve en ideal değerler elde edilmiştir.

Chaudhari ve Aloni 2022 yılında yayınladıkları bir makalede varyans analizinde, çoklu performans özelliklerini önemli ölçüde etkileyen proses parametrelerin; karbon eşdeğeri, döküm sıcaklığı, çelik hurdası, ham sıkıştırma mukavemeti, geri dönüş kumu sıcaklığı ve sıkma basıncının olduğunu belirlemişler ayrıca bu parametrelerin kalıp kalitesine toplamda %86 civarında bir katkı sağladığını belirtmişlerdir (Chaudhari ve Aloni, 2022). Bu makalede de benzer yöntem kullanılmış ve ideal maça parametreleri belirlenmiştir.

Literatür taraması sonucunda elde edilen bu araştırmalar incelendiğinde araştırmaların ürün kalitesi ile ilgili

olduğu görülmektedir. Çalışmalar maça sertliği, maça kalitesi, döküm parça ile optimizasyonu gibi konuları ele almıştır. Literatürde genelde kalıplama prosesi ve döküm hatalarına etki eden parametreler incelenmiş ve üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Maça parametreleri ile yapılmış çalışmalar çok az olduğu için buraya katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışma ile maça üretim makinelerine ait parametrelerin değiştirilerek ürün kalitesinin artırılmasının yanı sıra kullanılan kimyasal maddeler minimum seviyeler ile optimum kullanımının sağlanması ve çalışan ile çevre sağlığının olumsuz olarak etkilenmesinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte ilerki zamanlarda yapılacak benzer çalışmalarda maça üretimi sırasında hangi parametrenin hangi değişken üzerinde etkili olduğu ile ilgili bir rehber kaynak niteliğinde olacaktır. Dökümhane ve benzer sektörlerde maça ve kalıp gibi kimyasal maddeler ile oluşturulan yardımcı ürünlerin ortaya çıkarılmasında hem çalışana hem de çevreye oldukça zararlı olan kimyasal maddelerin daha az kullanılmasını sağlayacaktır. Maça üretiminde kimyasal madde kullanımı gerektirmeyen, veya minimum miktarda kimyasal madde kullanımı sağlayarak makine parametrelerinin düzenlenebilecek ve en uygun şartların oluşturulması sağlanabilecektir. Araştırmada maça sertliğine etki eden 10 adet parametrenin durumu incelenecektir. Maça kum tanelerinin birbirine bağlanması için kullanılan sıvı fazdaki reçine ve izosiyanat bu araştırmada sabit parametre olarak belirlenmiştir. Maçanın gerekli mukavemetini sağlayane en önemli bileşen reçine ve izosiyanattır ancak dimetiletiamin gazına göre insana ve çevreye zarar verme potansiyeli gerek havalandırma olanakları ile gerekse kapalı sistemler ile maçaya ilave edildiği için ve sıvı fazda işlem gördüğü için sabit parametre olarak ele alınıp aşırı uçucu gaz olan dimetiletiamin miktarının düşürülmesi amaçlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu makalede ki çalışma, deneysel bir çalışma olup deneysel tasarım metodlarından biri olan kesirli faktöryel deney tasarımı metodu kullanılarak yapılmıştır. Kesirli faktöryel deney tasarımı her bir girdi değişkeninin diğer tüm girdi değişkenleriyle etkileşimi tahmin edebilen bir metottur. Çoğu zaman deney yapan araştırmacıların tam faktöryel deneyleri gerçekleştirmek için yeterli zamanı, kaynakları veya bütçesi olmayabilir. Eğer deneyi yapanlar belirli yüksek dereceli etkileşimlerin (üçüncü derece ve daha yüksek) önemli olmadığını makul bir şekilde varsayabilirlerse, o zaman ana etkiler ve iki dereceli etkileşimler hakkındaki bilgiler, tam faktöryel deneyin yalnızca bir kısmını çalıştırarak elde edilebilir. Deneycilerin ana etkileri ve istenen etkileşim etkilerini minimum sayıda deneme veya deneysel çalıştırmada incelemesine olanak tanıyan bir tür ortogonal dizi tasarımına kesirli faktöryel tasarım adı verilir. Bu kesirli faktöryel tasarımlar endüstride en yaygın ve yaygın olarak kullanılan tasarım türleridir (Antony, 2003). Deneysel çalışmalar 4 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; planlama aşaması, tasarım aşaması, yürütme aşaması ve analiz aşaması'dır (Antony, 2003). Çalışmada izlenecek adımlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney aşamalarında uygulanacak adımlar
(Steps to be applied in the experimental stages) (Rekab ve Shaikh 2005)

ADIM	YAPILACAK ÇALIŞMA	
PLANLAMA ADIMLARI	Adım-1	Deney ekibini oluşturulması. Ekibi oluştururken, ekip üyelerinin teknik olarak yetkin ve aynı zamanda anlaşılması kolay olduğundan emin olunmalıdır.
	Adım-2	Hedeflerin belirlenmesi. Başlangıçta, deney için gerçekçi hedefler belirlenmelidir.
	Adım-3	Çıktının belirlenmesi. Bu adım, deneycinin hangi çıktı değişkenini incelemek istediğiyle ilgilidir. Bu, sonraki iki adımı etkilediği için önemli bir adımdır.
	Adım-4	Giriş faktörlerinin (parametrelerinin) seçilmesi. Bu adım, tepkiyi etkileyen faktörleri dikkatlice belirlemekle ilgilidir. Bir faktörün atlanması veya alakasız bir faktörün dahil edilmesi sonuçları olumsuz yönde etkileyebilir.
TASARIM ADIMLARI	Adım-1	Faktörlere değerlerin atanması. Planı yapılmış olan deneyde tasarımcı, her gözlem için faktörlere değerler atmalıdır. Bu değerler birkaç seviyede olabilir.
	Adım-2	Deneysel tasarım metodunun seçilmesi ve deney planı oluşturulması
YÜRÜTME ADIMLARI	Adım-1	İlk başlatma. Testleri yürütmedeki bu adım, birkaç deneme çalıştırması ve ilk çalıştırmalardan kaynaklanan sorunları gidermek için deneyin kurulmasını içerir. Bu, gerçek deneyin sorunsuz bir şekilde yürütülmesini sağlar.
	Adım-2	Deneysel çalıştırmalar. İlk başlatmadan sonra, bu adımda tasarım planına göre çalıştırmalar yapılır.
	Adım-3	Deneysel çalıştırmaların tamamlanması. Bu adım, tüm sonuçların düzgün bir şekilde belgelenmesini ve deneysel kurulumun ve ekipmanın gelecekteki deneyler veya başkaları tarafından kullanım için orijinal durumlarına geri getirilmesini sağlar.
ANALİZ ADIMLARI	Adım-1	Çıktıyı etkileyen önemli faktörleri belirlenmesi.
	Adım-2	Faktörlerin test edilmesi ve regresyon eşitliğinin bulunması

3.1. Planlama Adımları (Planning Steps)

- **Deney ekibi belirlenmesi:** Deneysel çalışma yapılmadan önce maça üretim tesisinde çalışan mühendis ve teknisyenlerden oluşan ekip kuruldu.
- **Hedefler:** Çalışmanın hedefi; maça üretim parametrelerinden oluşan ve amin gazı miktarını azaltmaya imkan verecek sertlik formülünün elde edilmesidir. Bu hedef ekip ile paylaşıldı.
- **Çıktının belirlenmesi:** 10 adet maça üretim parametresinden oluşan deneysel çalışmanın çıktısı maça sertliğidir. Sertlik parametresi maçanın kalıp içinde ki döküm sırasında basınca ve sıcaklığa dayanmasını sağlayan parametrelerden biridir.
- **Giriş faktörlerinin (parametrelerinin) seçilmesi:** Maça sertliğini etkilediği düşünülen 10 adet parametre seçilmiş ve aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Giriş faktörleri (parametreler) (Input factors (parameters))

SIRA	PARAMETRELER	BİRİM	AÇIKLAMA
1	Kürleme gazı (DMEA) ön dozaj miktarı	cc	DMEA pompasının kalıp içine enjekte edeceği gaz miktarı
2	Kürleme gazı (DMEA) son dozaj miktarı	cc	DMEA pompasının kalıp içine enjekte edeceği gaz miktarı
3	Gazlama (yıkama) süresi	saniye	Amin gazının kalıba enjekt edilme süresi
4	Gazlama basıncı	bar	DMEA'nın kalıba verileceği basınç
5	Üfleme basıncı	bar	Kumun kalıba iletileceği hava basıncı
6	Max. basınca çıkma süresi	saniye	Seçilen basınç değerine ulaşma süresi
7	Kalıp kapanma yüzeylerinde sızdırmazlık conta varlığı	var/yok	Kalıp öpüşme yüzeyinde conta ihtiyacı
8	Kürleme gazı (DMEA) sıcaklığı	°C	DMEA'nın enjekte edilme sıcaklığı
9	Kaçıncı maça (kanal temizliği sonrası ölçüm sırası)	sıra	Kalıp hava ve gaz tahliye kanalları temizliği sonrası kaçıncı maçadan ölçüm alınacağı
10	Filtre giriş/çıkış alanı oranı	mm ²	DMEA'nın tahliye olacağı filtrelerin açıklık değeri

Deneysel tasarım aşamasında maça sertliğini etkilediği düşünülen bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bunlar; maça kumu bağlayıcısı (reçine) ve katalizör oranı, maça kumu (rejenere edilmiş silis), sertlik ölçüm noktası, maça makinesi operatörü, maça makinesi tipi, amin gazı yıkama havası basıncı (3 bar)'dır. Bu faktörlerin de elbette sertlik üzerinde etkiler vardır ancak tamamından oluşan bir deney planı yapmak hem yüksek maliyet oluşturacağı hem de zaman alacağı için sabit tutulmuşlardır. Gelecekte yapılacak araştırmalarda bu faktörler ile de çalışma yapılabilecektir.

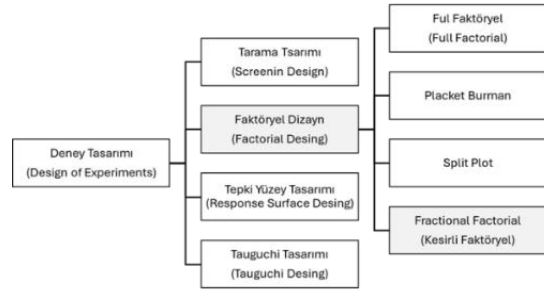
3.2. Tasarım Adımları (Design Steps)

- **Giriş faktörlerinin (parametrelerinin) alt ve üst seviyelerinin belirlenmesi:** Maça sertliğini etkilediği düşünülen 10 adet parametrenin alt ve üst seviyeleri seçilmiş ve tablo 3'de verilmiştir. Bu değerler seçilirken literatürden (Hunter vd., 2005; Antony, 2003) ve deneysel çalışma yapılan maça üretim tesisinin üretim reçetelerinden faydalanılmıştır.

Tablo 3. Giriş faktörlerinin alt ve üst seviyeleri (Lower and upper levels of input factors)

SIRA	PARAMETRELER	BİRİM	ALT SEVİYE	ÜST SEVİYE
1	Kürleme gazı (DMEA) ön dozaj miktarı	cc	3	9
2	Kürleme gazı (DMEA) son dozaj miktarı	cc	1	3
3	Gazlama (yıkama) süresi	s	10	23
4	Gazlama basıncı	bar	1	2,5
5	Üfleme basıncı	bar	3	5
6	Max. basınca çıkma süresi	s	4	8
7	Kalıp kapanma yüzeylerinde sızdırmazlık conta varlığı	var/yok	yok	var
8	Kürleme gazı (DMEA) sıcaklığı	°C	35	60
9	Sertlik ölçüm sıra maça	sıra	5	20
10	Filtre giriş/çıkış alanı oranı	mm ²	1,92	3,98

- **Deneysel tasarım metodu seçilmesi :** Deneysel çalışma DOE (Desing of Experiment) yöntemlerinden olan kesirli faktöryel dizayn metodu ile yapılacaktır (Şekil 1). Yöntem Minitab 22 paket programından faydalanılarak kullanılacaktır.



Şekil 1. Deney tasarım metodları (Experimental design methods) (Antony, 2003)

3.2.1.Minitab DOE Tasarım Adımları (Minitab DOE Design Steps)

Seçilen parametreler (faktörler) Minitab çalışma sayfasına işlendikten sonra program üzerinde DOE (Design of Experiment) adımları takip edilerek “DOE, Factorial, Create Factorial Analysis” ile model tasarımı yapılmıştır. Çözünürlük tablosundan 10 faktör ve 32 deneye karşılık gelen IV çözünürlük seçilmiştir. Bu aşamadan sonra bağımsız değişkenler (faktörler) düşük (low) ve yüksek (high) seviyeleri ile sisteme işlenmiştir. Faktörlerin seviyeleri sisteme girildikten sonra programda deney planı (Tablo 4) oluşturulmuştur.

Tablo 4: Deney planı (Experiment plan)

Deney no	Ön dozaj (cc)	Son dozaj (cc)	Gazlama süresi (s)	Gaz basıncı (bar)	Üfleme basıncı (bar)	Max. basınca çıkma süresi (s)	Conta	Gaz sıcaklık (°C)	Filtre alanı (mm ²)	Sertlik maça sıra
1	3	1	10	1	3	8	yok	60	3,82	20
2	9	1	10	1	3	4	var	35	1,92	20
3	3	3	10	1	3	4	var	35	3,82	5
4	9	3	10	1	3	8	yok	60	1,92	5
5	3	1	23	1	3	4	var	60	1,92	5
6	9	1	23	1	3	8	yok	35	3,82	5
7	3	3	23	1	3	8	yok	35	1,92	20
8	9	3	23	1	3	4	var	60	3,82	20
9	3	1	10	2,5	3	4	yok	35	1,92	5
10	9	1	10	2,5	3	8	var	60	3,82	5
11	3	3	10	2,5	3	8	var	60	1,92	20
12	9	3	10	2,5	3	4	yok	35	3,82	20
13	3	1	23	2,5	3	8	var	35	3,82	20
14	9	1	23	2,5	3	4	yok	60	1,92	20
15	3	3	23	2,5	3	4	yok	60	3,82	5
16	9	3	23	2,5	3	8	var	35	1,92	5
17	3	1	10	1	5	8	var	35	1,92	5
18	9	1	10	1	5	4	yok	60	3,82	5
19	3	3	10	1	5	4	yok	60	1,92	20
20	9	3	10	1	5	8	var	35	3,82	20
21	3	1	23	1	5	4	yok	35	3,82	20
22	9	1	23	1	5	8	var	60	1,92	20
23	3	3	23	1	5	8	var	60	3,82	5
24	9	3	23	1	5	4	yok	35	1,92	5
25	3	1	10	2,5	5	4	var	60	3,82	20
26	9	1	10	2,5	5	8	yok	35	1,92	20
27	3	3	10	2,5	5	8	yok	35	3,82	5
28	9	3	10	2,5	5	4	var	60	1,92	5
29	3	1	23	2,5	5	8	yok	60	1,92	5
30	9	1	23	2,5	5	4	var	35	3,82	5
31	3	3	23	2,5	5	4	var	35	1,92	20
32	9	3	23	2,5	5	8	yok	60	3,82	20

3.3. Yürütme ve Analiz Adımları

Deney planı oluşturulduktan sonra deneysel üretimlerin yapılacağı maça makinesinde hazırlıklar tamamlanıp ve deney planındaki parametreler test edilmiştir. Herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşılmadan deneysel üretimlere başlanmıştır. Deney planında ki parametre değerleri makineye girilip maça üretimleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen maçaların üzerinde çizik sertlik ölçme aleti ile sertlik değerleri ölçülerek kayıt edilmiştir. Yürütme aşaması şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deneysel üretim uygulama aşaması (Experimental production implementation phase)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Elde edilen sertlik değerleri (Tablo 5) Minitab 22 paket programına girildikten sonra program üzerinden ilgili komutlar ile model özeti, ANOVA ve regresyon eşitlikleri elde edilmiştir.

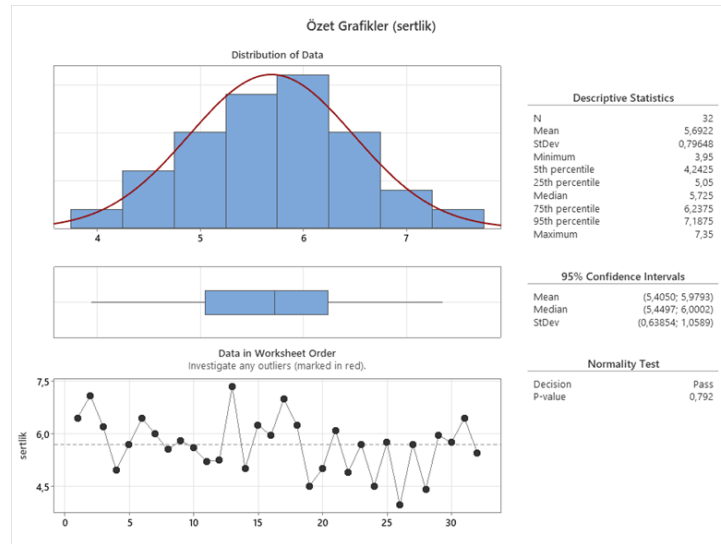
Tablo 5: Sertlik değerleri (Hardness values)

DENEY NO	SERTLİK DEĞERİ	DENEY NO	SERTLİK DEĞERİ
1	6,45	17	7,00
2	7,10	18	6,25
3	6,20	19	4,50
4	4,95	20	5,00
5	5,70	21	6,10
6	6,45	22	4,90
7	6,00	23	5,70
8	5,55	24	4,50
9	5,80	25	5,75
10	5,60	26	3,95
11	5,20	27	5,70
12	5,25	28	4,40
13	7,35	29	5,95
14	5,00	30	5,75
15	6,25	31	6,45
16	5,95	32	5,45

4.1. Model özeti, ANOVA ve Regresyon Denklemi (Model summary, ANOVA and Regression Equation)

Deneyimiz 10 faktörlü, her bir faktörde 2 seviyeli 1 tekrarlı ve maça sertliğini faktörlere göre optimize etmek amaçlıdır. Kesirli faktöryel tasarımı kullanılarak 32 farklı deney yapılmıştır. Bunun için maça üretim proses parametreleri ele alınarak, bunların değişiminin çıktı üzerindeki etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Çalışmada, kontrol edilemeyen faktörleri en aza indirmek amacıyla bazı değişkenlerin deney boyunca aynı tutulması sağlanmıştır. Öncelikle temel etkenlerden biri olan reçine miktarı değişkeni sabitlenmiştir. Çalışan operatörün aynı kalmasının sağlanması amacıyla deneyler hep aynı vardiyada yapılmıştır. Yine çalışma şartlarını etkileyebileceğini düşündüğümüz ortam sıcaklığının sabit kalması için deneyler aynı vardiyalarda aralıksız yapılarak, toplam 32 deney tamamlanmıştır.

Elde edilen çıktılar Minitab 22 programına girildikten sonra, *Stat - Doe - Factorial - Analyze Factorial Design* aşamaları seçilerek analiz safhasına geçilmiştir. Çıktı olarak sertlik seçilmiştir. *Terms* sekmesi işaretlenerek, tüm değişkenler seçilmiştir. *Prediction* sekmesinde güven aralığı 95 olarak tanımlanmıştır. Grafiklerde normal ve pareto grafikleri seçilmiştir.



Şekil 3. İstatistik sonuçları (Statistical results)

Şekil 3’de ki grafikte verildiği gibi 32 deney sonucunda ortalama sertlik 5,6922 olarak hesap edilmiştir. Standart sapma 0,769’dur. Elde edilen minimum sertlik 3,95, maksimum sertlik ise 7,95’tir. Tasarımın özeti tablo 6’da verilmiştir. Model tasarımı 10 faktör ve 32 adet deneyden oluşmaktadır. Çözünürlük IV’tür.

Tablo 6: Tasarım modeli özeti (Design summary)

DİZAYN BİLGİLERİ	AÇIKLAMA
Factors (Faktörler)	10
Runs (Deney sayısı)	32
Blocks (Bloklar)	1
Base Design (Dizayn)	10:32
Replicates (Tekrarlar)	1
Center pts (total)	0
Resolution (Çözünürlük)	IV
Fraction (Kesir)	1/32

Model özeti tablosu oluşturulmuştur (Tablo 7). Buna göre S değeri 0,391222, R-sq değeri %83,66 olarak elde edilmiştir. Hem S değeri hem de R-sq değeri modelin oldukça iyi kurgulandığını ve çıktığı etkileyen faktörlerin çıktı üzerinde etkili olduğu kanıtlanmıştır.

Tablo 7: Model S ve R değerleri (Model S and R values)

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,391222	83,66%	75,87%	62,05%

Tablo 8: Varyans analizi (ANOVA) Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	16,4514	1,6451	10,75	0,000
Linear	7	11,4443	1,6349	10,68	0,000
Ön dozaj	1	3,1563	3,1563	20,62	0,000
Son dozaj	1	2,0251	2,0251	13,23	0,002
Gazlama süresi	1	0,4876	0,4876	3,19	0,089
Üfleme basıncı	1	1,7345	1,7345	11,33	0,003
Conta	1	0,797	0,797	5,21	0,033
Gaz sıcaklık	1	1,5095	1,5095	9,86	0,005
Filtre alanı	1	1,7345	1,7345	11,33	0,003
2-Way Interactions	3	5,0071	1,669	10,9	0,000
Son dozaj*gazlama süresi	1	0,8945	0,8945	5,84	0,025
Conta*gaz sıcaklık	1	2,5595	2,5595	16,72	0,001
Conta*filtre alanı	1	1,5532	1,5532	10,15	0,004
Error	21	3,2141	0,1531		
Total	31	19,6655			

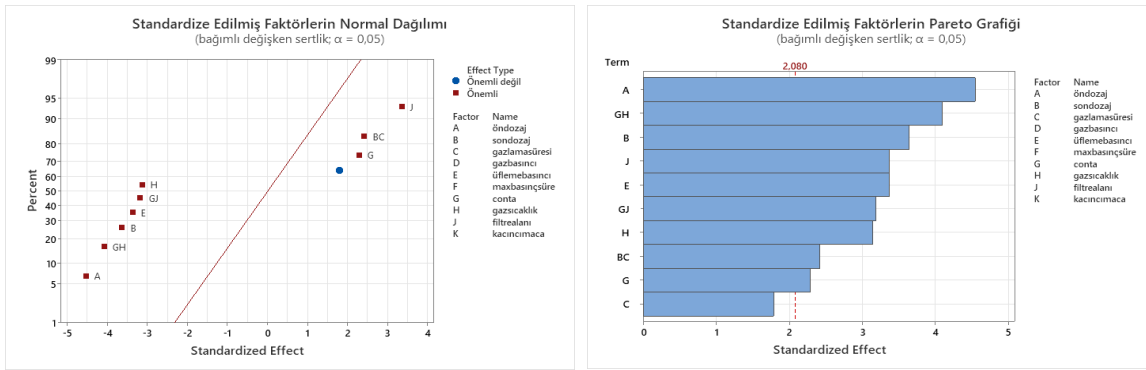
Elde edilen varyans analizi tablosuna (Tablo 8) göre gazlama süresi hariç diğer tüm faktörlerin P değerlerinin $\alpha < 0,05$ sağladığı %95 güven aralığı içinde olduğu görülmektedir. Model, 7 ana faktörden ve 3 adet ikili etkileşimden oluşmaktadır. Bu faktörler ile elde edilen regresyon formülü (2) aşağıda verilmiştir.

Regresyon Formülü

(2)

$$\begin{aligned} \text{sertlik} = & 8,412 - 0,1047 \text{ öndozej} - 0,676 \text{ sondozej} - 0,0325 \text{ gazlamasüresi} - 0,2328 \text{ üflemebasıncı} \\ & + 1,898 \text{ conta} - 0,01738 \text{ gazsıcaklık} + 0,2451 \text{ filtrealanı} \\ & + 0,0257 \text{ sondozej} * \text{gazlamasüresi} - 0,02262 \text{ conta} * \text{gazsıcaklık} - 0,2319 \text{ conta} * \text{filtrealanı} \end{aligned}$$

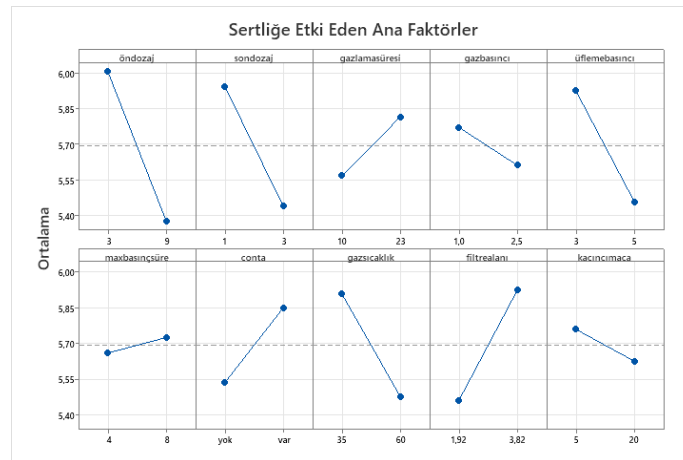
Standardize edilmiş faktörlerin etkilerine bakıldığında tüm faktörlerin çizginin sağında ya da solunda sıfırdan uzakta etki gösterdikleri sadece bir faktörün önemsiz olarak yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 8 (a)). Pareto analizine göre (Şekil 8(b)) hesaplanan 2,080 çizgisinin sağında 9 faktör yer almıştır. Bu faktörlerin tamamının çıktısı üzerinde etkili olduğu kanıtlanmıştır. Yedi parametre (öndozej, sondozej, gazlamasüresi, üflemebasıncı, conta, gazsıcaklık, filtrealanı) karşılaştırmalı olarak daha önemli olduğundan (Tablo 8), bu nedenle çoklu performans özellikleri için optimum işlem parametrelerini tahmin etmek üzere sadece bu parametreler dahil edilmiştir.



Şekil 8. (a) Standardize edilmiş faktörlerin dağılımı, (b) Standardize edilmiş faktörlerin Pareto grafiği ((a) Distribution of standardized factors, (b) Pareto chart of standardized factors)

4.2. Faktörlerin Etkileri (Effects of factors)

Deney 10 faktörün 2 seviyesi ile gerçekleştirilmiştir. Sertliğe etki eden faktörlerin etki değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre sertlik çıktısı üzerinde etkili olan faktörler istatistiksel olarak kanıtlanmıştır. Faktörlerin ana etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Amin gazı tüketimini belirleyen faktörler grafikte ortalama ile kesişim açısı daha fazla olarak yer almıştır. Max basınç süre ve kaçınıcı maça faktörleri görüldüğü gibi ortalama 5,70 sertlik çizgisini kesim açısı diğer faktörlere göre düşüktür.



Şekil 9. Sertliğe etki eden ana faktörler (Main factors affecting hardness)

4.2.1. İkili Etkileşimler (Interactions)

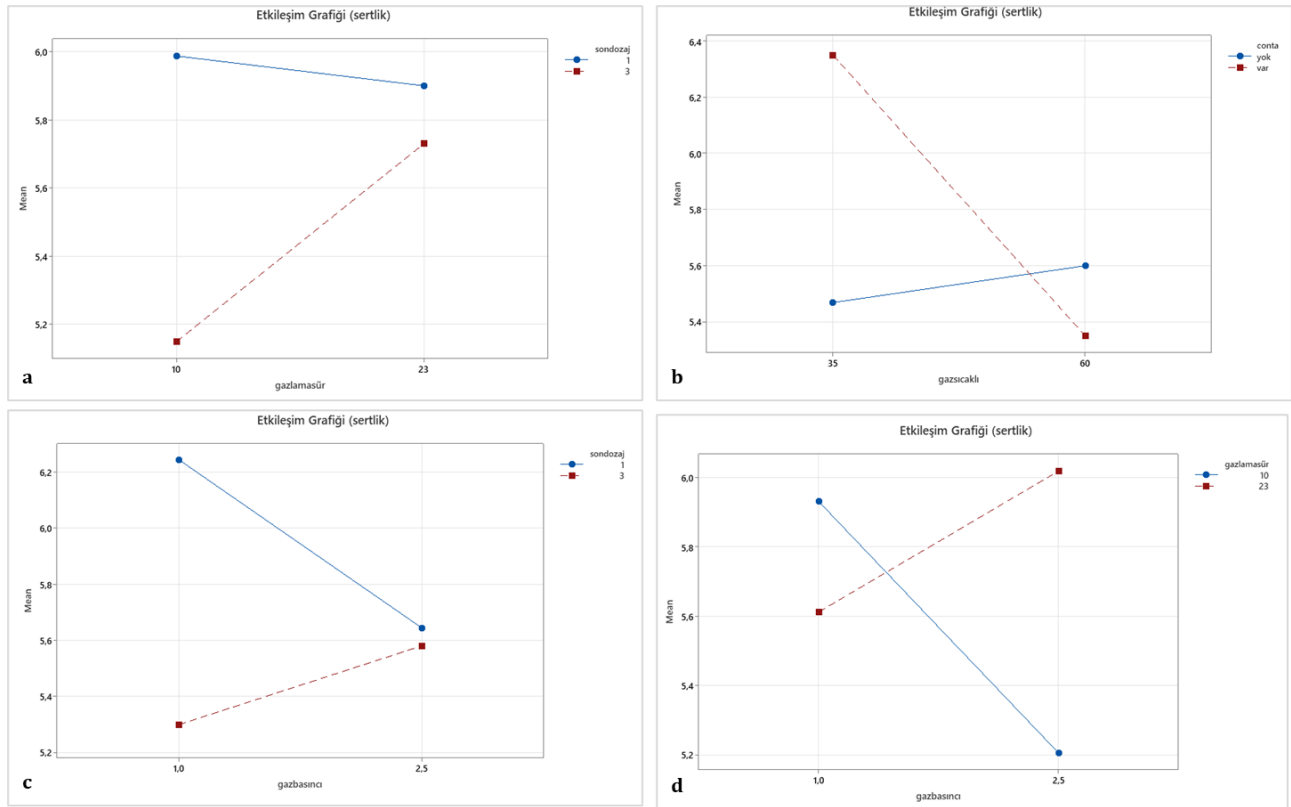
İki faktör birbirine paralel ise etkileşim olmadığı, birbirini dik olmayan açı ile kestiğinde güçlü etkileşim olduğu ve tam çapraz kestiğinde ise çok güçlü etkileşim olduğu belirtilmiştir. Çalışmada etkileşim içinde olan faktörlerden

bazıları aşağıda verilmiştir. Şekil 10'da verildiği gibi, deneyden elde edilen en önemli bulgulardan biri, gazlama süresi ile son dozaj etkileşimidir. Son dozaj yüksek seçildiğinde gazlama süresi parametresinin artırılması sertlik çıktısını belirgin olarak etkilemektedir. Ancak, son dozaj düşük seçilirse gazlama süresinin seviyesi çıktı üzerinde etkisi önemsiz hale gelmektedir. Bu ilişki, sertlik çıktısını bozmadan gazlama süresini düşürecek bir seçenek olduğu sonucunu göstermektedir (Şekil 10 a).

Gaz sıcaklığı ile conta etkileşimi de çıktı üzerinde önemli bir etkileşim olarak tespit edilmiştir. Contanın olmadığı durum, gaz sıcaklığının etkisini ortadan kaldırmakta ve çıktı kötüleşmektedir. Conta var olduğunda düşük gaz sıcaklığı istenen çıktıya ulaşmakta önemli etki göstermektedir (Şekil 10 b).

Şekil 10 (c)'de son dozaj ile gaz basıncı etkileşimi verilmiştir. Son dozaj 1 cc iken gaz basıncının 2,5 bar seçilmesinde sertlik 5,64 olurken son dozaj 3'e çıkarıldığında 2,5 bar basınçta 5,58 olmaktadır. Dolayısıyla sertlikteki 0,06'lık fark anlamsız hale gelmektedir. Son dozajı 3 cc seçmek yerine 1 cc seçerek makinanın gazı kalıba 2,5 bar'da ilemesi ile hem gaz tasarrufu sağlanmış olacak hem de ortama DMEA yayılımı azaltılmış olacaktır.

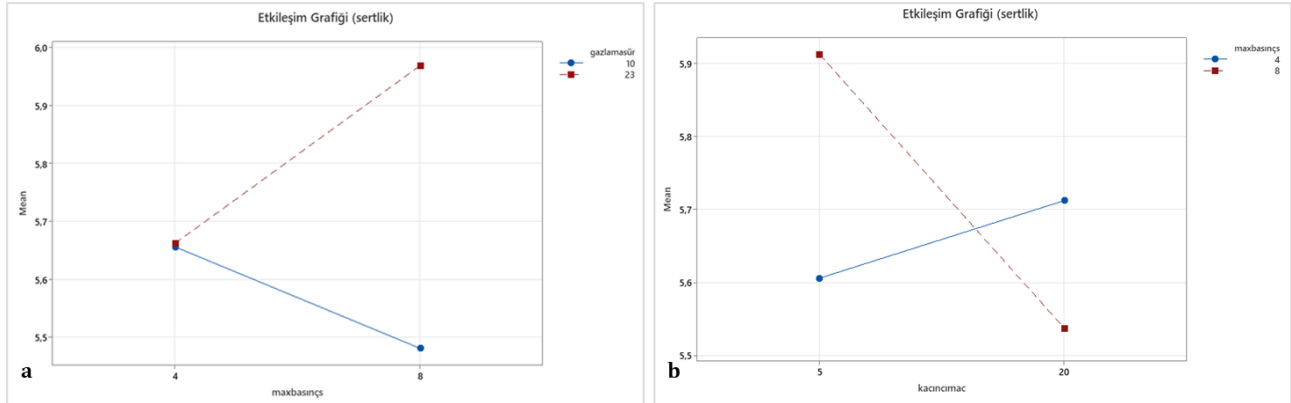
Gazlama süresi ile gaz basıncı etkileşimi şekil 10 (d)'de verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere iki faktör arasında oldukça güçlü bir etkileşim vardır. Gazlama basıncı 1 olarak seçildiğinde sertlik değerleri sırasıyla 10 saniye için 5,93, 23 saniye için 5,61 olmaktadır. Aralarında ki fark 0,32 (%5) çıkmaktadır. Ancak gazlama basıncı 2,5 bar seçildiğinde gazlama süresinin 10 ile 23 saniye arasında seçilmesi etkileşimi artırmakta ve sertlik değerleri arasında yaklaşık olarak %15'lik bir fark yaratmaktadır. Seri üretim şartlarında hem üretim verimliliği açısından hem de çalışan ve proses güvenliği açısından 10 saniye gazlama süresi seçilmesi ve DMEA gazının 2,5 bar ile kalıba enjekte edilmesi son derece faydalı olacaktır. Sert maça tercih edildiğinde 10 saniye ve 2,5 bar için elde edilebilecek sertlik değeri 5,2 olacaktır.



Şekil 10. Sertliğe etki eden ana faktörlerin ikili etkileşimleri a) gazlamasüresi-sondozaj, b) conta-gazsıcaklık, c) sondozaj-gazbasıncı, d) gazbasıncı-gazlamasüresi (The interactions of the main factors affecting the hardness are a) gassing time-final dosage, b) seal-gas temperature, c) final dosage-gas pressure, d) gas pressure-gassing time)

Şekil 11'de gazlama süresi ile maxbasıncısüre etkileşimi verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere iki faktör arasında güçlü bir etkileşim vardır. Max basınca ulaşılacak süre 4 saniye olarak seçildiğinde gazlama süresinin etkisi ortadan kalkmaktadır. Max basınca ulaşma süresi 8 saniye olarak seçildiğinde ise 10 saniyelik gazlama süresinde sertlik değeri 5,48 ile etkileşimde ki en iyi değerini almaktadır. Seri üretim şartlarında eğer maça sertlik değeri 5,6 ile 5,7 arasında olması isteniyorsa max basınca ulaşma süresinin 4 saniye seçilmesi üretim verimliliği açısından iki kat karlılık sağlayacaktır.

Şekil 11’de max basınç süresi ile kaçınıncıma etkileşimi verilmiştir. Bu etkileşim çok güçlü bir etkileşim olarak elde edilmiştir. Max basınca ulaşma süresi 8 saniye seçildiğinde filtre kanalı 20. maçada temizlenirse (tahliye kanalı çapı daralır) amin gazı daha fazla sürede ve yoğunlukta maçaya temas edecek ve böylece maça sertliği artacaktır. Max basınca ulaşma süresi 4 saniye seçildiğinde 5.maçadan sonra sertlik değeri 5,60 olmaktadır. Eğer bu sertlik değeri yeterli oluyor ise 8 saniye seçmek yerine 4 saniye seçilmesi işletme verimliliği açısından faydalı olacaktır.



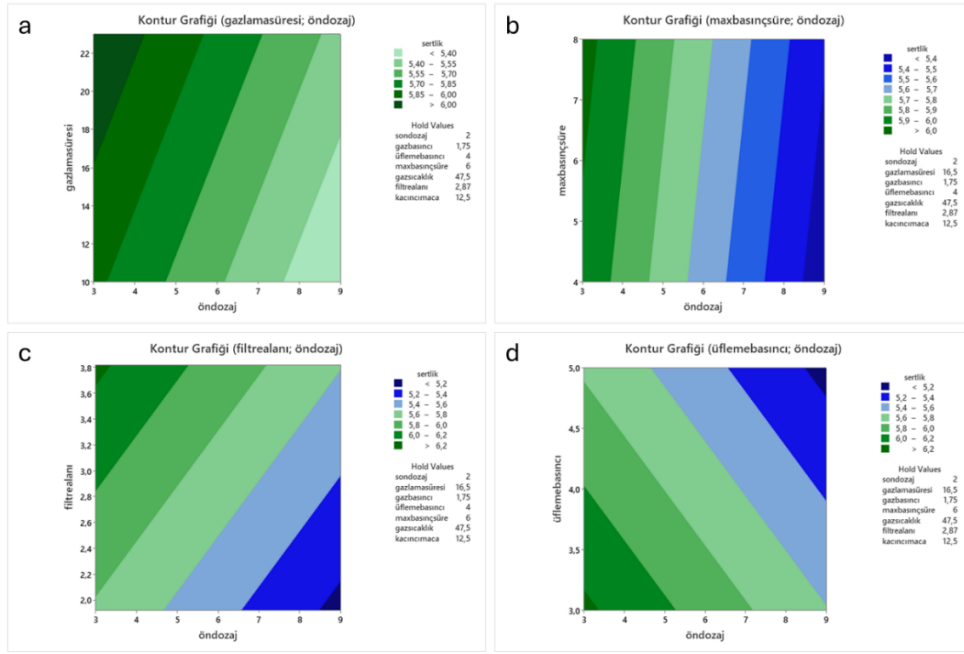
Şekil 11. Sertliğe etki eden ana faktörlerin ikili etkileşimleri a) gazlamasüresi-maxbasıncsüre, b) kaçınıncıma-maxbasıncsüre (The interactions of the main factors affecting the hardness are a) gassing time-max. pressure time, b) number of cores-max. pressure time)

4.3.Kontur Grafikleri (Counter Plots)

Ön dozaj ve son dozajla ilişkili parametrelerin sertlik değerleri kontur grafiklerinde verilmiştir.

4.3.1 Sertlik Çıktısının Ön Dozaj-Gazlama Süresi, Ön Dozaj-max Basınç Süre, Ön Dozaj-Filtrealanı ve Ön Dozaj-Üfleme Basıncı Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Pre-dosage-Aerating Time, Pre-dosage-Max Pressure Time, Pre-dosage-Filter Area and Pre-dosage-Blowing Pressure Factors)

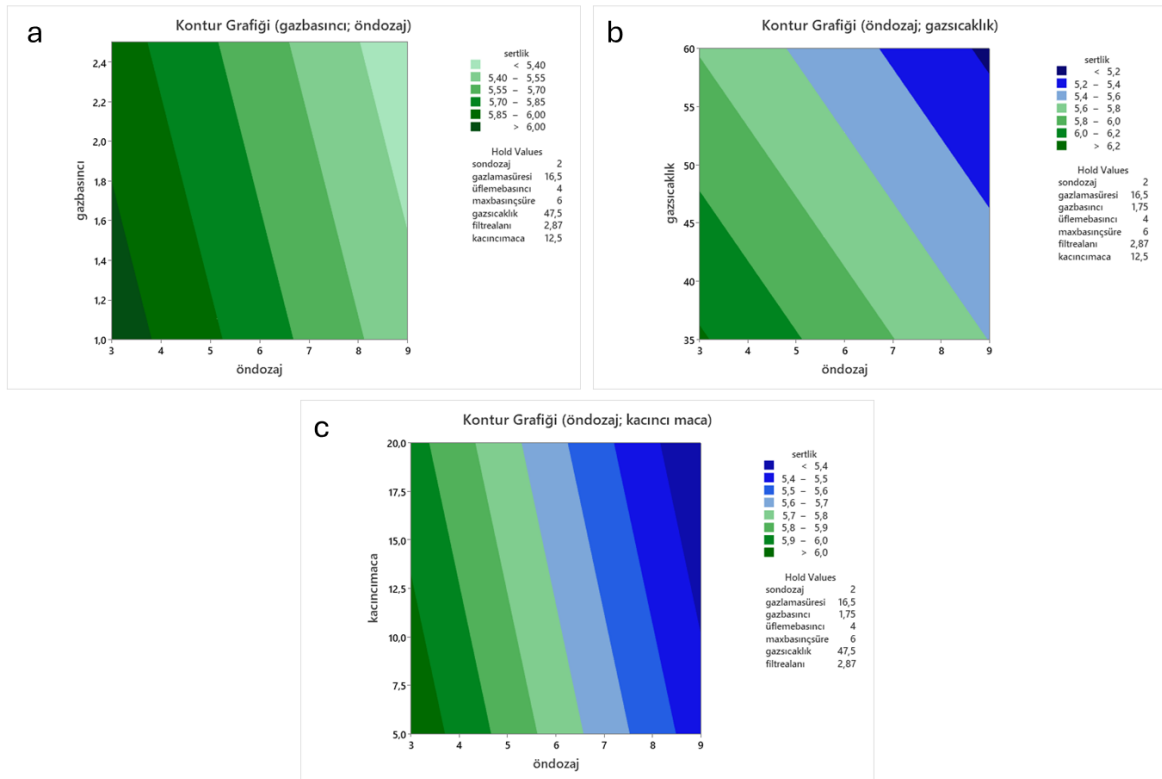
Şekil 12’de ön dozajın; (a) gazlama süresi, (b) max basınç süre, (c) filtrealanı, (d) üfleme basıncı parametreleri ile sertlik değişimi kontur grafiği verilmiştir. Sertlik değeri yeşil renkten mavi renge doğru ilerledikçe küçülmektedir (ölçü aleti batma derinliği azaldığı için maça sertleşmektedir). Şekil 12 (a)’da 5,5 sertlik değerleri ortalamasının altında olduğu için gazlama süresinin 10-12 saniye aralığında seçilmesi durumunda ön dozaj miktarı 5,5 cc olacaktır. Bu değerde 16-18 saniye seçilip 8-9 cc aralığında bir değer verilmesine göre tercih edilecektir. Ön dozaj ile gazlama süresinin değişimini gösteren grafikte (a) ön dozaj 5,5 cc ve son dozaj 2 cc (hold values) olduğu için bu seçenekte toplam gaz tüketimi 7,5 cc olmaktadır. Gaz tüketiminin azaltılması için gazlama süresinin mümkün mertebe düşük seçilmesi gerekmektedir. Şekil 12 (b)’de ön dozaj miktarı ile max basınca ulaşma süresi arasında güçlü bir ilişki olmadığı anlaşılmaktadır. Grafiğe bakıldığında sertlik değerini kodlayan renk şeritlerinin neredeyse dik olarak konumlandığı görülmektedir. Ancak bir miktar gaz tüketiminde azaltma sağlamak adına max basınca ulaşma süresi 4 seçilirse ve ön dozaj miktarı 5 cc seçildiğinde 5,5 seviyelerinde sertlik değeri elde edilmektedir. Bu sertliği elde etmek için son dozaj 2 cc olarak grafikte verilmiş. Toplam gaz miktarı 7 cc olmaktadır. Ön dozaj ve son dozajın max değerleri ile oluşturulacak reçeteye göre 5 cc daha düşük bir tüketim ortaya çıkmaktadır. Şekil 12 (c)’de ön dozaj ile tahliye kanalı (filtrealanı) arasında da güçlü bir ilişki vardır. Filtre alanı küçüldükçe maça sertliği düşmektedir. Ön dozajın 4,6 cc seçildiği durumda filtre alanı 2 mm² olursa sertlik değeri 5,4-5,6 (açık mavi bant) olmaktadır. Son dozajında 2 cc olması durumunda toplam enjekte edilen gaz miktarı 6,6 cc olmaktadır. Bu değer ile maksimum seviyelere göre %50 kazanç sağlanmaktadır. Şekil 12 (d)’de üfleme basıncı ile ön dozaj etkileşimine bakıldığında ise (d) üfleme basıncının yüksek seçilmesinin gaz tüketimini azalttığı görülmektedir. 5 barda üflenen kum ön dozaj 5 cc, son dozaj 2 cc (toplam 7 cc) ile 5,5 sertlik değerleri elde edilmektedir. Yüksek basınçta kalıba üflenen kum karışımının sertliğinin istenen seviyede olması (sert maça olması) kum tanelerinin yüksek basınç ile birbirine daha sıkı yapıştığı yorumu yapılabilir. Dolayısıyla gaz tüketiminin azaltılması için yüksek üfleme basınçları ile çalışmak gerekir.



Şekil 12. Ön dozaj (a) gazlama süresi, (b) max basınç süre, (c) filtrealanı, (d) üfleme basıncı ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Pre-dosage (a) gassing time, (b) max pressure time, (c) filter area, (d) hardness change with blowing pressure (Contour graph))

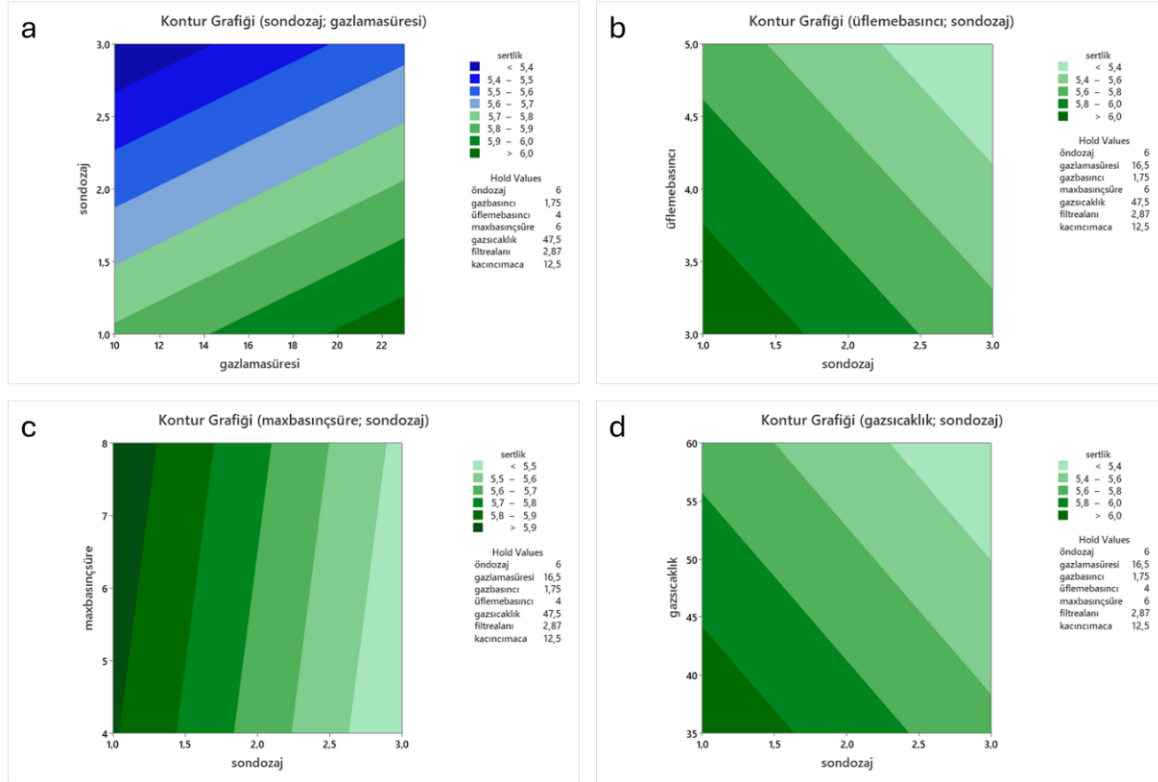
4.3.2. Sertlik Çıktısının Ön Dozaj-Gaz Basıncı, Ön Dozaj-Gaz Sıcaklığı, Ön Dozaj-Kacınıcı Maça Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Pre-dosage-Gas Pressure, Pre-dosage-Gas Temperature, Pre-dosage-Core Number Factors)

Şekil 13'te ön dozajın; (a) gaz basıncı, (b) gaz sıcaklığı ve (c) kaçınıcı maça parametreleri ile sertlik değişimi kontur grafiği verilmiştir.



Şekil 13. Ön dozaj; (a) gazlama basıncı, (b) gaz sıcaklık, (c) kaçınıcı maça ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Pre-dosage; (a) gas pressure, (b) gas temperature, (c) hardness change with escape (Contour graph))

Şekil 13 (a)'da ön dozaj ile gaz basıncı arasında güçlü bir ilişki yoktur. Grafikteki (a) ön dozaj ekseninde 5 cc seçildiğinde 5,5-5,7 sertlik değerini içeren şerit içinde kalabilmek için 2,5 ve daha yüksek gazlama basıncı ile çalışmak gerektiği tespit edilmiştir. Şekil 13 (b)'de ön dozaj ile gaz sıcaklığı arasında güçlü bir ilişki vardır. Ortalama sertlik olan 5,7 yi elde edebilmek için 5 cc gaz verilmesi ve gaz sıcaklığının max (60 °C) seçilmesi gerekecektir. Yüksek ısıda buharlaştırılmış DMEA'nin uçuculuğu daha da artacağı için kalıptaki kum tanelerine yüzeysel olarak daha rahat temas edebilecektir. Bu da sertliğe olumlu yansıtacaktır. Şekil 13 (c)'de ön dozaj ile kaçınıcı maça arasında zayıf bir ilişki vardır. Ön dozaj 5 cc seçildiğinde ortalama sertlik değerini elde etmek için filtre kanallarının her yirminci maçada temizlenmesi gerekecektir (Tahliye kanalı daralırsa amin gazı daha fazla içeride kalacağı için sertliği artıracaktır).



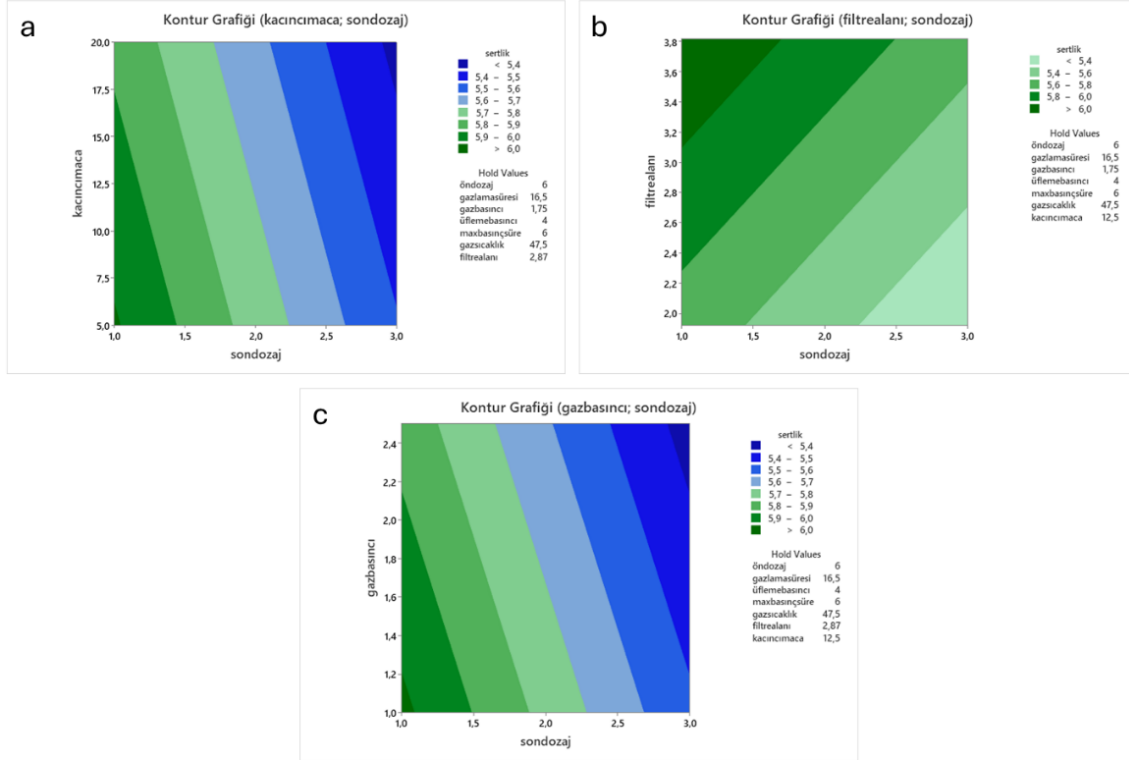
Şekil 14. Son dozaj; (a) gazlama süresi, (b) üfleme basıncı, (c) max basınç süre ve (d) gaz sıcaklık ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Final dosage; (a) gassing time, (b) blowing pressure, (c) maximum pressure time and (d) hardness change with gas temperature (Contour graph))

4.3.3. Sertlik Çıktısının Son Dozaj-Gazlama Süresi, Son Dozaj-Üfleme Basıncı, Son Dozaj-Max Basınç Süre ve Son Dozaj Gaz Sıcaklık Faktörleri ile Değişimi

Şekil 14 (a)'da son dozaj ile gazlama süresi arasında güçlü bir ilişki vardır. Gazlama süresinin düşük seçilmesi sertlik çıktısını artırmaktadır. 10 saniye gazlama süresinde 1,5 cc gaz verilmesi ile 5,6 sertlik değeri elde edilebilmektedir. Ön dozaj 6 cc olarak verildiği için toplam gaz tüketimi 8 cc olmaktadır. Maksimum seviyeler (3+9 cc=12 cc) yerine 8 cc gaz ile sertlik değerinin elde edilmesi her maça üretiminde 4 cc gaz tasarrufu yapılması anlamını taşımaktadır. Şekil 14 (b)'de son dozaj ile üfleme basıncı arasında güçlü bir ilişki vardır. Üfleme basıncının max seviyesinin seçilmesi sertliği olumlu etkilemekte ve gaz tüketimini düşürmektedir. Şekil 14 (c)'de düşük gaz miktarı ile ideal sertlik elde edilmesi için süre parametresinin mümkün olduğu kadar yüksek seçilmesi gerekir. Şekil 14(d)'de grafikteki şeritler neredeyse 45 derecelik bir açıya sahip olduğu görülmektedir. Gaz sıcaklığı arttıkça gaz miktarında düşüş sağlanabilmektedir. 1,5-2 cc aralığında gazı 60 derece sıcaklıkta 5,5 sertlik değeri elde edilebilmektedir. 6 cc ön dozaj hesaba katıldığında 12 cc gaz yerine 8 cc gaz ile aynı sertlik değeri elde edilebilmektedir.

4.3.4. Sertlik Çıktısının Son Dozaj-Kaçınıcı Maça, Son Dozaj-Filtre Alanı, Son Dozaj-Gaz Basıncı Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Last Dosage-Core Number, Last Dosage-Filter Area, Last Dosage-Gas Pressure Factors)

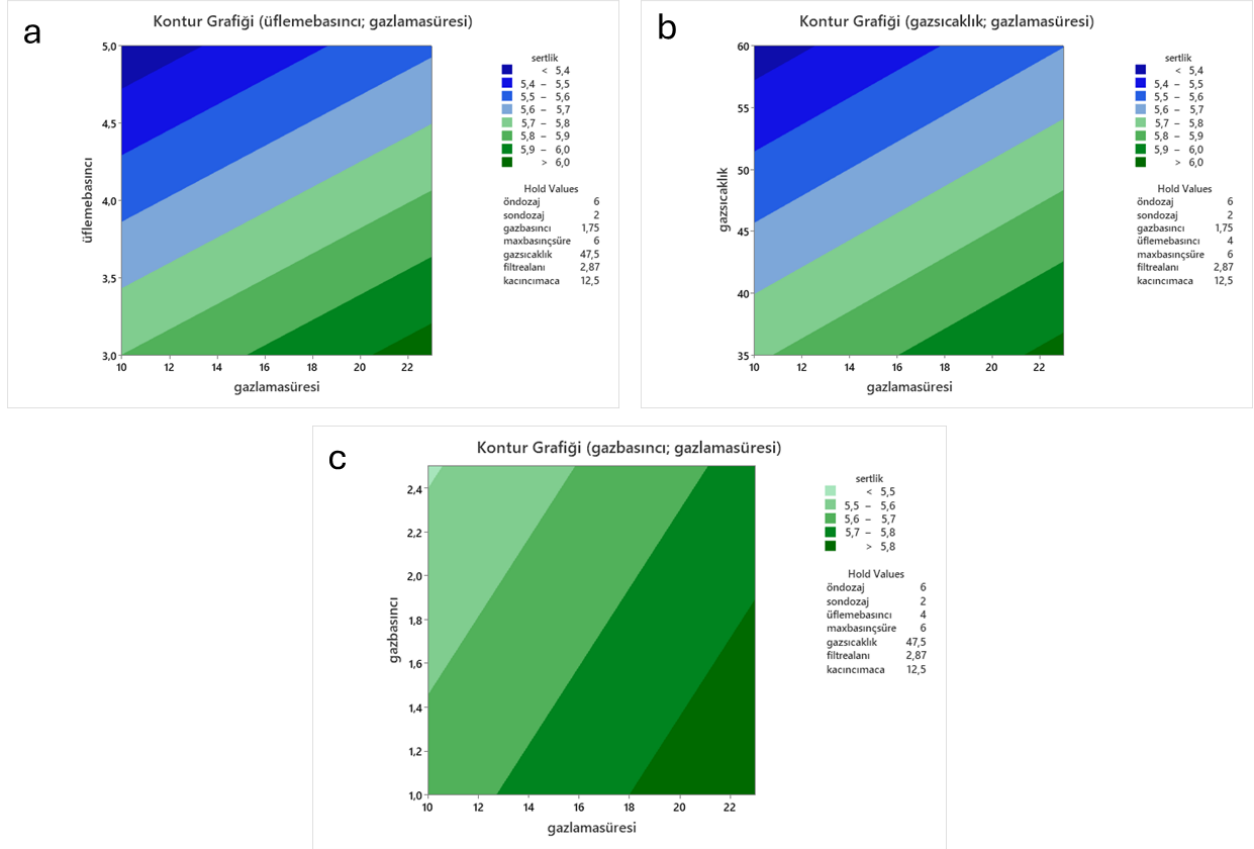
Şekil 15 (a)'da son dozaj faktörü ile kaçınıcımaca arasında güçlü bir ilişki mevcuttur. Son dozaj 1,5 cc seçildiğinde 20.maça üretiminden sonra kanal temizlenmesi ile maça sertliği 5,6-5,7 bandında gelmektedir (ortalama değer altında (5,69)). Tahliye kanalları daralması ile son dozajda verilen amin gazı daha fazla sürede kalıp içinde kaldığı için sertliğe olumlu etki etmektedir. Şekil 15 (b)'da son dozaj-kaçınıcımaca faktörlerinin etkileşimine benzer durum mevcuttur. Filtre alanı ne kadar daraltılırsa maça sertliği o kadar çok artmaktadır. Şekil 15 (c)'de son dozaj gaz basıncı faktörleri içimde etkileşim söz konusudur. DMEA son dozaj miktarı azaltılması için gaz basıncının artırılması gerekmektedir.



Şekil 15. Son dozaj; (a) kaçınıcımaca, (b) filtrealanı, (c) gazbasıncı ile sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Final dosage; (a) number of cores, (b) filter area, (c) hardness change with gas pressure (Contour graph))

4.3.5. Sertlik Çıktısının Üfleme Basıncı-Gazlama Süresi, Gazlama Süresi-Gaz Sıcaklığı, Gazlama Süresi -Gaz Basıncı Faktörleri ile Değişimi (Change of Hardness Output with Blowing Pressure-Gasing Time, Gasing Time-Gas Temperature, Gasing Time-Gas Pressure Factors)

Şekil 16 (a)'da gazlama süresi ile üfleme basıncı faktörleri arasında çok güçlü bir ilişki mevcuttur. Ön dozaj 6 cc, son dozaj 2 cc seçildiğinde gazlama süresinin 10-12 saniye aralığında, üfleme basıncının da 5 bar seçilmesi durumunda maça sertliği 5,4'den küçük olmaktadır (lacivert bölge). Her iki parametre de makineden yönetilebildiği için maça tipinin değişmesiyle oluşacak aşırı gaz tüketimleri gazlama süresinin düşürülmesi ve üfleme basıncının artırılmasıyla önlenir. Ayrıca gazlama süresinin düşürülmesi işletme verimliliği açısından olumlu bir durumdur. Şekil 16 (b)'de gazlama süresi ile gaz sıcaklığı faktörleri arasında çok güçlü bir ilişki vardır. DMEA tasarrufu için gaz sıcaklığı yüksek değerde seçilmelidir. Şekil 16 (c)'de ise gazlama süresi ile gaz basıncı faktörleri arasında da güçlü bir ilişki vardır. DMEA tasarrufu için gaz basıncı 2,5 ve mümkünse daha yüksek değerde seçilmelidir.



Şekil 16. Gazlama Süresi; (a) üfleme basıncı, (b) gaz sıcaklığı, (c) gaz basıncı sertlik değişimi (Kontur grafiği) (Gassing Time; (a) blowing pressure, (b) gas temperature, (c) gas pressure hardness change (Contour graph))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada maça üretim tesislerinde hem çalışan sağlığını tehdit eden hem de proses güvenliğini riske sokan maça kimyasallarının kullanımı sırasında azaltılması araştırılmıştır. Maça sertleştirmek için kullanılan DMEA gazının miktarının azaltılması için yönetilebilir 10 adet parametre araştırılmış ve maça sertliğini oluşturan parametrelerden oluşan matematiksel denklem elde edilmiştir. Parametrelerin R sq değeri %83,66 olarak elde edilmiştir. Bu değer modelin oldukça başarılı kurgulandığını ve bağımsız değişkenler ile sertlik çıktısının yönetilebildiği sonucunu çıkarmıştır.

Yapılan deney tasarımı ve gerçekleştirilen deneylerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır. Sonuçların en önemlileri listelenmiştir:

- DMEA gazının kalıp içerisine enjekte edilme süresi küçük, üfleme basıncı büyük değer seçildiğinde DMEA miktarının dozajlanması azaltılabilmektedir.
- Deneysel sonuçlarda bir çok faktör etkileşimi vardır. En önemli etkileşimler aşağıda verilmiştir;
 - Gaz sıcaklığı ile conta varlığı parametrelerinin etkileşimi: Gaz sıcaklığı 60 °C ve conta var olarak seçildiğinde maça sertlik değeri 5,3 mm olmaktadır (Ortalama değer 5,7 mm)
 - Filtre alanı ile conta varlığı parametrelerinin etkileşimi: Filtre alanı 1,92 mm² ve conta yok olarak seçildiğinde maça sertliği 5,1 mm olarak çıkmaktadır (Ortalama değer 5,7 mm)
 - Son dozaaj ile gaz basıncı parametrelerinin etkileşimi: Son dozaaj değeri 1 cc (düşük seviye) ve gaz basıncı 2,5 bar seçildiğinde son dozaajın 3 cc seçilme değeri ile aşağı yukarı aynı değer çıkmaktadır (5,6 mm).
 - Gazlama süresi ile gaz basıncı parametrelerinin etkileşimi: Gazlama süresi 10 sn (düşük seviye), gaz basıncı da 2,5 bar seçildiğinde maça sertliği 5,2 mm olmaktadır. Gazlama süresinin 10 sn seçilmesi işletme verimliliği açısından olumlu bir değer olup tercih edilmesi birim zamanda üretilecek maça sayısını artıracaktır.
 - Deney parametrelerinden, gazlama süresi ile son dozaaj etkileşiminin sertlik çıktısı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.
 - Son dozaaj seviyesi düşük seçildiğinde, aynı sertlik değeri farklı gazlama süresi ile elde edilebilmektedir. Son dozaaj doğru seviyeye ayarlanarak, sertlik çıktısı gazlama süresi parametresinin seviyesine duyarlı hale getirilebilir. Böylelikle, çıktıyı bozmadan, gaz tüketimi azaltılabilir.

Elde edilen bulgulara göre dakümhanelerin maça üretim birimlerinde değişik deneylerin yapılabilirliği gösterilmiştir. Çalışmanın amacı maçada kullanılan DMEA gazının azaltılması ve çalışan sağlığının korunmasıdır. Elde edilen regresyon eşitliği ve faktörlerin etkileşimlerine göre ürün kalitesine olumsuz etki etmeden kullanılan DMEA miktarı azaltılabilir. Deneye konu olan maçada her üretim adedi için yaklaşık 4 cc DMEA daha az kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu azaltma çalışanlar için daha az kimyasal içeren bir ortam yaratacağı gibi işletmenin verimlilik ve kalite standartlarına da katkı sağlayacaktır. Gelecekte çalışma diğer kimyasal maddelerin azaltılması amacı ile de tekrar edilebilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma için deneylerin yapılmasında destek olan Döktaş Dökümcülük A.Ş. Orhangazi tesislerine teşekkür ederiz. We would like to thank Döktaş Dökümcülük Orhangazi facilities for their support in conducting the experiments for this study.

Bu çalışma Doç. Dr. Müge Ensari Özay danışmanlığında Mart 2025 tarihinde tamamladığımız "Dökümhane Maça Üretim Prosesinde Makine Parametreleri Optimizasyonu ile DMEA Gazı Azaltılması ve Akıllı Maçahane Tasarımı" başlıklı doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır (Doktora Tezi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2025). / This article is extracted from my doctorate dissertation entitled "DMEA Gas Reduction in Foundry Core Production Process with Machine Parameters Optimization and Smart Core Shop Design", supervised by Associate professor Dr.Müge Ensari Özay (Ph.D. Dissertation, Üsküdar University, İstanbul, Türkiye, 2025).

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Antony, J., 2003. Design of Experiments for Engineers and Scientists, Second Edition, ISBN 978-0-7506-4709-0
- Bargaouia, H., Azzouza, F., Thibault, D., Cailletaud, G., 2017. Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting, *Journal of Materials Processing Technology* 246, 30–41.
- Barot, R.,S., Patel, H., Devmurari, R., Shah, K., Sharma, B., Shah, J., 2020. IoT Feasibility Aspects Of Mold Temperature Monitoring and Casting Simulation For Smart Foundry, *Materials Today: Proceedings* 28, 1732–1738.
- Beeley, P.R., 1972. Foundry Technology, ISBN-100408703482.
- Behara, N.,C., Jeet, S., Nayak, C.,K., Bagal, D.,K., Panda, S.,N., Barua, A., 2022. Parametric Appraisal of Strength & Hardness of Resin Compacted Sand Castings Using Hybrid Taguchi-WASPAS-Material Generation Algorithm, *Materials Today: Proceedings* 50, 1226–1233
- Chaudhari, S.,S., Aloni, S.,N., 2022. Optimization Of Green Sand Process for Quality Improvement in Castings by Using Combination of Taguchi Techniques-GRA-PCA, *Materials Today: Proceedings* 62, 1115–1121.
- Chate, G.,R., Bhat, R.,P., Chate, U.,N., 2014. Process Parameter Settings For Core Shooter Machine by Taguchi Approach, *Procedia Materials Science* 5, 1976 – 1985.
- Danko, R., Kmita, A., Holtzer, M., Danko, J., Lehmus, D., Tapola, S., 2023. Development of Inorganic Binder Systems to Minimise Emissions in Ferrous Foundries, *Sustainable Materials and Technologies* 37 (2023) e00666.
- Gyarmati, G., Budavari, I., Fegyverneki, G., Varga, L., 2021. The Effect of Sand Quality on The Bending Strength and Thermal Distortion of Chemically Bonded Sand Cores, *Heliyon* 7, e07624.
- Hunter, J, S, Hunter, W,G, Box, G,E,P, 2005. *Statistics for Experiments*, Wiley Interscience
- Kanicki, D.,1994. Metal Casting's Versatility Offer Users a Competitive Edge. *Designers & Buyers, Guide to Selecting Casting Processes I. Casting World/Modern Casting Publication.* 5-10.
- Krishnaraj, R., 2015. Contemporary And Futuristic Views Of Pollution Control Devices In Foundries, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120, 130–135
- Kumar,S., Prakash, J., (2015), Optimization of Casting Process Parameters Using Taguchi Analysis, *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, ISSN 0973-4562 Vol. 5 No.1. 131-134.
- Mirer, F., E., 1989. *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, 4th Edition-Part XIII, Metal Processing and Metal Working Industry, <http://www.ilocis.org/en/default.html> Erişim Tarihi:01 Şubat 2019.
- Pandit, H., Deshpande, A., 2021. Theory of Combined Imbalance for Quality Improvement in Green Sand Molded Castings, *Materials Today: Proceedings* 47, 2315–2321.
- Primafound, 2023. *Cores Manufacturing Secrets and Strategies from Design to Production*.
- Rekab, K., Shaikh, M., 2005. *Statistical Design of Experiments with Engineering Applications*, International Standard Book Number-13: 978-1-4200-5631-0 (eBook - PDF)
- Rodríguez, E., Pérez A., Mercado-Solis R. D., Abraham V., Jimenez O., Flores M., Gonzalez M.A., Ibarra J.(2019). China Foundry Research & Development, Erosion problem in tool steel using cold box core-making process, Vol. 16, No. 3, 204-210.
- Saikaew, C., Wiengwiset, S., 2012. Optimization Of Molding Sand Composition for Quality Improvement of Iron Castings, *Applied Clay Science* 67–68, 26–31.
- Schneider, M., Stevenson, R., 2012. *Simulation of the Entire Core Production Process*, American Foundry Society.
- Schorn, T,J., 2020. Enkei America Inc. (Columbus, Indiana), *Modern Casting*, January 2020
- SGK, Sosyal Güvenlik Kurumu İstatistikleri, sgkgov.tr, Erişim Tarihi:01.03.2022

- Singh, H., Kumar, A., 2016. Minimization of the Casting Defects Using Taguchi's Method, International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6726 www.ijesi.org Volume 5 Issue 12, December 2016, PP. 06-10.
- Stauder, B.,J., Kerber, H., Schumacher, P., 2016. Foundry Sand Core Property Assessment by 3-point Bending Test Evaluation, Journal of Materials Processing Technology 237,188-196.
- Treyger, A., 2015. Overview of Foundry Processes and Technologies: Manufacturing Metal Castings, CED Engineering, Continuing Education and Development, Inc. 22 Stonewall Court Woodcliff Lake, NJ 07677.
- Türk, S.C., 2022. Döküm Tesislerinde Boya Kullanımı Sebebiyle Ortaya Çıkan Uçucu Organik Bileşiklerin Ölçümü ve İş Güvenliği Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul.
- Tong, L., Shen X., Zhou J., Yin Y., Ji X., 2019. Numerical Investigation of Turbulent Flow Behavior of Sand Particles in Core Shooting Process, 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019), Procedia Manufacturing 00 (2017) 000-000.
- Udayan N., Srinivasan M.V., Vignesh V R, Govindaraju M., 2021. Elimination of Casting Defects Induced by Cold Box Cores, Materials Today: Proceedings 46 ,5022-5026.
- Upadhye, R.,A., Keswani I.,P., 2012. Optimization of Sand Casting Process Parameter Using Taguchi Method in Foundry, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 1 Issue 7, September – 2012 ISSN: 2278-0181.
- Zhang, M., Zheng, Y.,D., Du, X.,Y., Lu, Y., Li, W.,J., Qi, C., Wu, Z.,L., 2010. Silicosis in Automobile Foundry Workers: A 29-Year Cohort Study, Biomedical And Environmental Sciences 23, 121-129.



TRANSFER LEARNING-BASED CLASSIFICATION OF KNEE OSTEOARTHRITIS SEVERITY FROM X-RAY IMAGES

Miyade MAHFUS¹, Mustafa TOSUN¹, Hanife GÖKER^{2*}

¹ Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Simav Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, Kütahya, Türkiye

² Gazi University, Health Services Vocational College, Ankara, Türkiye

Keywords

Deep Learning,
Image Processing,
Transfer Learning,
ResNet101,
Knee Osteoarthritis.

Abstract

Knee osteoarthritis (KOA) a degenerative, long-term joint condition that, more often than not, affects the elderly and is characterized by articular cartilage degradation. Appropriate treatment and early analysis are essential for sickness control. However, traditional diagnostic methods for classifying KOA from X-ray images require laborious expertise and, unfortunately, have a large margin of error. This study presents an image processing-based solution for multi-classification KOA severity from X-ray images using the Bilateral filter, contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE), and transfer learning models. The CLAHE method improved image quality, while the Bilateral filter enhanced details and minimized blurriness in X-ray images. KOA image dataset consists of 9786 knee images and five class labels. The performances of transfer learning models including AlexNet, ResNet101, DenseNet201 and VGG19 were compared. The ResNet101 model emerged as the most effective, achieving a kappa statistic of 0.970, weighted F1-score of 0.978, and an overall accuracy of 97.85%. This model's high accuracy and precision make it a dependable and objective diagnostic solution.

DİZ OSTEOARTRİTİ ŞİDDETİNİN X-RAY GÖRÜNTÜLERİNDEN TRANSFER ÖĞRENME TABANLI SINIFLANDIRILMASI

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme,
Görüntü İşleme,
Transfer Öğrenme,
ResNet101,
Diz Osteoartriti.

Öz

Diz osteoartriti (KOA), çoğunlukla yaşlıları etkileyen ve eklem kıkırdağı bozulmasıyla karakterize dejeneratif, uzun vadeli bir eklem durumudur. Hastalık kontrolü için uygun tedavi ve erken analiz kritiktir. Bununla birlikte, X-ray görüntülerinden KOA sınıflandırması için geleneksel tanı yöntemleri uzmanlık gerektirmektedir, yorucudur ve maalesef büyük bir hata payına sahiptir. Bu çalışma, Bilateral filtresi, kontrast sınırlı adaptif histogram eşitleme (CLAHE) ve transfer öğrenme modelleri kullanarak X-ray görüntülerinden KOA şiddetini sınıflandırmak için görüntü işleme tabanlı bir çözüm sunmaktadır. CLAHE yöntemi görüntü kalitesini iyileştirirken, Bilateral filtresi X-ray görüntülerindeki ayrıntıları iyileştirerek bulanıklığı en aza indirmiştir. KOA görüntü veri seti 9786 diz görüntüsü ve beş sınıf etiketinden oluşmaktadır. AlexNet, ResNet101, DenseNet201 ve VGG19 dahil olmak üzere transfer öğrenme modellerinin performansları karşılaştırıldı. ResNet101 modeli 0,970 kappa istatistiği, 0,978 ağırlıklı F1-skoru ve %97,85 genel doğruluk elde ederek en etkili model olarak ortaya çıkmıştır. Bu modelin yüksek doğruluğu ve kesinliği onu güvenilir ve objektif bir tanı çözümü olduğunu göstermektedir.

Cite

Mahfus, M., Tosun, M., Göker, H., (2025). Transfer Learning-Based Classification of Knee Osteoarthritis Severity from X-Ray Images, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(1), 325-339.

Author ID (ORCID Number)

M. Mahfus, 0009-0002-6358-3680
M. Tosun, 0000-0001-7167-4561
H. Göker, 0000-0003-0396-7885

Article Process

Submission Date	27.12.2024
Revision Date	11.03.2025
Accepted Date	16.03.2025
Published Date	20.03.2025

* Corresponding author: gokerhanife@gazi.edu.tr, +90-312-484 56 35

TRANSFER LEARNING-BASED CLASSIFICATION OF KNEE OSTEOARTHRITIS SEVERITY FROM X-RAY IMAGES

Miyade MAHFUS¹, Mustafa TOSUN¹, Hanife GÖKER^{2†}

¹ Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Simav Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, Kütahya, Türkiye

² Gazi University, Health Services Vocational College, Ankara, Türkiye

Highlights

- An automatic early diagnosis system for multi-classification of knee osteoarthritis severity from X-ray images was proposed
- Comparative analysis of transfer learning models for the diagnosis of KOA severity was performed
- Advanced image processing methods, including Bilateral filter and CLAHE, were used
- The proposed transfer learning model is a reliable and objective diagnostic solution and shows potential for clinical use.

Graphical Abstract (If applicable)

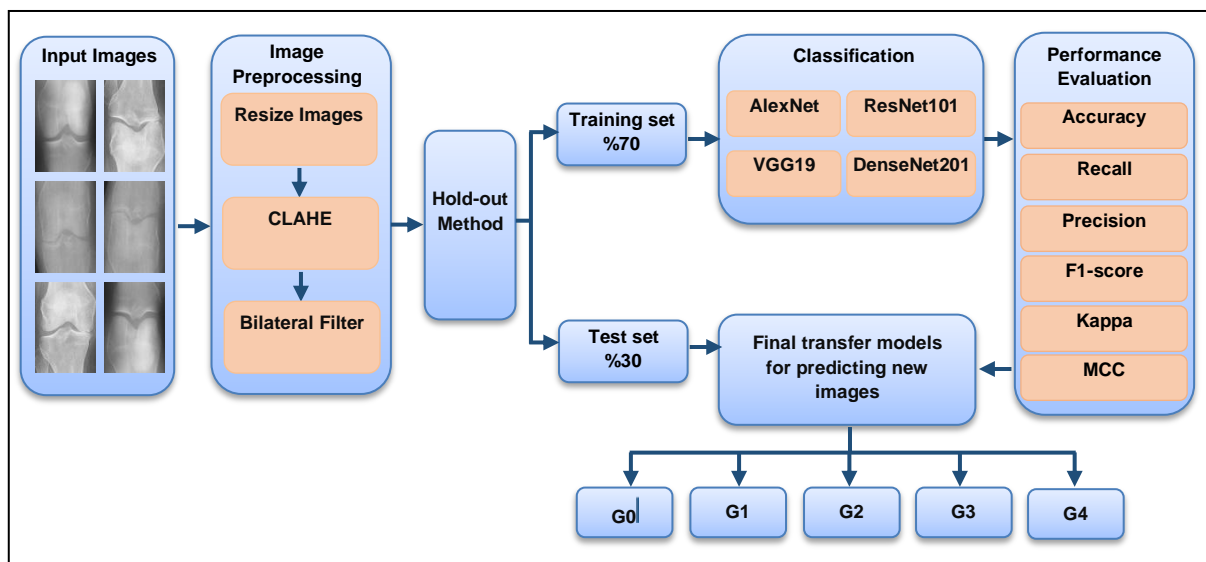


Figure. Flow-chart of the Proposed Method

Purpose and Scope

KOA is a long-term joint disorder caused by the deterioration of the articular cartilage. Although early diagnosis is essential for controlling the disease, which especially affects the elderly, traditional diagnostic methods for KOA are laborious, require expertise, and, unfortunately, have a large margin of error. In this study, we proposed an image processing-based solution for the multi-classification of KOA severity from X-ray images using the Bilateral filter, CLAHE, and transfer learning models.

Methodology

The transfer learning-based method consists of a) image preprocessing stages, b) dividing into training and test sets, and c) comparing transfer learning algorithms according to performance evaluation criteria for the multi-classification of KOA severity. Firstly, the X-ray images were resized based on the default input sizes for transfer learning models in the image preprocessing stage. The KOA severity grading dataset contains 9786 knee images. The images were resized to 224x224 for ResNet101, VGG19, DenseNet201, and 227x227 for AlexNet. The CLAHE method was employed to enhance contrast and the Bilateral filter reduced blurriness while sharpening

[†] Corresponding author: gokerhanife@gazi.edu.tr, +90-312-484 56 35

image details. Then, the KOA dataset was split into training and test sets using the hold-out method. The performances of DenseNet201, AlexNet, ResNet101, and VGG19 models were compared. Finally, the performance of these transfer learning models was assessed using model performance metrics.

Experimental Results

Transfer learning models; AlexNet, ResNet101, DenseNet201, and VGG19 were compared according to model performance metrics. Experimental results show that ResNet101 model combined with CLAHE and Bilateral filter can be used to accurately classify KOA severity from X-ray images. The transfer learning based model achieved 2872 correctly labeled X-ray images. This outperformed the other models, with DenseNet201, AlexNet, and VGG19 following. The correctly labeled X-ray images were 2872 for Resnet101, the correctly labeled images were 2754 for DenseNet201, the correctly labeled images were 2649 for AlexNet, and the correctly labeled images were 2636 for VGG19. The transfer learning model combined with the CLAHE, Bilateral filter, and ResNet101 attained the maximum performance with an overall accuracy of 97.85%. The transfer learning model was followed by DenseNet201 (93.83%), AlexNet (90.26%), and VGG19 (89.81%) models, respectively. ResNet101 achieved 0.970 kappa statistic, 0.978 weighted-F1 score, and 97.85% overall accuracy. In addition, the performance results of CLAHE, Bilateral filter, and ResNet101 were 0.990 recall, 0.988 precision, 0.989 F1-score, 0.993 specificity, and 982 MCC for the G0 label; 0.981 recall, 0.984 precision, 0.983 F1-score, 0.995 specificity, and 979 MCC for the G1 label; 0.975 recall, 0.975 precision, 0.975 F1-score, 0.991 specificity, and 966 MCC for the G2 label; 0.973 recall, 0.966 precision, 0.970 F1-score, 0.996 specificity, and 965 MCC for the G3 label; 0.857 recall, 0.886 precision, 0.871 F1-score, 0.995 specificity, and 867 MCC for the G4 label. This model, which we propose in our study, provides an unbiased and reliable diagnostic tool.

Research limitations

This study has several limitations. Firstly, the KOA severity grading dataset consists of 9786 knee images. Although the dataset is comprehensive, images are obtained using the X-ray imaging technique. Using different image techniques, such as magnetic resonance imaging, ultrasound, or computed tomography, will increase the robustness and accuracy of the KOA severity classification. Secondly, even though using transfer learning models, including AlexNet, ResNet101, DenseNet201, and VGG19, creates a robust structure, comparisons can also be made using different transfer learning algorithms. For future studies, the power and robustness of the proposed model can be investigated using different medical images.

Practical implications

In this study, image processing-based model was presented to support the clinicians using CLAHE, bilateral filter, and transfer learning models for the multi-classification of KOA severity. The study has practical contributions to developing decision support systems that analyze medical images. Using transfer learning algorithms facilitates the workload of experts and can provide objectivity and rapid decisions based on experimental results. Unlike previous studies, this study conducted a comprehensive and comparative analysis procedure on image processing and transfer learning models. The practical contributions of the image-processing model are delineated below: (i) The ResNet101 model combined with CLAHE and Bilateral filter for multi-classification KOA severity showed the best performance. The experiment results demonstrated that the transfer learning model achieved a promising performance compared to other methods in the literature with a higher accuracy of 97.85%. (ii) The transfer learning model for multi-classification of KOA severity can speed up the diagnostic procedure and provide time efficiency for clinicians. (iii) Early detection of KOA severity can facilitate well-timed interventions, decelerate disease progression, and enhance patient outcomes in clinical practice.

Originality

The Bilateral filter, CLAHE and ResNet101 transfer learning model had a very high accuracy of 97.85%. The advanced image preprocessing techniques such as CLAHE and Bilateral filter were implemented. In addition to both high accuracy and advanced preprocessing, the model is clinically impactful. The transfer learning-based model was proposed to improve patient outcomes significantly and enhance healthcare efficacy. According to the experimental results, it is an accurate method of early detection of KOA. From a public health viewpoint, it could reduce the disease burden by better detecting KOA severity earlier.

1. Introduction

KOA, a chronic and progressive joint disease, is characterized by the deterioration of joint cartilage tissue. It affects millions of people worldwide, particularly the elderly population (Geng *et al.*, 2023). With the growing older population, the superiority of KOA is anticipated to increase significantly, with more than 20% of people predicted to be at risk by 2030 (Ortman *et al.*, 2014). Moreover, it is estimated that 130 million people worldwide will suffer from KOA by 2050 (Wang *et al.*, 2021). In developed countries, KOA is the most common cause of disability related to joint disorders, especially in the knees and hips (Grazio & Balen, 2009). The disease is marked by the deterioration of articular cartilage, bone remodeling, and joint inflammation, involving complex molecular, anatomical, and physiological changes that extend beyond simple “wear and tear”. Patients with KOA face a higher risk of mortality compared to the general population, with significant contributing factors such as diabetes, cardiovascular disease, and walking disabilities (Haidari, 2011). Given its widespread prevalence and debilitating impact, KOA remains a significant public health challenge globally. The disease reduces the quality of life for millions and places a considerable economic burden on healthcare systems due to increased medical expenses and loss of productivity (Islam & Rony, 2024). Early intervention can slow the progression of KOA, reduce pain, and enhance joint functionality, emphasizing the importance of timely and accurate diagnosis.

KOA is diagnosed with the progression of symptoms, which leads to a delay in disease management. Early detection of the disease becomes difficult, leading to late treatment initiation and worsening symptoms. Patients frequently put off getting care until they experience distressing symptoms. Therefore, healthcare providers might not see KOA patients until they exhibit severe stiffness, pain, and functional limitations (Langworthy *et al.*, 2024). The increasing need for automated grading of KOA severity stems from the imperative for swifter and early detection, driven by a lack of radiologists and the laborious process of analyzing knee X-ray images, especially in remote locations (Kishore *et al.*, 2024). KOA, which cannot be diagnosed early, reduces the quality of life of individuals and can cause mobility restrictions and dependency in daily activities in later stages. Traditional diagnostic methods are based on clinical assessment and radiological imaging techniques, and modern approaches include biomarkers and advanced imaging technologies. However, deep learning is widely used in modern diagnostic methods for KOA severity detection (Zeng *et al.*, 2023). These models also produce more accurate, faster, and more objective results for analyzing complex data. In particular, transfer learning models, which are a version of deep learning, offer an innovative and attractive solution for KOA severity classification by enabling the application of knowledge from a pre-trained network to new data. Transfer learning models can directly work through challenging and large-scale image data, keeping the understanding learned from solving a task and later utilizing it once encountering another task (Göker, 2024). Transfer learning can be repurposed, where features and weights are developed from pre-trained models. So, using prior knowledge enables the development of models that achieve higher performance and less training with faster learning.

Transfer learning-based medical image processing has achieved promising results in improving diagnostic accuracy for KOA severity in recent years. Kokkotis *et al.* (2020) presented a machine learning-based model for the KOA classification using support vector machine (SVM) and k-nearest neighbors (K-NN) algorithms. The SVM algorithm achieved 74.07% accuracy (Kokkotis *et al.*, 2020). Also, Abedin *et al.* (2019) used the convolutional neural network (CNN) algorithm for KOA severity classification using X-ray images. The root mean squared error for the CNN was 0.77 (Abedin *et al.*, 2019). Guan *et al.* (2022) proposed a combination of deep learning and traditional machine learning algorithms. The traditional machine learning models, random forests (RF), logistic regression (LR), and artificial neural networks (ANN), were employed. In contrast, the CNN deep learning algorithm was used to classify KOA. The combined model achieved 80.9% specificity, 72.3% sensitivity, and 0.807 AUC (Guan *et al.*, 2022). Similarly, Brahim *et al.* (2019) proposed a machine learning-based model for the KOA classification using Fourier filter, independent component analysis (ICA), and machine learning algorithms. The Fourier filter was used for image preprocessing, and ICA was employed to decrease dimensionality. Then, the performances of Naive Bayes and RF algorithms were compared. The RF algorithm, which achieved the highest success, had 80.65% specificity, 87.15% sensitivity, and 82.98% accuracy (Brahim *et al.*, 2019). Jain *et al.* (2024) presented an attentive multi-scale deep CNN for KOA severity classification. They used the high-resolution network (HRNet), and the HRNet algorithm relies on deep learning models to capture multi-scale capabilities of images. The method achieved the best accuracy of 71.74% (Jain *et al.*, 2024). Solak (2024) compared VGG16, Xception, EfficientNetB0, DenseNet20, and ResNet-50 transfer learning models for KOA severity classification. The DenseNet201 model, which has the highest performance, obtained 87.7% accuracy, 87.2% F1-score, and 0.75

kappa statistics (Solak, 2024). Although transfer learning for image processing is faster and more objective than traditional methods, much more work needs to be done before transfer learning-based models can be used in the clinic. Moreover, improvement and validation of transfer learning-based models through real-world applications are important for the robustness, reliability, and effectiveness of the models.

In this study, we proposed an image processing-based solution for the multi-classification of KOA severity from X-ray images using the Bilateral filter, CLAHE, and transfer learning models. The main contributions of this study to the literature can be summarized as follows:

- i. A transfer learning-based model was proposed to classify KOA severity using image processing methods.
- ii. Image contrast was increased with CLAHE, and the use of Bilateral filter improved the detail clarity and reduced blur in X-ray images.
- iii. Transfer learning models; AlexNet, ResNet101, DenseNet201, and VGG19 were compared. ResNet101 achieved the best performance with 0.970 kappa statistic, 0.978 weighted F1 score, and 97.85% overall accuracy.
- iv. Experimental results show that the ResNet101 model combined with CLAHE and Bilateral filter can accurately classify KOA severity from X-ray images. This model provides an unbiased and reliable diagnostic tool.

2. Materials and Methods

2.1. Proposed Method

The proposed transfer learning-based method consists of a) image preprocessing stages, b) dividing into training and test sets, and c) comparing transfer learning algorithms according to performance evaluation criteria for the multi-classification of KOA severity. Firstly, the X-ray images were resized based on the default input sizes for transfer learning models in the image preprocessing stage. The KOA severity grading dataset contains 9786 knee images. The images were resized to 224x224 for ResNet101, VGG19, DenseNet201, and 227x227 for AlexNet. The CLAHE method was employed to enhance contrast, and the Bilateral filter reduced blurriness while sharpening image details. Then, the KOA dataset was split into training and test sets using the hold-out method. The performances of DenseNet201, AlexNet, ResNet101, and VGG19 models were compared. Finally, the performance of these transfer learning models was assessed using model performance metrics. Figure 1 shows the flowchart of the proposed method.

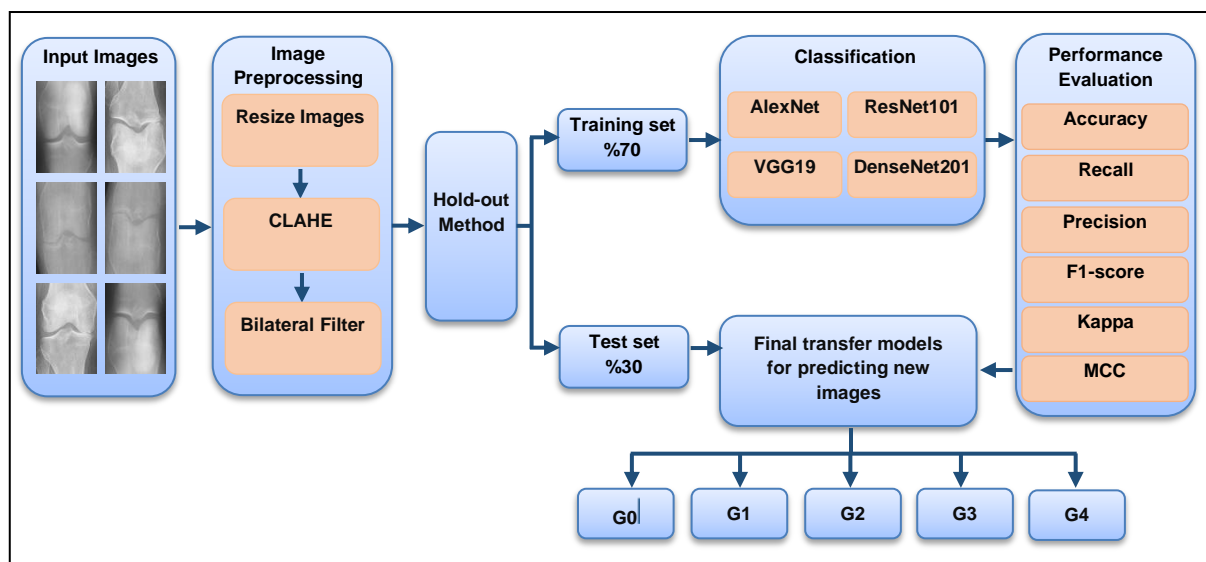


Figure 1. The flowchart of the proposed method

2.2. Dataset

The knee images were taken from the KOA severity dataset (Tiwari et al., 2022). The KOA dataset of 9786 X-ray images, including the left and right knee, was graded according to Kellgren-Lawrence (KL). The original dataset was categorized into five grades: normal, doubtful, minimal, moderate, and severe. There were 3857 images in normal grades (G0), 1770 images in doubtful (G1), 2578 images in minimal (G2), 1286 images in moderate (G3),

and 295 images severe (G4). The size of each image is 224×224 . Table 1 shows the characteristics of the KOA severity dataset.

Table 1. Characteristics of the KOA Severity Dataset

GRADE	NUMBER OF X-RAYS	KL CLASSES DESCRIPTION
G0	3857	No signs of disease are seen on the knee joint X-ray. The joint appears healthy
G1	1770	There may be bone spurs called osteophytes and slight narrowing of the joint space. However, these findings do not definitively indicate osteoarthritis
G2	2578	Osteophytes are definitely seen and there may be narrowing of the joint space.
G3	1286	Steophytes, significant narrowing of the joint space and slight hardening of the bones (sclerosis) are seen
G4	295	Osteophytes, severe narrowing of the joint and widespread hardening of the bones are seen. This indicates advanced osteoarthritis.
Total	9786	

The KOA dataset was split into training set (6851 knee images) and test set (2935 knee images) in the ratio of 70:30. Table 2 shows the distribution of the dataset.

Table 2. Distribution of the Dataset

SET \ KL GRADES	G0	G1	G2	G3	G4	Total
Training	2700	1239	1805	900	207	6851
Test	1157	531	773	386	88	2935
Total	3857	1770	2578	1286	295	9786

Figure 2 shows samples of knee images representing each label (normal, doubtful, minimal, moderate, and severe) in the KOA dataset.



Figure 2. Samples of X-ray knee images per label, (i) normal, (ii) doubtful, (iii) minimal, (iv) moderate, (v) severe

2.3. Image Preprocessing

X-ray images often have various quality problems such as noise, low contrast, and motion distortions; this situation negatively affects the performance of transfer learning models. Image preprocessing techniques are essential to address these challenges and enhance the visibility of crucial anatomical structures like the knee joint. During the image preprocessing stage, the images were resized based on the default input sizes used by transfer learning models. The knee images were resized to 224×224 for RestNet101, VGG19, DenseNet201, and 227×227 for AlexNet. Following resizing, CLAHE equalization was applied to enhance the images, thereby improving the visibility of key features (Ahmed et al., 2022). This method divides the image into smaller blocks, performs equalization separately on each block, prevents excessive contrast enhancement, and better preserves image details.

Then, the Bilateral filter was performed to decrease noise in the images. The bilateral filter can smooth images, especially while preserving the edges. This dual capability is achieved through the combination of spatial and range kernels, which weigh neighboring pixels based on their geometric proximity and intensity similarity (Li & Duan, 2022). The filter works by substituting a weighted average of a pixel's neighbors for the pixel's value; the weights are established by the pixels' spatial separation and intensity difference (Yang et al., 2024). The bilateral filter is formulated as below (Singh et al., 2023):

$$\text{Bilateral filter } (x, y) = \frac{\sum_{x'} \sum_{y'} I(x', y') g_{\sigma_s}(x - x', y - y') g_{\sigma_r}(I(x, y) - I(x' - y'))}{\sum_{x'} \sum_{y'} g_{\sigma_s}(x - x', y - y') g_{\sigma_r}(I(x, y) - I(x' - y'))} \tag{1}$$

where the pixels neighboring the position (x, y) in an image are referred to as (x', y').

$$g_{\sigma_s}(x, y) = \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma_s^2}\right) \tag{2}$$

$$g_{\sigma_r}(\hat{a}) = \exp\left(\frac{\hat{a}^2}{2\sigma_r^2}\right) \tag{3}$$

In Equations 2 and 3, σ_r denotes the minimum amplitude, while σ_s represents the size of the spatial kernel.

2.4. Transfer Learning Models

Transfer learning is a pre-training method that uses information from trained data to create new models. Transfer learning is based on the premise that knowledge in the form of a model from a source task can be transferred to support learning in related target tasks, which is particularly beneficial when labeled information is scarce or costly to acquire (Mahmoud et al., 2024). Transfer learning algorithms use supervised pre-trained models with large datasets to allow activation mapping to other problems. Transfer learning algorithms such as AlexNet, ResNet, VGG19, and DenseNet are commonly used in medical image analysis applications (Kim et al., 2022). The optimum parameters of the transfer learning models are summarized in Table 3.

Table 3. The Optimum Parameters of the Transfer Learning Models

HYPER-PARAMETERS	ALEXNET	RESNET101	VGG19	DENSENET201
Input size	227x227	224x224	224x224	224x224
MaxEpochs	30	30	30	30
MiniBatchSize	16	16	16	16
Optimizer	sgdm	sgdm	sgdm	sgdm
ValidationFrequency	3	3	3	3
InitialLearnRate	1e-4	1e-4	1e-4	1e-4
Momentum	0.9	0.9	0.9	0.9
WeightLearnRateFactor	20	20	20	20
BiasLearnRateFactor	20	20	20	20
L2Regularization	0.005	0.005	0.005	0.005

The optimum hyper-parameters for transfer learning models were selected by comparing the results of several experiments that were carried out. For the “MaxEpochs” parameter, the values “30” and “60” were compared, and the value “30” was chosen, giving the best result. The “sgdm”, “adam”, “rmsprop” values of the “optimizer” parameter were compared, and “sgdm”, was selected. The “16” and “32” values were compared for the “MiniBatchSize” parameter, and the “16” value was selected.

2.4.1. AlexNet

The AlexNet consists of five “convolutional layers” and three “fully connected layers”. It employs Rectified Linear Unit (ReLU) activation and dropout to avoid overfitting and enhance performance (Tang et al., 2023). Compared to the traditional CNN architecture, AlexNet was designed with a deeper architecture, having more filter layers including stacked convolutional layers. The AlexNet is given in Figure 3 (Karim et al., 2022).

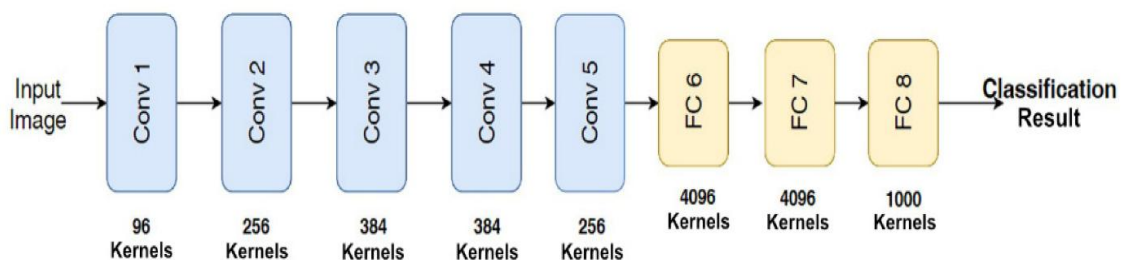


Figure 3. The AlexNet neural network

AlexNet employs ReLU as the activation function for its non-linear elements, in contrast to earlier neural networks that primarily utilized tanh or sigmoid activations. Figure 4 shows the definitions of activation functions (Karlik & Olgac, 2011).

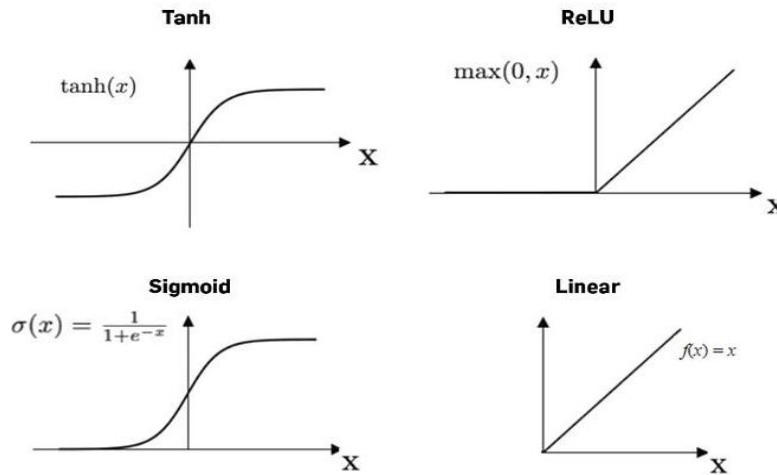


Figure 4. Functions description

The first, second, and fifth convolutional layers are also succeeded by max-pooling layers. One of the notable advantages of AlexNet is its use of local response normalization, which helps prevent the saturation of activation functions.

2.4.2. ResNet101

The ResNet101 model, a variant of the Residual Network architecture, includes 101 layers and uses skip connections during backpropagation, which allows gradients to flow through the network more effectively. ResNet101 has gained prominence because of its ability to facilitate the training of deep neural networks while reducing the vanishing gradient problem. This innovation has led to significant improvements in various image classification tasks, making ResNet101 a popular choice in practical applications. The ResNet101 performance of imaging analysis is quite strong. The input image sizes for the ResNet101 model are 224x224. The ResNet101 is given in Figure 5 (Tong et al., 2020):

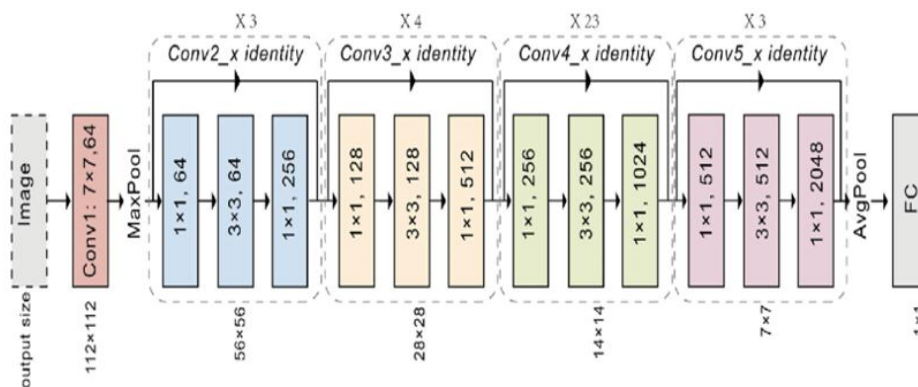


Figure 5. The ResNet101 neural network

2.4.3. VGG19

VGG19 is a deep CNNs architecture consisting of 19 layers, including 16 convolutional layers, 3 fully connected layers, and a softmax classification layer. VGG19 maintains a simple and consistent structure using only 3x3 filters in all convolutional layers. These small filters allow building a deeper network and learning more complex features. The ReLU activation function is used in every convolutional and fully connected layer and facilitates faster learning and reduces computational costs, thus enhancing model performance. Max-pooling layers applied after each block reduce spatial dimensions and computational load while preserving prominent features. With pre-trained weights on large datasets, only the upper layers need to be retrained for new tasks, which provides a significant advantage in limited data conditions. The VGG19 is given in Figure 6 (Khattar & Quadri, 2022):

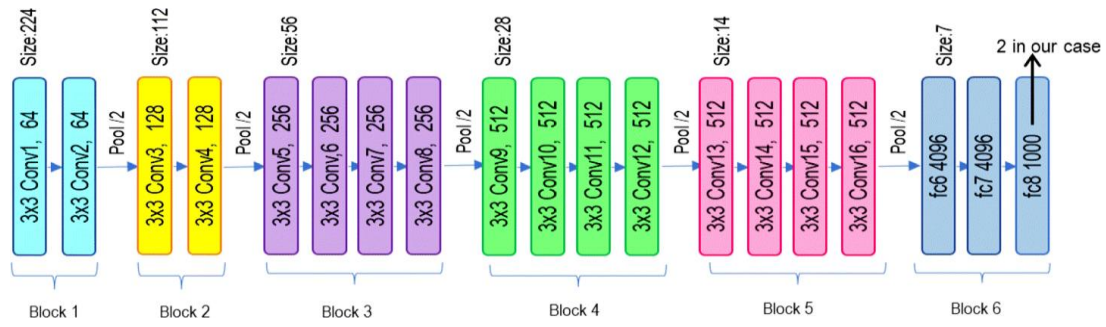


Figure 6. The VGG19 neural network

2.4.4. DenseNet201

Dense Convolutional Network (DenseNet) is a transfer learning model based on the principle that each layer receives the feature maps from every layer before it. This form of connection increases the flow of information. Dense connections decrease the vanishing gradient problem, which is frequently seen in deep networks. This contributes to a more stable training process, especially in very deep networks (Jung et al., 2024). DenseNet201 consists of 201 layers in total, and dense connections between these layers enable the network to learn deeper and more complex features. This characteristic of DenseNet contributes to more efficient use of parameters, increases the model performance, and also reduces overfitting. The input image sizes for the DenseNet201 are 224×224. The DenseNet201 is given in Figure 7 (Kumar et al., 2021):

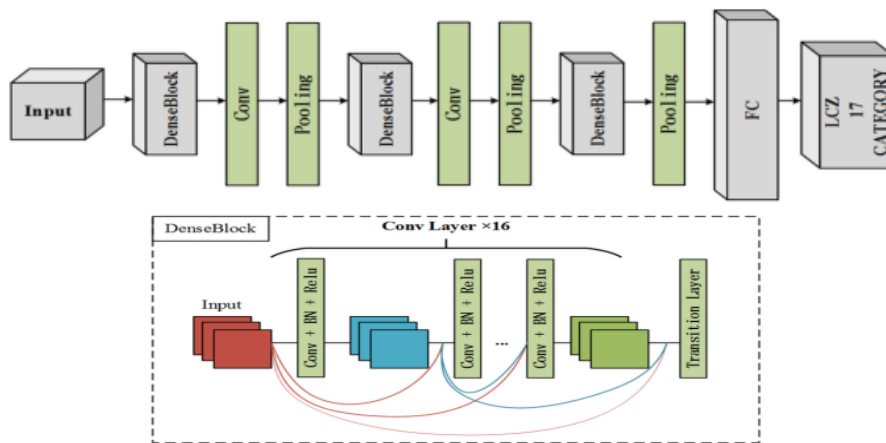


Figure 7. The DenseNet201 neural network

2.5. Performance Evaluation Metrics

The performance of transfer learning models was assessed utilizing performance evaluation metrics, including overall accuracy, precision, specificity, recall, Matthew’s correlation coefficient (MCC), F1-score, weighted F1-score, and the kappa statistic. True Positive (TP) gives the number of data correctly classified by the classifier model from the positive class; False Positive (FP) gives the number of data actually labeled as positive by the classifier model as a result of the classification of data belonging to the negative class. True Negative (TN) gives the number of data correctly classified by the classifier model from the negative class; False Negative (FN) gives the number of data actually labeled as negative by the classifier model as a result of the classification of data belonging to the positive class (Çelik et al., 2023). The equations used to derive these performance metrics are delineated in equations 4-11.

$$\text{Overall Accuracy} = \text{Number of accurately classified samples} / \text{Total number of samples} \tag{4}$$

$$\text{Precision} = TP / (FP + TP) \tag{5}$$

$$\text{Recall} = TP / (FN + TP) \tag{6}$$

$$\text{Specificity} = TN / (TN + FP) \tag{7}$$

$$F1 \text{ – score} = 2 * \text{Precision} * \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall}) \tag{8}$$

$$\text{Weighted-F1 scores} = \text{Weighted-averaged of F1-scores} \tag{9}$$

$$MCC = (TP * TN - FN * FP) / \sqrt{(FP + TP) * (TN + FN) * (FN + TP) * (TN + FP)} \tag{10}$$

The kappa statistic is performed to assess inter-rater reliability. It measures the degree of agreement between two or more raters by correcting for any agreement that might occur by chance. The kappa value ranges from -1 to 1, where 1 demonstrates perfect agreement, 0 demonstrates no agreement beyond chance, and negative values demonstrate agreement less than would be expected by chance. The formula for the kappa statistic is provided in Equation 11 (Cantor, 1996).

$$\text{Kappa} = (P_o - P_e) / (1 - P_e) \tag{11}$$

$$P_o = \sum_{i=1}^k CM_{ii} / N$$

$$P_e = \sum_{i=1}^k (\sum_{i=1}^k CM_{ij} \times \sum_{j=1}^k CM_{ji} / N^2)$$

Pe denotes the expected agreement and Po denotes the observed agreement. CM_{ii} are the diagonal values of the confusion matrix, representing correct classifications, k denotes the number of labels, and N denotes the total number of samples.

3. Experimental Results and Discussion

In this study, the transfer learning-based models were compared to classify the KOA severity. The KOA severity grading dataset contains 9786 knee images. The images were resized to 224x224 for RestNet101, VGG19, DenseNet201, and 227x227 for AlexNet. The CLAHE was performed for image quality, while the bilateral filter was performed to reduce the noise of images and enhance details. Then, the model performance was evaluated using the holdout method. The KOA severity grading dataset was split into 6851 images training set (%70) and 2935 images test set (%30). Finally, the performances of RestNet101, VGG19, DenseNet201, and AlexNet transfer learning models were compared based on model performance metrics. The confusion charts of transfer learning models are shown Figure 8.

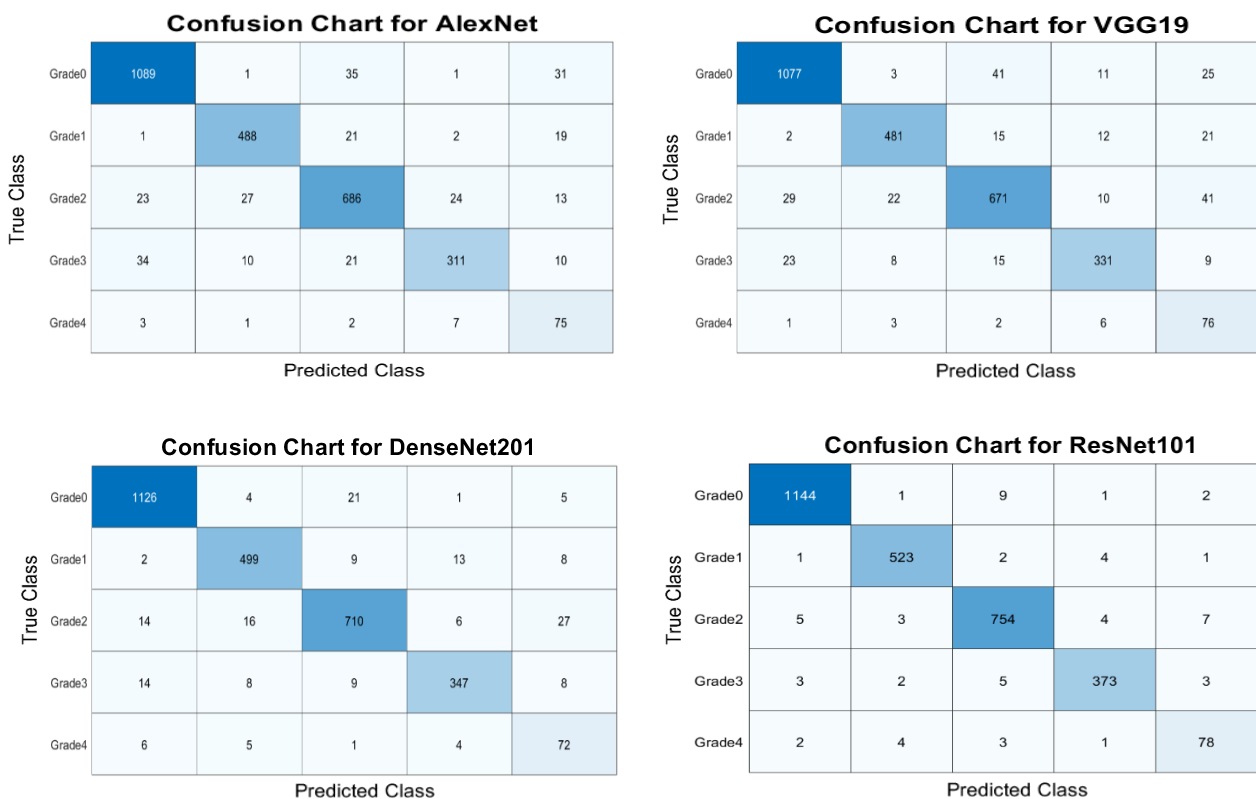


Figure 8. The confusion charts of transfer learning models

When examining Figure 8, the ResNet101 transfer learning model achieved 2872 correctly labeled X-ray images. This outperformed the other models, with DenseNet201, AlexNet, and VGG19 following. The correctly labeled X-ray images were 2872 for Resnet101, the correctly labeled images were 2754 for DenseNet201, the correctly labeled images were 2649 for AlexNet, and the correctly labeled images were 2636 for VGG19. Performance metrics, namely recall, precision, specificity, F1-score, kappa statistic, MCC, weighted-F1 score, and overall accuracy, were calculated to evaluate model performance comprehensively. The performance results of the transfer learning models are shown in Table 3.

Table 3. The Performance Results of the Transfer Learning Models

MODELS	LABELS	RECALL	PRECISION	SPECIFICITY	F1-SCORE	MCC
CLAHE + Bilateral Filter + AlexNet	G0	0.947	0.941	0.965	0.944	0.907
	G1	0.926	0.919	0.983	0.922	0.905
	G2	0.896	0.887	0.963	0.892	0.853
	G3	0.901	0.805	0.986	0.850	0.831
	G4	0.506	0.852	0.974	0.635	0.644
CLAHE + Bilateral Filter + VGG19	G0	0.951	0.930	0.969	0.941	0.903
	G1	0.930	0.905	0.985	0.917	0.900
	G2	0.901	0.868	0.966	0.884	0.844
	G3	0.894	0.857	0.984	0.875	0.857
	G4	0.441	0.863	0.966	0.584	0.602
CLAHE + Bilateral Filter + DenseNet201	G0	0.969	0.973	0.979	0.971	0.952
	G1	0.938	0.939	0.986	0.938	0.925
	G2	0.946	0.918	0.981	0.932	0.908
	G3	0.935	0.899	0.990	0.916	0.904
	G4	0.600	0.818	0.983	0.692	0.690
CLAHE + Bilateral Filter + ResNet101	G0	0.990	0.988	0.993	0.989	0.982
	G1	0.981	0.984	0.995	0.983	0.979
	G2	0.975	0.975	0.991	0.975	0.966
	G3	0.973	0.966	0.996	0.970	0.965
	G4	0.857	0.886	0.995	0.871	0.867

When the models' performances are examined in Table 3 and Table 4, the transfer learning model combined with the CLAHE, Bilateral filter, and ResNet101 attained the maximum performance with an overall accuracy of 97.85%. The transfer learning model was followed by DenseNet201 (93.83%), AlexNet (90.26%), and VGG19 (89.81%) models, respectively. In addition, the performance results of CLAHE, Bilateral filter, and ResNet101 were 0.990 recall, 0.988 precision, 0.989 F1-score, 0.993 specificity, and 982 MCC for the G0 label; 0.981 recall, 0.984 precision, 0.983 F1-score, 0.995 specificity, and 979 MCC for the G1 label; 0.975 recall, 0.975 precision, 0.975 F1-score, 0.991 specificity, and 966 MCC for the G2 label; 0.973 recall, 0.966 precision, 0.970 F1-score, 0.996 specificity, and 965 MCC for the G3 label; 0.857 recall, 0.886 precision, 0.871 F1-score, 0.995 specificity, and 867 MCC for the G4 label. The performance metrics are expected to be close to one because when the metrics are near one, it indicates that the model's performance is robust and high. When evaluating model performance, it is important to examine accuracy, kappa statistics, and weighted-F1 score. Table 5 presents the weighted-F1 score, kappa, and overall accuracy results.

Table 4. The Kappa, Weighted-F1 Score, and Overall Accuracy Results of the Transfer Learning Models

MODELS	KAPPA	WEIGHTED-F1 SCORE	OVERALL ACCURACY
CLAHE + Bilateral Filter + AlexNet	0.866	0.900	90.26%
CLAHE + Bilateral Filter + VGG19	0.861	0.893	89.81%
CLAHE + Bilateral Filter + DenseNet201	0.915	0.937	93.83%
CLAHE + Bilateral Filter + ResNet101	0.970	0.978	97.85%

The overall accuracy is the ratio of accurately classified samples to total samples. Therefore, overall accuracy alone is unreliable if there is no balance in the distribution across groups. The F1-score evaluates a trade-off between

recall and precision. The weighted F1 score is the weighted average of F1 scores. Therefore, the weighted score produces reliable results even if there is an imbalance in the distribution across groups. Kappa, which evaluates the agreement between two or more raters and adjusts for the agreement that occurs by chance, is an important measure that increases the reliability of the evaluation. The proposed transfer learning-based medical image processing has achieved promising results for KOA severity classification from X-ray images. Table 5 presents the comparative analysis of studies for KOA severity classification.

Table 5. The Comparative Analysis of Studies for KOA Severity Classification

REFERENCE	IMAGES SIZE	IMAGE PREPROCESSING	CLASS SIZE	CLASSIFIER	ACCURACY (%)
Wahyuningrum et al. (2020)	4737 images	Data augmentation, normalization, CLAHE, Region of Interest (ROI)	5 class	CNN	77.24%
Qali et al. (2021)	998 images	-	2 class	VGG16	69.23%
				SVM	77%
				CNN	90%
Ahmed & Mohammed (2022)	1650 images	Resize images, data augmentation	5 class	VGG16	87.27%
				VGG19	89.69%
				ResNet50	91.51%
Alshamrani et al. (2023)	3836 images	2D median filter, Gaussian smoothing techniques, sharpening filters, contrast stretching, and histogram equalization technique.	2 class	ResNet50	90.63%
				CNN	90.95%
Goswami (2023)	4130 images	Segmentation, contour detection, contrast enhancement	5 class	CNN	91.03%
Mohammed et al. (2023)	9786 images	Segmentation, equalization	5 class	MobileNetV2	67%
				ResNet101	69%
				VGG16	66%
				VGG19	64%
				InceptionResNetV2	63%
Rehman & Gruhn (2024)	1650 images	Data augmentation (Horizontal flip, Vertical flip, Rotation -45, Rotation 90, Crop 0.1, Crop 0.2, Gaussian noise, Gamma contrast, Sigmoid contrast, Linear contrast, Channel shuffling, and Inverted colors)	5 class	DenseNet121	64%
				VGG19	84.14%
				ResNet50	85.28%
				VGG16	88.45%
				CNN	90.38%
Nurmirinta et al. (2024)	1213 images	-	3 classes	VGG16+CNN	93.27%
				Balanced Random Forest	65.9%
The Proposed Method	9786 images	Resize images, CLAHE, Bilateral filter	5 class	VGG19	89.81%
				Alexnet	90.26%
				Resnet101	93.83%
				DenseNet201	97.85%

When Table 5 is examined, CNN (Wahyuningrum et al., 2020; Qali et al., 2021; Alshamrani et al., 2023; Goswami, 2023; Rehman & Gruhn, 2024), VGG16 (Qali et al., 2021; Ahmed & Mohammed, 2022), VGG19 (Ahmed & Mohammed, 2022; Mohammed et al., 2023; Rehman & Gruhn, 2024), MobileNetV2 (Mohammed et al., 2023), ResNet50 (Ahmed & Mohammed, 2022; Alshamrani et al., 2023), and DenseNet121 (Mohammed et al., 2023) algorithms are used. While classic machine learning techniques like Balanced Random Forest are also used, the majority of the studies focus on deep learning methodologies (Nurmirinta et al., 2024). Because deep learning methods can automatically extract complicated patterns from pictures, they have demonstrated significant performance increases, making them appropriate for medical imaging applications like as KOA severity assessment. Regarding class distribution, numerous studies have used the Kellgren and Lawrence rating scale for either binary classification (two classes) (Qali et al., 2021; Alshamrani et al., 2023) or multi-classification (three or five classes) (Wahyuningrum et al., 2020; Ahmed & Mohammed, 2022; Goswami, 2023; Rehman & Gruhn, 2024; Nurmirinta et al., 2024). Since differentiating between two classes (healthy and KOA), which is binary classification, is simpler than categorizing the severity of KOA into numerous stages, binary classification tasks typically yield higher accuracy rates. However, multi-classification offers more thorough diagnostic data, which is essential in medical settings. The experimental results support the efficacy of transfer learning models for classifying KOA severity. ResNet101, achieved the highest accuracy (97.85%) in this study. With its high accuracy, ResNet101 can assist radiologists by improving the speed and accuracy of KOA assessments. Furthermore, the model's exceptional performance was further boosted by the application of the bilateral filter and CLAHE, which

greatly improved the quality of the input images. These experimental results highlight the deep learning and image processing methods for medical imaging applications. The proposed transfer learning-based model may change the diagnosis and treatment of KOA severity, enhancing patient outcomes, clinical workflows, and the life quality of people.

4. Conclusion

In conclusion, we compared the performance of transfer learning models to classify KOA severity. Firstly, the X-ray images were resized to fit input-size images for transfer learning models. Then, we applied CLAHE for image enhancement, a technique that improves the contrast of the images, and the Bilateral filter was used to sharpen details and reduce blurriness in knee images. The Bilateral filter is a non-linear smoothing filter that reduces noise and preserves edges. Finally, transfer learning models were compared, including AlexNet, ResNet101, DenseNet201, and VGG19. The ResNet101 transfer learning model performed better than the others. The ResNet101 transfer learning achieved a kappa statistic of 0.970, a weighted F1-score of 0.978, and an overall accuracy of 97.85%. The experimental results show that the image processing-based transfer learning model is robust and reliable for diagnosing KOA severity from X-ray images. The study has practical contributions to developing decision support systems that analyze medical images. Using transfer learning algorithms facilitates experts' workload and can provide objectivity and rapid decisions based on experimental results. Unlike previous studies, this study conducted a comprehensive and comparative analysis procedure on image processing and transfer learning models. The practical contributions of the image-processing model are delineated below: (i) The ResNet101 model combined with CLAHE and Bilateral filter for multi-classification KOA severity achieved the best performance. The experiment results demonstrated that the transfer learning model achieved a promising performance compared to other methods in the literature with a higher accuracy of 97.85%. (ii) The transfer learning model for multi-classification of KOA severity can speed up the diagnostic procedure and provide time efficiency for clinicians. (iii) Early detection of KOA severity can facilitate well-timed interventions, decelerate disease progression, and enhance patient outcomes in clinical practice. This study has several limitations. Firstly, the KOA severity grading dataset consists of 9786 images. Although the dataset is comprehensive, images are obtained using the X-ray imaging technique. Using different image techniques, such as magnetic resonance imaging, ultrasound, or computed tomography, will increase the robustness and accuracy of the KOA severity classification. Secondly, even though using transfer learning models, including AlexNet, ResNet101, DenseNet201, and VGG19, creates a robust structure, comparisons can also be made using different transfer learning algorithms. For future studies, the power and robustness of the proposed model can be investigated using different medical images. Consequently, this model offers a dependable and objective diagnostic tool, potentially enabling more prompt interventions.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Abedin, J., Antony, J., McGuinness, K., Moran, K., O'Connor, N. E., Rebholz-Schuhmann, D., & Newell, J. 2019. Predicting knee osteoarthritis severity: comparative modeling based on patient's data and plain X-ray images. *Scientific Reports*, 9(1), 5761.
- Ahmed, H. A., & Mohammed, E. A. (2022). Detection and classification of the osteoarthritis in knee joint using transfer learning with convolutional neural networks (CNNs). *Iraqi Journal of Science*, 5058-5071.
- Alshamrani, H. A., Rashid, M., Alshamrani, S. S., & Alshehri, A. H. (2023). Osteo-net: An automated system for predicting knee osteoarthritis from x-ray images using transfer-learning-based neural networks approach. *Healthcare*, 11 (9), 1-30.
- Brahim, A., Jennane, R., Riad, R., Janvier, T., Khedher, L., Toumi, H., & Lespessailles, E. 2019. A decision support tool for early detection of knee OsteoArthritis using X-ray imaging and machine learning: Data from the OsteoArthritis Initiative. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 73, 11-18.
- Cantor, A. B. (1996). Sample-size calculations for Cohen's kappa. *Psychological Methods*, 1(2), 150-151. doi: 10.1037/1082-989X.1.2.150
- Çelik, Y., Dengiz, B., & Güney, S. (2023). Ahsap ham maddelerde yüzey hatasını belirlemek için görüntü işleme tabanlı kalite kontrol sistemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(4), 1365-1382.
- Geng, R., Li, J., Yu, C., Zhang, C., Chen, F., Chen, J., Haonan, N., Wang, J., Kang, K., Wei, Z., Xu, Y., & Jin, T. (2023). Knee osteoarthritis: Current status and research progress in treatment. *Experimental and therapeutic medicine*, 26(4), 1-11.
- Goswami, A. D. (2023). Automatic classification of the severity of knee osteoarthritis using enhanced image sharpening and CNN. *Applied Sciences*, 13(3), 1658.
- Göker, H. (2024). Detection of cervical cancer from uterine cervix images using transfer learning architectures. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 25(2), 222-239.
- Guan, B., Liu, F., Mizaian, A. H., Demehri, S., Samsonov, A., Guermazi, A., & Kijowski, R. (2022). Deep learning approach to predict pain progression in knee osteoarthritis. *Skeletal Radiology*, 1-11.
- Islam, M. S., & Rony, M. A. T. (2024). CDK: A novel high-performance transfer feature technique for early detection of osteoarthritis. *Journal of Pathology Informatics*, 15, 100382.
- Jain, R. K., Sharma, P. K., Gaj, S., Sur, A., & Ghosh, P. 2024. Knee osteoarthritis severity prediction using an attentive multi-scale deep convolutional neural network. *Multimedia Tools and Applications*, 83(3), 6925-6942.
- Jung, J., Han, J., Han, J. M., Ko, J., Yoon, J., Hwang, J. S., Park, J. I., Hwang, G., Jung, J. H. & Hwang, D. D. J. (2024). Prediction of neovascular age-related macular degeneration recurrence using optical coherence tomography images with a deep neural network. *Scientific Reports*, 14(1), 5854. 1-12.
- Karim, A. M., Kaya, H., Alcan, V., Sen, B., & Hadimlioglu, I. A. (2022). New optimized deep learning application for COVID-19 detection in chest X-ray images. *Symmetry*, 14 (5): 1003.
- Karlik, B., & Olgac, A. V. (2011). Performance analysis of various activation functions in generalized MLP architectures of neural networks. *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems*, 1(4), 111-122.
- Khattar, A., & Quadri, S. M. K. (2022). Generalization of convolutional network to domain adaptation network for classification of disaster images on twitter. *Multimedia Tools and Applications*, 81(21), 30437-30464.
- Kim, H. E., Cosa-Linan, A., Santhanam, N., Jannesari, M., Maros, M. E., & Ganslandt, T. (2022). Transfer learning for medical image classification: a literature review. *BMC medical imaging*, 22(1), 69.
- Kishore, V. V., Kalpana, V., & Dosapati, U. B. (2024, April). Interpretation of KOA by KL Grading System using Deep Learning. In *2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP)* (pp. 109-114). IEEE.
- Kokkotis, C., Moustakidis, S., Giakas, G., & Tsaopoulos, D. 2020. Identification of risk factors and machine learning-based prediction models for knee osteoarthritis patients. *Applied Sciences*, 10(19), 6797.
- Kumar, H., Virmani, A., Tripathi, S., Agrawal, R., & Kumar, S. (2021). Transfer learning and supervised machine learning approach for detection of skin cancer: performance analysis and comparison. *Drugs and Cell Therapies in Hematology*, 10(1). 1-16
- Langworthy, M., Dasa, V., & Spitzer, A. I. (2024). Knee osteoarthritis: disease burden, available treatments, and emerging options. *Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease*, 16, 1759720X241273009.
- Li, H., & Duan, X. L. (2022). SAR ship image speckle noise suppression algorithm based on adaptive bilateral filter. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1), 9392648.
- Mahmoud, M., Kasem, M. S., & Kang, H. S. (2024). A Comprehensive Survey of Masked Faces: Recognition, Detection, and Unmasking. *arXiv preprint arXiv:2405.05900*.
- Mohammed, A. S., Hasanaath, A. A., Latif, G., & Bashar, A. (2023). Knee osteoarthritis detection and severity classification using residual neural networks on preprocessed x-ray images. *Diagnostics*, 13(8), 1380.
- Nurmrinta, T. A., Turunen, M. J., Korhonen, R. K., Tohka, J., Liukkonen, M. K., & Mononen, M. E. (2024). Two-stage Classification of future knee osteoarthritis severity after 8 Years using MRI: data from the osteoarthritis initiative. *Annals of Biomedical Engineering*, 1-12.
- Qali, A., Seleik, M., & Abbas, S. S. (2021). Termal görüntü işleme ile diz osteoartritinin tespit edilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (30), 69-72.
- Rehman, S. U., & Gruhn, V. (2024). A Sequential VGG16+ CNN based Automated Approach with Adaptive Input for Efficient Detection of Knee Osteoarthritis Stages. *IEEE Access*.
- Solak, F. Z. 2024. Classification of knee osteoarthritis severity by transfer learning from X-ray images. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 14(2), 119-133.
- Tang, W., Sun, J., Wang, S., & Zhang, Y. (2023). Review of alexnet for medical image classification. *EAI Endorsed Transactions on E-Learning*, 9. 1-13. <https://doi.org/10.4108/eetel.4389>
- Tiwari, A., Poduval, M., & Bagaria, V. (2022). Evaluation of artificial intelligence models for osteoarthritis of the knee using deep learning algorithms for orthopedic radiographs. *World Journal of Orthopedics*, 13(6), 603.

- Tong, Y., Lu, W., Deng, Q. Q., Chen, C., & Shen, Y. (2020). Automated identification of retinopathy of prematurity by image-based deep learning. *Eye and Vision*, 7, 1-12.
- Wahyuningrum, R. T., Yasid, A., & Jacob Verkerke, G. (2020, December). Deep neural networks for automatic classification of knee osteoarthritis severity based on X-ray images. In *Proceedings of the 2020 8th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City* (pp. 110-114).
- Wang, Y., Wang, X., Gao, T., Du, L., & Liu, W. (2021). An automatic knee osteoarthritis diagnosis method based on deep learning: data from the osteoarthritis initiative. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021(1), 5586529.
- Yang, Z., Nashik, S., Huang, C., Aibin, M., & Coria, L. (2024). Next-Gen Remote Airport Maintenance: UAV-Guided Inspection and Maintenance Using Computer Vision. *Drones*, 8(6), 225.
- Zeng, L., Zhou, G., Yang, W., & Liu, J. (2023). Guidelines for the diagnosis and treatment of knee osteoarthritis with integrative medicine based on traditional Chinese medicine. *Frontiers in medicine*, 10, 1260943.



METANOLDEN DİMETİL ETER ÜRETİM PROSESİNİN TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

Ali YALÇIN^{1*}

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Dimetil eter üretimi, Metanol, Simülasyon, SuperPro Designer, Tekno-ekonomik analiz.</i>	Bu çalışmada; SuperPro Designer kullanılarak, farklı üretim kapasitelerine (40.000-65000 ton/yıl) göre, metanolden dimetil eter (DME) üretimi için dolaylı sentez yönteminin bir simülasyonu ve üretim prosesinin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Üretim prosesine doğalgazın yakılmasıyla enerji geçişini sağlayan geliştirilmiş bir akım şeması da çizilmiştir. Yıllık 55.000 ton DME üretimi için toplam sermaye yatırımı, yıllık işletme maliyeti ve birim DME üretim maliyetinin, sırasıyla, 11,406 M\$, 28,375 M\$ ve 515,93 \$/ton olduğu tahmin edilmektedir. Farklı DME üretim kapasitelerinin geri ödeme süresi üzerine etkisi de belirlenmiş olup, tekno-ekonomik değerlendirme sonucunda, kabul edilebilir bir geri ödeme süresi, 5,02 yıl olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışması ile metanolden DME üretimi için dolaylı sentez yönteminin, 55.000 ton/yıl DME üretim hızını aşan üretim kapasitelerinde, kısa vadede yüksek bir karlılık potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF DIMETHYL ETHER PRODUCTION PROCESS FROM METHANOL

Keywords	Abstract
<i>Dimethyl ether production, Methanol, Simulation, SuperPro Designer, Techno-economic analysis.</i>	In this study, a simulation of the indirect synthesis method for producing dimethyl ether (DME) from methanol and a techno-economic analysis of the production process was performed using SuperPro Designer for different production capacities (40,000-65,000 tons/year). An improved flow chart that ensures energy transfer to the production process by burning natural gas was also enhanced. For the annual production of 55,000 tons of DME, the total capital investment, annual operating cost, and unit DME production cost were estimated to be 11.406 M\$, 28.375 M\$, and 515.93 \$/ton, respectively. The effect of different DME production capacities on the payback period was also determined based on various production capacities. As a result of the techno-economic evaluation, an acceptable payback period was calculated as 5.02 years. The simulation study shows that the indirect synthesis method for DME production from methanol has a high profitability potential in the short term at production capacities exceeding 55,000 tons/year DME production rate.

Alıntı / Cite

Yalçın, A., (2025). Metanolden Dimetil Eter Üretim Prosesinin Tekno-Ekonomik Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 340-352.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
A. Yalçın, 0000-0002-8722-4159	Başvuru Tarihi / Submission Date 23.10.2024 Revizyon Tarihi / Revision Date 20.01.2025 Kabul Tarihi / Accepted Date 27.01.2025 Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: ali.yalcin@sdu.edu.tr, +90-246-211-0905

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF DIMETHYL ETHER PRODUCTION PROCESS FROM METHANOL

Ali YALÇIN^{1†}

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Chemical Engineering, Isparta, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- The payback time of the simulated indirect synthesis process is 5.02 years, considering the annual production of 55,000 tons of DME.
- The unit production cost of DME is 515.93 \$/MT for the annual DME production capacity of 55,000 ton.
- The total capital investment and annual operating costs of the simulated plant are calculated to be 11.406 \$M and 28.375 \$M/year for a 55,000 ton/year capacity, respectively.

Purpose and Scope

The reasons for performing this study are to draw attention to the necessity of establishing a dimethyl production facility in Türkiye due to its high-profit margin and dimethyl ether imports and to guide process engineers/analysts in the establishment of a dimethyl ether production facility in Türkiye in the future.

Within the scope of this study, a techno-economic analysis of the indirect synthesis production process for producing dimethyl ether from methanol was carried out according to different production capacities. It is aimed to determine the total capital investment, annual operating cost, and unit production cost of dimethyl ether, considering an acceptable payback period which is estimated by the SuperPro Designer simulator.

Design/methodology/approach

Dimethyl ether is a more valuable chemical product than methanol and is produced by the gas-phase reaction of methanol using the indirect synthesis method. Whether the dimethyl ether production process is economically valuable is estimated through simulator programs such as Aspen Hysys, Chemcad, Aspen Plus, and SuperPro Designer. Within the scope of the study, a simulation and techno-economic analysis of the dimethyl ether production process from methanol was carried out using SuperPro Designer. For the annual production of 55,000 tons of DME, the payback period, the total capital investment, annual operating cost, and unit DME production cost were estimated to be 5.02 years, 11.406 M\$, 28.375 M\$, and 515.93 \$/ton, respectively.

Findings

The simulation results reveal that the dimethyl ether production facility has a high profitability potential in the short term, with the operation of production capacities exceeding 55,000 tons/year DME production rate, considering the selling price of DME (\$750/ton), the purchasing prices of methanol (\$390/ton) and natural gas (\$3.15/m³).

Originality

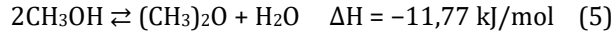
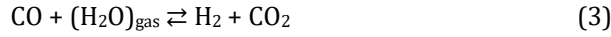
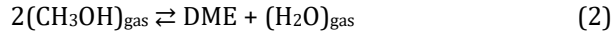
The dimethyl production plant for producing dimethyl ether from methanol was, for the first time, simulated by SuperPro Designer according to the various production capacities of dimethyl ether. An improved flow chart that ensures energy transfer to the production process by burning natural gas was also enhanced.

[†] Corresponding author: ali.yalcin@sdu.edu.tr, +90-246-211-0905

1. Giriş (Introduction)

Dimetil eter (DME, CH₃OCH₃), eter gruplarının en basit üyesi olup, renksiz ve kokusuz bir gazdır (Chmielarz, 2024). Dimetil sülfat, olefinler, metil asetat ve alkil aromatikler gibi birçok önemli kimyasalların üretiminde hammadde olarak kullanılmasının yanı sıra, pestisit, parlatma maddesi ve pas önleyici madde olarak da tercih edilmektedir (Ereña vd., 2011; Rownaghi vd., 2012; Chen vd., 2013; Azizi vd., 2014). Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda ise dizelin, az miktardaki DME ile yer değiştirilerek, yakıt karışımı olarak da kullanılmıştır. 5 barı aşan basınçlarda, gaz fazından sıvı faza dönüşen uçucu bir madde olduğu için sıvı olarak işlenebilir veya depolanabilir. Propan ve butanla benzer özelliklere sahip olması nedeniyle, ısıtma ve ev yemekleri için sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) olarak da kullanılmaktadır. Bununla birlikte, DME ve LPG'nin buhar basınçları birbirine yakın olduğundan dolayı, mevcut kullanım alanlarında taşınabilir ve depolanabilir. Bu nedenle, ilerleyen yıllarda da alternatif bir enerji kaynağı olmaya devam edeceği tahmin edilmektedir (Azizi vd., 2014).

DME; doğal gaz, ham veya atık petrol, biyokütle, kömür ve petrokimyasal atık ürünleri içeren çeşitli hammaddelerden sentezlenmektedir (Rownaghi vd., 2012). İlk kez, metanol ve sülfürik asidin damıtılmasıyla üretilmiştir (Chmielarz, 2024). Petrokimya endüstrisinde, sentez gazı yoluyla (doğrudan sentez yöntemi) veya metanolün katalitik dehidrojenasyonu (dolaylı sentez yöntemi) sentezlenmektedir (Azizi vd., 2014; Leonzio, 2018). Doğrudan sentez yönteminde, hammadde olarak, CO, H₂ ve CO₂'yi oluşturan sentez gazı, dolaylı sentez yönteminde ise, hammadde olarak metanol kullanılmaktadır (Moghaddam and Hazlett, 2023). Sentez gazından DME üretiminde, yüksek bir CO dönüşümü, daha düşük DME üretim maliyetleri ile sonuçlanmaktadır. Yüksek saflıkta DME üretimi için, tepkimeye girmemiş sentez gazının ve reaksiyon sonucu üretilen CO₂'nin varlığından dolayı ayırma prosesleri daha karmaşık hale gelmektedir (Leonzio, 2018). Bununla birlikte, CO ve (H₂O)_{gaz} arasında gerçekleşen reaksiyon sonucunda, CO₂ ve H₂ üretilmekte, dolayısıyla, reaksiyon ortamında CO'nun tüketilmesiyle, doğrudan sentez gazından DME üretimi ticari olarak uygun bir proses değildir (Eşitlik 1, 2, 3 ve 4) (Dahmen vd., 2012; Leonzio, 2018). Literatürde, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla DME üretimi ile ilgili bazı çalışmalar da mevcuttur (Azizi vd., 2014).



Saf metanolden DME üretimi için dolaylı sentez yöntemi, ticari olarak uygulanan bir üretim prosesidir. Eşitlik 5 incelendiğinde, metanolün dehidratasyonu reaksiyonunda toplam mol miktarı korunmaktadır. Çünkü reaksiyon koşullarında, 2 mol metanolün dehidratasyonu sonucunda, 1'er mol DME ve H₂O üretilmektedir. Termodinamik açıdan basıncın bir etkisi yok gibi görünse de %80 dönüşüm elde edebilmek için reaktöre beslenen metanolün konsantrasyonunun yüksek olması ve dolayısıyla, gaz fazı reaksiyonundan dolayı, metanolün basıncının yüksek olması gerekmektedir. 250°C ve 14,7 bar reaksiyon koşullarında, %80 dönüşüm için metanolün dehidratasyonu ile DME üretimi gerçekleştirilmekte olup, denge reaksiyonu Eşitlik 5'te gösterilmiştir (Turton vd., 2012).

Küresel dimetil eter üretim pazarı, Kuzey Amerika, Avrupa, Asya Pasifik, Latin Amerika, Orta Doğu&Afrika'da bulunan Shenhua Ningxia Coal Industry Group Co, Akzo Nobel N.V., China Energy Limited, Ferrostal GmbH, Fuel DME Production Co, Grillo-Werke AG, Guangdong JOVO Group Co., Haldor Topsoe, Jiutai Energy Group, Korea Gas Corporation, Mitsubishi Corporation, Oberon Fuels, Royal Dutch Shell Plc, The Chemours Company ve Zagros Petrochemical Company gibi büyük ölçekli yatırımlar yapan şirketler tarafından yönlendirilmektedir. DME'nin hammadde olarak kullanıldığı endüstrilerin ve kullanım alanlarının büyümesi nedeniyle, DME'ye olan talebin 2021-2030 yılları arasında artması beklenmektedir. DME'nin pazar büyüklüğü 2021'de 4,08 milyar dolardır ve 2030'da yaklaşık 8,79 milyar dolara ulaşması ön görülmektedir. Bileşik yıllık büyüme oranının (CAGR) 2022'den 2030'a %9,4 olması tahmin edilmektedir. Otomotiv pazarındaki artan talep ve otomotiv sektöründe yüksek emisyonlu yakıtlara karşı katı düzenlemeler, DME'ye olan talebi arttırmaktadır (Dimethyl Ether Market Share, 2024). DME gibi kâr marjı yüksek ürünlerin üretimine yönelik yatırım yapılmadan önce, ilgili üretim proseslerinin simülasyon programı yardımıyla, tekno-ekonomik analizini yapmak bazı önemli avantajlar sunmaktadır. Bunlar;

- Üretim tesisinde bulunan her bir prosesin tasarım süresini azaltır.
- Proses değişkenlerinin etkilerini saptayarak, en uygun optimum koşulları tahmin eder.
- Kısıtlamaları dikkate alarak, mevcut üretim süreçlerini geliştirir.
- Üretim prosesinin tekno-ekonomik analizini yaparak, tesisin yatırım maliyetini, yıllık işletme maliyetini, geri ödeme süresini ve karlılık oranını tahmin eder (Pasha vd., 2021).

Literatürde bazı endüstriyel prosesleri simüle etmek için Aspen Hysys, Chemcad, Aspen Plus ve SuperPro Designer gibi çeşitli simülasyon programları kullanılmaktadır (Turton vd., 2012; Harun vd., 2019; Pasha vd., 2021; Dieterich vd., 2024). SuperPro Designer; biyoteknoloji, çimento, biyogazlar, gıda, petrokimya prosesleri, bor teknolojisi, su arıtma ve işleme endüstrileri gibi tesislerde yaygın olarak uygulanan entegre proseslerin optimizasyonunu, değerlendirmesini ve tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmektedir. Herhangi bir tesisin gelecekteki uygulanabilirliğini tahmin etmek için üretim prosesindeki her bir prosesin kütle ve enerji denklik hesaplamalarını yapmaktadır (Pang vd., 2019).

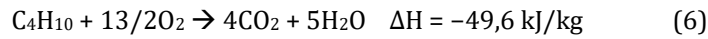
Bu çalışmada, SuperPro Designer programı kullanılarak, metanolden dimetil eter üretimi için dolaylı sentez yöntemi, 40.000-65.000 ton/yıl üretim kapasiteleri dikkate alınarak simüle edilmiştir. Simüle edilen üretim proseslerinden türetilen ekonomik verilere göre, değişen farklı üretim kapasitelerinin geri ödeme süresi üzerine etkisi, ilk kez, bu çalışmada tespit edilmiştir. 55.000 ton/yıl DME üretim kapasitesi için kullanılan her bir prosesin işletme koşulları ve akış özellikleri de SuperPro Designer'dan elde edilen veriler kullanılarak tespit edilmiştir. Simülatör aracılığıyla modellenen bu entegre üretim tesisi, araştırmacılara ve proses mühendislerine değerli bir rehber sağlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Dolaylı Sentez Yöntemi Kullanılarak DME Üretimi (DME Production Using Indirect Synthesis Method)

Metanolden DME üretimi için dolaylı sentez yöntemine ait prosesin akım şeması SuperPro Designer V9 kullanılarak çizilmiştir. Yanma odasında gerçekleştirilen doğal gazın yakılması için doğal gaz karışımında bulunan C_4H_{10} , CO_2 , C_2H_6 , CH_4 , C_3H_8 ve N_2 ile birlikte, doğal gazın yanması için kullanılan hava simülatörün kütüphanesinden seçilmiştir ve yüksek oranda metan içeren doğalgaz karışımındaki, gazların mol kesirleri, sırasıyla, %0,16; %0,62; %0,92; %97,00; %0,36 ve %0,94 olarak kaydedilmiştir (Natural gas composition percentage, 2024). Benzer şekilde, reaktöre beslenen CH_3OH ve reaksiyon ürünleri olan DME ve H_2O da bu kütüphaneden alınmıştır. DME üretim prosesinde bulunan kimyasal süreçler ile birlikte, sıvıların ve gazların taşınmasında kullanılan ekipmanlar yazılımdan seçilmiştir. Bu kimyasal süreçleri seri olarak bir birine bağlamak için boru hatları kullanılmıştır. DME üretim prosesi; doğal gazın yakılması için bir yanma odasını, metanolü reaksiyon koşullarına getirmek için bir pompayı ve iki adet ısı değiştiricileri, reaksiyon sonucu oluşan gazların ısını düşürmek için bir soğutucuyu, basıncını düşürmek için iki adet vanayı, yüksek saflıkta DME üretimi için bir DME distilasyon kolonunu, yüksek saflıkta metanolü geri kazanmak için bir metanol distilasyon kolonunu, metanol geri döngü hattını, DME'nin ve metanolün depolandığı tankları içermektedir (Turton vd., 2012). Simülasyon ile oluşturulan DME üretim prosesinin akım şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.

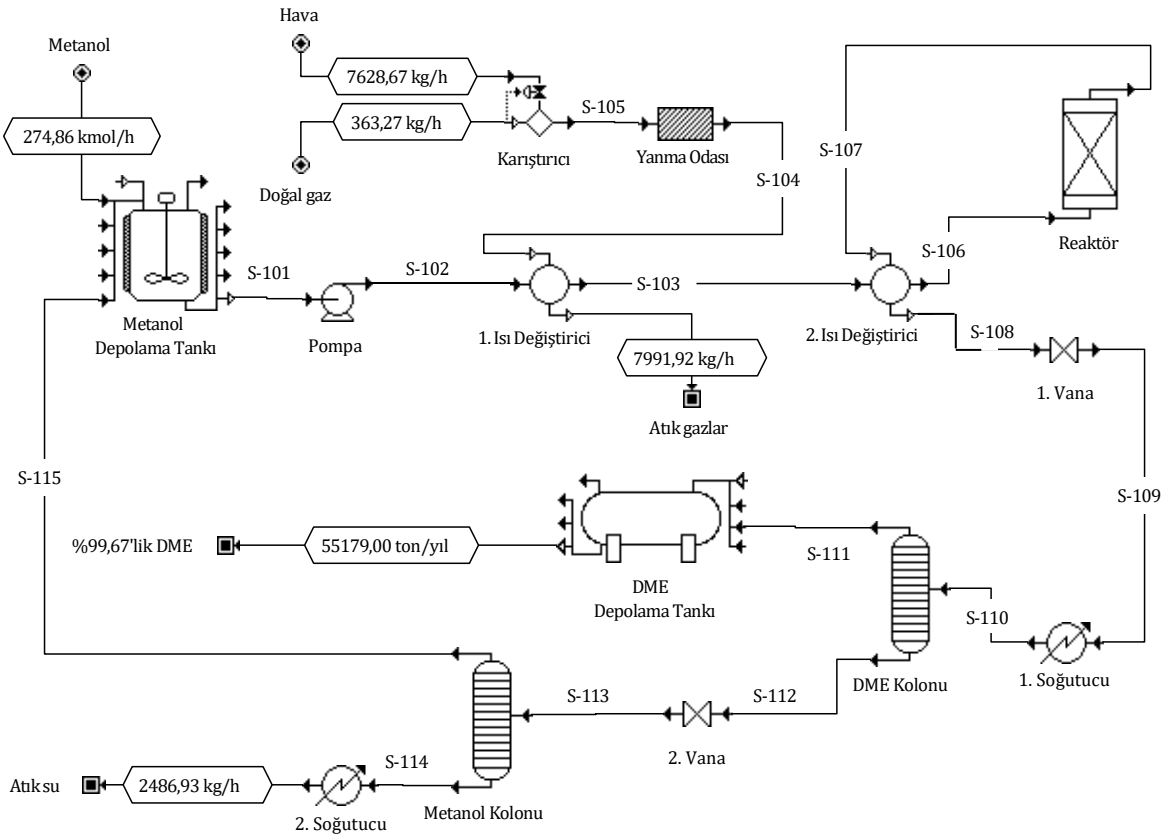
Doğal gazın yakılması sırasında meydana gelen yanma reaksiyonları ve bu reaksiyonlara ait reaksiyon ısıları Eşitlik 6, 7, 8 ve 9'da sunulmuştur (Dean, 1999). Eşitlik 5 ise, metanolden DME sentezi için meydana gelen reaksiyonu göstermektedir. Bu gaz fazı reaksiyonu %80 dönüşüm ile $250^\circ C$ ve 14,7 bar reaksiyon koşullarında katalitik olarak gerçekleşmektedir (Turton vd., 2012). Farklı DME üretim kapasiteleri için PFR reaktörü stokiyometrik reaksiyon modunda çalıştırılmış olup, %80 dönüşüm için reaktörün çıkışındaki hammaddelerin ve ürünlerin molar hızları belirlenmiştir.



Metanolün dehidratasyonu, yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleştiği için reaktöre girmeden önce, metanolün sıcaklığı $250^\circ C$ 'ye ve basıncı 14,7 bara yükseltilmelidir (Azizi vd., 2014, Leonzio, 2018). Metanolün reaktöre beslenmesi aşamasında, basınçlandırmak için bir pompa ve ısıtmak için iki adet seri bağlı ısı değiştirici kullanılmakta olup, bu reaksiyon koşullarında metanol gaz fazında reaktöre beslenmektedir (Turton vd., 2012; Alshbuki vd., 2020). Reaksiyon sonunda, gaz fazındaki reaksiyona girmeyen metanol ve reaksiyon ürünleri (DME ve H_2O) reaktörden çıkarak, sırasıyla, sürgülü vanaya ve soğutucuya beslenmektedir (Leonzio, 2018). Bu gaz karışımının basıncı, vana aracılığıyla 14,3 bardan, 10,4 bara, ardından, sıcaklığı, soğutucu aracılığıyla, $498,8^\circ C$ 'den, $89,0^\circ C$ 'ye düşürülmektedir. 10,4 bar ve $89,0^\circ C$ 'deki bu karışım, gaz ve sıvı karışımı olarak (buhar fraksiyonu, %50,41), yüksek saflıkta DME elde etmek için, DME distilasyon kolonuna girmektedir (Turton vd., 2012). DME, CH_3OH ve H_2O 'ya göre hafif bileşik olduğu için kolonun üst kısmından, CH_3OH ve H_2O ağır bileşikler olduğu için kolonun alt kısmından kolonu terk etmektedir. Az miktardaki CH_3OH ve H_2O kolonun üst kısmından, yine az miktardaki DME'nin de kolonun alt kısmından çıkışına izin verilmiştir (Dieterich vd., 2024). DME distilasyon kolonunun altından çıkan bu sıvı karışımı, metanol distilasyon kolonuna beslenmeden önce, ikinci bir sürgülü vanaya beslenerek basıncı, 10,4 bardan, 7,4 bara düşürülmüştür (Turton vd., 2012). Basıncın

düşürülmesi ile bu sıvı karışımı, gaz ve sıvı karışımı olarak (buhar fraksiyonu, %49,64), metanolü yüksek saflıkta geri kazanmak için, metanol distilasyon kolonuna beslenmiştir. Bu kolonda ise CH_3OH hafif faz, H_2O ağır fazdır. CH_3OH , az miktardaki H_2O ile birlikte kolonun üst kısmından çıkarken, H_2O ise, az miktardaki CH_3OH ile birlikte kolonun alt kısmından prosesi terk etmektedir. CH_3OH ve az miktardaki H_2O , metanol geri döngü hattından ilerleyerek, metanol depolama tankına beslenmiştir (Leonzio, 2018).

Metanolün sıcaklığını 250°C 'deki reaksiyon sıcaklığına, yükseltmek için iki adet seri bağlı ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Bu sıcaklığa ulaşmak için doğal gaz, 21 kat fazla hava ortamında yakılarak, sıcaklığı yüksek baca gazı elde edilmektedir. Yanma odasından çıkan bu baca gazı, 1. ısı değiştiricinin kabuk tarafından geçerken, tüp tarafından geçen metanole enerjisini aktararak, ısı transferi sağlanmaktadır. Enerji maliyetlerini azaltmak için yanma odasından çıkan baca gazı 2. ısı değiştiricinin kabuk tarafına beslenmemektedir. Metanolün dehidratasyonu doğası gereği meydana gelen ekzotermik reaksiyon sonucu oluşan ısı, reaktörden çıkan gazların sıcaklığını arttırmaktadır. Enerjisi yüksek bu gaz karışımı, soğutucuya girmeden önce, 2. ısı değiştiriciye beslenerek, 1. ısı değiştiriciden gelen gazların sıcaklığını, reaksiyon sıcaklığına yükseltmek için kullanılmıştır. Dolayısıyla, reaktörden çıkan gaz karışımı, 2. ısı değiştiricinin kabuk tarafından geçerken, tüp tarafından geçen ve yüksek oranda metanol içeren gaz karışımına enerjisini aktararak, ısı transferi sağlanmaktadır. SuperPro Designer kullanılarak, Metanolden DME üretim prosesi, farklı DME üretim kapasiteleri (40.000-65.000 ton/yıl) için ayrı ayrı simüle edilmiştir.



Şekil 1. Metanolden DME üretim prosenin akım şeması (Flow chart of DME production process from methanol)

Şekil 1'deki 55.000 ton DME üretim kapasitesi için SuperPro Designer simülörüne girilen metanol depolama tankı, DME depolama tankı, pompa, 1. ve 2. ısı değiştiriciler, DME ve metanol distilasyon kolonlarına ait işletme parametreleri EK A, EK B ve EK C'de sunulmuştur. SuperPro Designer simülöründen türetilen ve tahmin edilen tasarım parametreleri EK D ve EK E'de gösterilmiştir.

2.2. Tekno-Ekonomik Analizi (Techno-Economic Analysis)

Metanolden DME üretim prosenin ekonomik analizi, farklı üretim kapasiteleri dikkate alınarak, toplam sermaye yatırımı, yıllık işletme maliyeti ve üretim maliyetleri değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir. Toplam sermaye yatırımı; toplam dolaylı maliyet, toplam doğrudan maliyet, işletme anapara yatırımı, işletmeye alma maliyeti ve yüklenicinin ücreti beklenmedik durumlardan kaynaklı maliyetlerin toplamıdır (Tablo 1) (Maqhuza vd., 2020). İşletme anapara yatırımı, tesisi işletmek için gerekli fonlar olup, üretim sırasında karşılaşılan ekipman arızalarını onarmak için hammadde, sarf malzemesi ve yedek parçaya yatırılan yatırımlardır. İşletmeye alma

maliyeti ise, tek seferlik harcamaları ve yeni bir tesisi işletmeye hazırlamak için yapılan ön açılışı içermektedir. Dolayısıyla, bu giderler, toplam sermaye yatırımına dâhil edilmektedir (De Tommaso vd., 2024).

Yıllık toplam işletme maliyeti, 55.000 ton/yıl DME üretim kapasitesi için elde edilen kütle enerji denklıkları sonucunda her bir prosesin işletilmesi sırasında, hammadde, işçilik, tesis harcamaları, kalite kontrol, kalite güvencesi, elektrik maliyetleri gibi giderlerin toplamından oluşmaktadır (Roussos vd., 2019). Isıtma, soğutma, elektrik ve işçilik vs. gibi harcamalar, simülasyon programı tarafından tahmin edilmiştir. DME üretim prosesinin yatırım yapılabilecek karlı bir proses olup olmadığını belirlemek için geri ödeme süresi ve net bugünkü değer (NBD), Eşitlik 10 ve 11 ile hesaplanmıştır (Tomczyk vd., 2022; Dobrowolski vd., 2022).

$$\text{Geri ödeme süresi} = \text{Toplam yatırım/Net kar} \quad (10)$$

$$\text{NBD} = \sum_{k=1}^n \frac{\text{NNA}_k}{(1+i)^k} \quad (11)$$

Burada; NNA_k , k yılı için net nakit akışı, i, faiz oranı, n ise proje yaşam ömrüdür.

Duyarlılık analizi, yıllık işletme maliyeti, gelir ve metanol satın alma maliyeti gibi girdi değişkenlerinin prosesin çıktı değişkeni olan karlılıktaki belirsizi nasıl etkilediğini tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu analizi gerçekleştirmek için girdi değişkeni olarak yıllık işletme maliyeti, gelir ve metanol satın alma maliyeti, çıktı değişkeni olarak ise, net bugünkü değer dikkate alınmıştır (Turton vd., 2012). Girdi parametrelerindeki $\pm\%0,5$ 'lik değişim için net bugünkü değerler hesaplanmış olup, duyarlılık eğrileri oluşturulmuştur.

3. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

3.1. Simüle Edilen Dolaylı Sentez Yöntemi (The Simulated Indirect Synthesis Method)

Metanolden DME üretimi için dolaylı sentez yöntemi, SuperPro Designer kullanılarak, 40.000-65,000 ton/yıl üretim kapasite aralığında, toplamda 6 kez simüle edilmiştir. Yıllık 55.000 ton DME üretim kapasitesi için, kütle ve enerji denklik hesaplamalarını dikkate alarak simüle edilen prosesten elde edilen her bir prosesin girişindeki ve çıkışındaki akış özellikleri, işletme koşulları, Tablo 1'de gösterilmiştir. S-105 hattı, yanma odasına giren doğalgaz ve hava, S-104 hattı ise yanma ürünleri oldukları için bu hatlarda metanol, DME ve su yoktur.

Literatürde, metanolden DME üretimi için dolaylı sentez yönetiminin simüle edildiği çalışmalar incelendiğinde, metanolü reaksiyon sıcaklığına getirmek için 1. ısı değiştiricide buhar kullanılmıştır (Turton vd., 2012; Azizi vd., 2014; Leonzio, 2018). Bu çalışmada ise, doğalgazın oksijen ile yakılması sonucu elde edilen yüksek sıcaklıktaki yanma gazlarının ısısı, metanole aktarılarak metanolün sıcaklığı reaksiyon sıcaklığına yükseltilmiştir. Dolayısıyla, S-102 hattından ilerleyen 44,01°C'deki sıvı karışımı, 1. ısı değiştiriciden geçerek 154°C'ye, ardından, 2. ısı değiştiricide 250°C'ye ısıtılmaktadır. Bu sıvı karışımının sıcaklığının yükseltilmesi için 1. ve 2. ısı değiştiricilerde, sırasıyla, 4451,08 ve 530,09 kW'lık ısı aktarımı gerçekleştirilmiştir. Dolaylı sentez yönetiminin CHEMCAD simülasyon programı ile modellendiği bir çalışmada, 50.000 MT DME üretim hızı için 1. ve 2. ısı değiştiricilerde, sırasıyla, 4003,2 ve 564,3 kW'lık ısı aktarımı gerçekleştirildiği tespit edilmiştir (Turton vd., 2012). Başka bir çalışmada, 116 kton/yıl DME üretim kapasitesi için dolaylı sentez yöntemi Aspen Plus programı kullanılarak simüle edilmiştir. Enerji verimliliğinin dikkate alındığı bu çalışmada geliştirilmiş bir akım şeması da çizilmiş olup, metanolün sıcaklığını reaksiyon sıcaklığına yükseltmek için buhar kullanılmıştır. Sıvı fazdaki metanolün sıcaklığını 25,96°C'den, 296,85°C'ye yükseltmek için buhardan metanole 14716,76 kW'lık ısı aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise, metanolün sıcaklığını 44,01°C'den, 250°C'ye yükseltmek için 4981,17 kW'lık ısı geçişi sağlanmıştır. İki çalışmada tespit edilen ısı yüklerinin farklı olması, Aspen Plus ile simüle edilen prosesin üretim kapasitesinin bu çalışmadaki üretim kapasitesinden yaklaşık olarak 2 kat fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Dahası, Aspen Plus ile simüle edilen çalışmada metanolün sıcaklığı 25,96°C'den, 296,85°C'ye yükseltilirken, bu çalışmadaki ΔT sıcaklık farkı 205,99°C'dir (Fortin vd., 2020). Her iki durum dikkate alındığında, bu çalışmada yanma gazlarından metanole aktarılan ısıtma yükünün, literatürdeki kızgın buhardan metanole aktarılan ısı aktarım verilerine yakın olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, gaz fazı reaksiyonu sonucunda, üretilen ürünlerin ve reaksiyona girmemiş metanol gaz fazındadır. Bu gaz fazındaki ürünler 1. soğutucudan geçerek, 89°C'ye soğutulmakta, bu soğutma işlemi sonucunda 4612 kW'lık ısı uzaklaştırılmıştır.

Tablo 1. 55.000 ton/yıl kapasite için her bir prosesin girişindeki ve çıkışındaki akış hızları ve koşulları
(Flow rates and conditions at the inlet and outlet of each process for a capacity of 55,000 tons/year)

Proses giriş ve çıkış noktaları	S-101	S-102	S-103	S-104	S-105	S-106	S-107	S-108
Bileşen için molar akış hızı (kmol/sa.)								
Metanol	341,87	341,87	341,87	0	0	341,87	68,37	68,37
Dimetil eter	1,48	1,48	1,48	0	0	1,48	138,23	138,23
Su	1,35	1,35	1,35	0	0	1,35	138,10	138,10
Toplam molar akış hızı (kmol/sa.)	344,70	344,70	344,70	286,51	286,27	344,70	344,71	344,71
Toplam kütleli akış hızı (ton/sa.)	11,05	11,05	11,05	7,99	7,99	11,05	11,05	11,05
Proses işletme koşulları								
Sıcaklık (°C)	43,70	44,01	154,00	1864,20	25,00	250,00	566,20	498,80
Basınç (bar)	1,013	15,20	15,10	5,00	1,013	14,7	14,7	14,3
Proses giriş ve çıkış noktaları	S-109	S-110	S-111	S-112	S-113	S-114	S-115	
Bileşen için molar akış hızı (kmol/sa.)								
Metanol	68,37	68,37	0,63	67,75	67,75	0,74	67,00	
Dimetil eter	138,23	138,23	136,75	1,48	1,48	0,00	1,48	
Su	138,10	138,10	0,01	138,09	138,09	136,73	1,35	
Toplam molar akış hızı (kmol/sa.)	344,71	344,71	137,40	207,31	207,31	137,47	69,84	
Toplam kütleli akış hızı (ton/sa.)	11,05	11,05	6,32	5,21	5,21	2,74	2,47	
Proses işletme koşulları								
Sıcaklık (°C)	498,80	89,00	46,00	126,94	126,94	163,00	117,00	
Basınç (bar)	10,4	10,4	10,4	10,4	7,4	7,4	7,4	

3.2. DME Üretim Prosesinin Tekno-Ekonomik Analizi (Techno-Economic Analysis of The DME Production Process)

Metanolden DME üretim prosesinin ekonomik değerlendirilmesi, toplam sermaye yatırımı, yıllık işletme maliyeti ve birim üretim maliyetlerinin tahmini üzerinden belirlenmiştir. Ekonomik değerlendirme parametreleri, tüm proje için 2024 yılındaki veriler dikkate alınarak, tüm proje için hesaplanmıştır. Tesisin 15 yıllık ömrü, başlangıç aşaması ve bir yıllık inşaattan oluşmaktadır. DME üretim süreci, 330 günlük bir çalışma süresini içeren sürekli bir süreçtir ve simülatör prosesin ekonomik verilerini, kurulu kapasitenin tamamını dikkate alarak tahmin etmektedir. SuperPro Designer, yıpranma payı ve terk edilme değeri için varsayılan değerler önermekte ve 10 yıllık amortismanın hesaplanmasında, düz çizgi yöntemi kullanmıştır. Terk edilme değeri, ilk maliyetin %5'i olduğu kabul edilmiştir (Peters vd., 2003). Üretim sürecindeki her bir prosesin değerini tahmin etmek için ekipman satın alma maliyetleri simülasyon programının veri tabanından tahmin edilmiştir. Farklı üretim kapasiteleri için SuperPro Designer'den tahmin edilen her bir prosesin toplam sermaye yatırımlarını içeren maliyetler, Tablo 2'de gösterilmiştir. SuperPro Designer simülatörü tarafından tahmin edilen ekipmanların satın alma maliyetleri ise EK E'de sunulmuştur.

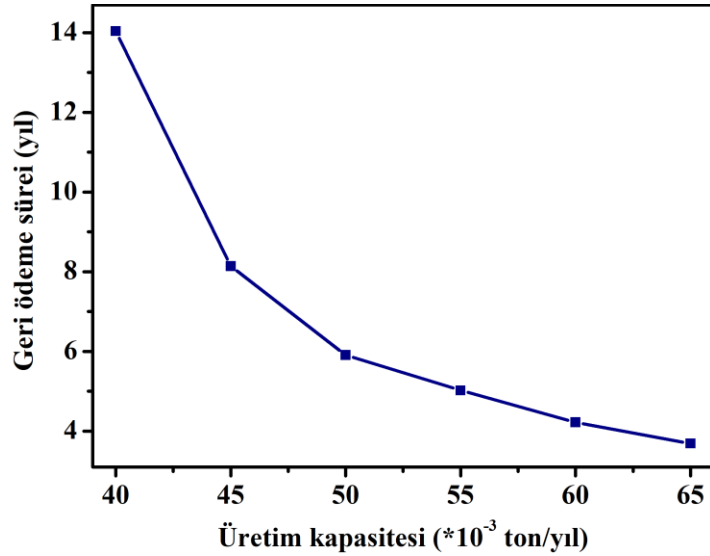
Tablo 2. Farklı DME üretim kapasiteleri (40-65*10³ ton/yıl) için toplam sermaye yatırımları (M\$)
(Total capital investments (M\$) for various DME production capacities (40-65*10³ tons/year))

Giderler		40	45	50	55	60	65
Ekipman satın alma maliyeti (PC)	Listelenen ekipman maliyeti	1.190	1.236	1.283	1.423	1.466	1.516
Kurulum	Ekipmana özgü	0.476	0.497	0.516	0.584	0.603	0.625
Proses borulama	0.2 x PC	0.417	0.433	0.449	0.498	0.513	0.531
Enstrümantasyon	0.1 x PC	0.476	0.495	0.513	0.569	0.587	0.607
Yalıtım	0.03 x PC	0.036	0.037	0.038	0.043	0.044	0.045
Elektrik	0.1 x PC	0.119	0.124	0.128	0.142	0.147	0.152
Binalar	0.05 x PC	0.536	0.556	0.577	0.640	0.660	0.682
Çevre düzenleme	0.1 x PC	0.179	0.185	0.192	0.213	0.220	0.227
Yardımcı tesisler	0.2 x PC	0.476	0.495	0.513	0.569	0.587	0.607
Toplam Doğrudan Maliyet (TDC)		3.905	4.058	4.209	4.681	4.827	4.992
Mühendislik giderleri	0.25 x TDC	0.976	1.014	1.052	1.170	1.206	1.248
İnşaat giderleri	0.35 x TDC	1.366	1.420	1.473	1.638	1.689	1.747
Toplam Dolaylı Maliyet (TIC)		2.342	2.434	2.525	2.808	2.895	2.995
Yüklenici ücreti	0.05 x (TDC + TIC)	0.312	0.325	0.337	0.374	0.386	0.399
Beklenmedik durum	0.1 x (TDC + TIC)	0.624	0.649	0.674	0.749	0.772	0.799
Yüklenici Ücreti & Beklenmedik durum (CFC)		0.936	0.974	1.011	1.123	1.158	1.198
İşletme sermayesi		1.845	2.018	2.190	2.363	2.535	2.708
Başlangıç maliyeti		0.359	0.373	0.387	0.431	0.444	0.459
Toplam Sermaye Yatırımı		9.387	9.857	10.322	11.406	11.859	12.352

(TCI = TDC + TIC + CFC)

3.2.1. Geri ödeme süresi (Payback period)

DME üretim prosesi, 40.000-65.000 ton aralığındaki her 5.000 ton artış için simüle edilmiştir ve her bir prosesten tahmin edilen geri ödeme süreleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Yatırımcılar, yatırım yaptıkları parayı kısa vade de geri kazanmak istedikleri için, herhangi bir üretim prosesi için iyi bir geri ödeme süresi, 5 yıl olarak öngörülmektedir (Sidiras and Koukios, 2005; Li vd., 2021). Şekil 2 incelendiğinde, üretim kapasitesi arttıkça, geri ödeme süresi azalmaktadır. Bunun nedeni, yüksek kapasite değerlerinden dolayı, ekipmanların boyutlarındaki belirli bir artış, daha az sermaye yatırımının artmasına neden olurken, daha fazla DME üretilmesiyle daha yüksek gelirler elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu da üretim kapasitesinin artmasıyla, geri ödeme süresinde eksponansiyel bir azalmaya neden olmaktadır. Diğer taraftan, üretim kapasitesi azaldıkça, daha düşük DME gelirlerinden dolayı, geri ödeme süresi de artmaktadır. Yıllık 55.000 ton DME üretim kapasitesi için geri ödeme süresi 5,02 olarak tahmin edilmektedir ve bu üretim kapasitesinin üzerindeki farklı üretim kapasitelerinin, yatırım için uygun olduğu anlamı taşımaktadır. Literatürde, palm yağından biyodizel üretimi, buğday samanından bütirik asit üretimi ve biyogaz üretimi gibi endüstriyel tesislerin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiş ve tahmin edilen geri ödeme sürelerinin, sırasıyla, 5,7 yıl, 4,7 yıl ve 8 yıl olduğu tahmin edilmiştir (Ogrodowczyk vd., 2016; Baroi vd., 2017; Harahap vd., 2019). Bu çalışmada belirlenen geri ödeme süresine yakın ve yüksek olduğu görülmektedir.

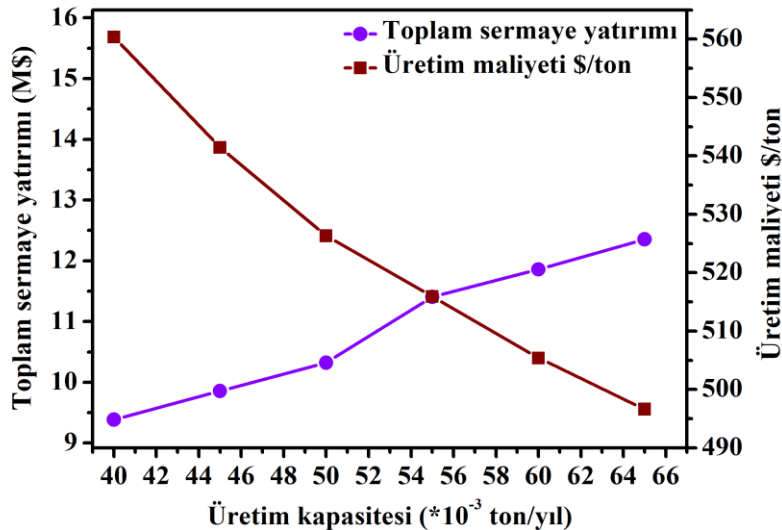


Şekil 2. Farklı üretim kapasitesi için tahmin edilen geri ödeme süreleri
(Estimated payback periods for various production capacities)

3.2.2. Toplam sermaye yatırımı (Total capital investment)

Toplam sermaye yatırımı tahmin etmek için kullanılan çeşitli giderleri ve harcamaları içeren maliyet dokümanı Tablo 2'de sunulmuştur. Yıllık 40.000-65.000 ton DME üretim kapasiteleri için, metanolden DME üretim prosesinin toplam sermaye yatırımı 9,387 M\$ ve 12,352 M\$ arasında değişmektedir. DME üretim kapasitesi arttıkça, üretim hattında kullanılan proseslerin ve ekipmanların boyutları ve sayısı da artmaktadır. Bu da toplam sermaye yatırımının artmasına neden olan beklenen bir durumdur. Geri ödeme süresinin 5,02 yıl olarak tahmin edildiği 55.000 ton/yıl DME üretim hızı için ise toplam sermaye yatırımı 11,406 M\$ olarak hesaplanmıştır. Sentez gazından DME üretim prosesinin simüle edildiği bir çalışmada ise, üretim kapasitesinin yüksek olmasından dolayı, sermaye yatırımının 47,1 M\$ olduğu tespit edilmiştir (Lopes vd., 2020). Biyo-yapıştırıcı üretim tesisinde, 10-50 MT/kesikli üretim kapasitesi için tahmin edilen toplam sermaye yatırımının 15,282-35,906 M\$ arasında değiştiği rapor edilmiştir (Ahire vd., 2024).

Şekil 3, DME üretim maliyeti üzerine farklı üretim kapasitelerinin etkisini göstermektedir. Yüksek kapasitelerdeki DME üretim maliyeti, düşük kapasitelere göre daha azdır. Yıllık 55.000 ton DME üretim kapasitesi için, DME'nin satış fiyatı (750 \$/ton), metanolün (390 \$/ton) ve doğal gazın (3,15 \$/m³) satın alma fiyatları dikkate alındığında, simüle edilen prosesten tahmin edilen yıllık işletme maliyeti aracılığıyla, DME'nin üretim maliyeti 515,93 \$/ton olarak hesaplanmıştır. Yıllık işletme maliyetinin %68'i hammadde maliyettir (Tablo 3) ve büyük bir kısmını da metanolün satın alma maliyeti oluşturmaktadır. Metanolün satın alma fiyatının 390 \$/ton'un altına düşüğe ya da DME'nin satış fiyatının 750 \$/ton'un üzerine çıktıkça, DME'nin üretim maliyeti 515,93 \$/ton'un altına düşecektir. Bu durum daha fazla kar marjına yol açtığı için, istenen bir durumdur.



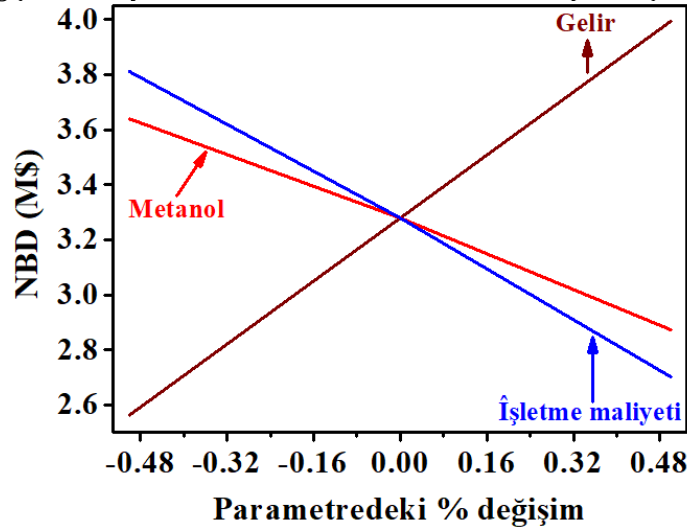
Şekil 3. Toplam sermaye yatırımının ve birim üretim maliyetinin yıllık üretim kapasitelerine göre değişimi
(Change in total capital investment and unit production cost based on annual production capacities)

3.2.3. Yıllık işletme maliyeti (Annual operating cost)

Yıllık işletme maliyetinin değerlendirilmesinde, 55.000 \$/ton DME üretim kapasitesi dikkate alınmıştır ve tahmin edilen toplam değişken üretim maliyetleri Tablo 3'te sunulmuştur. Yıllık işletme maliyeti, hammadde, vergi, sigorta, tesis bakımı, ekipman amortismanı, tesisi bağlı maliyetleri içermektedir ve 28,375 M\$ olarak hesaplanmıştır. Bu toplam maliyetin %86,02'i hammadde ve işçilik maliyetleriyken, geriye kalan maliyetler (%13,98), tesis harcamaları, laboratuvar/KG/KK ve diğer giderlerdir (Tablo 3). Hammadde maliyetleri incelendiğinde ise, bu maliyetin %99,63'ü metanol satın alma maliyetidir. Bu tesisin işletilmesinde kullanılan herhangi bir prosesten endüstriyel bir atığın üretilmemesinden dolayı, atık iyileştirme maliyeti bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Prosesten çıkan sıcaklığı yüksek atık su ve atık gazlar sayesinde, tesisin bazı kısımlarının ısıtılması da düşünülebilir.

Çöp atıklarından üretilen biyogazdan DME üretimi için, doğrudan sentez üretim prosesi modellenmiştir ve yıllık işletme maliyeti 1,012 M€ olarak rapor edilmiştir (Merkouri vd., 2022). Hammadde olarak atıkların kullanılmasıyla, bu çalışmada hammadde maliyeti önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu çalışmada ise, metanol maliyetinin yüksek olmasından dolayı, yıllık işletme maliyeti yüksek seviyelerdedir. Farklı bir çalışmada ise, sentez gazından DME üretiminin gerçekleştirildiği üretim prosesi, Aspen Hysys kullanılarak simüle edilmiştir ve yıllık işletme maliyetinin 14.1 M\$ olduğu tahmin edilmektedir (Lopes vd., 2020).

55.000 ton/yıl DME üretim tesisine 15 yıllık bir yatırım için net bugünkü değer, SuperPro Designer tarafından 3278.99 M\$ olarak tahmin edilmiştir. Yıllık işletme giderleri arasında en fazla metanolün satın alma maliyeti olması sebebiyle, metanolün satın alma maliyeti ile birlikte, yıllık gelir ve işletme maliyetinin duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir. Bu üç girdi parametresinde $\pm 0,5$ 'lik bir değişim için NBD'yi nasıl etkilediğini gösteren duyarlılık eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Satın alma maliyeti, yıllık gelir ve işletme maliyetindeki $\pm 0,5$ 'lik bir değişim için NBD'deki değişim, sırasıyla, -0.77, 1.43 ve -1.11 M\$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Girdi parametreleri için duyarlılık eğrileri (Sensitivity curves for input parameters)

Tablo 3. 55.000 ton/yıl üretim kapasitesi için yıllık işletme maliyeti (M\$)
(Annual operating cost (M\$) for 55,000 tons/year production capacity)

Toplam değişken üretim maliyetleri	M\$	%
Hammaddeler	19,294	68,00
İşçilik	5,113	18,02
Tesis	1,621	5,71
Laboratuvar/KG/KK	0,767	2,70
Diğer giderler	1,580	5,57

KG/KK: Kalite güvence, Kalite kontrol

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Metanolden DME üretimi için dolaylı sentez yöntemi, yıllık 40.000-65.000 ton DME üretim kapasiteleri dikkate alınarak, toplamda 6 kez SuperPro Designer kullanılarak simüle edilmiştir. Her bir prosesin kütle ve enerji denklik hesaplamaları sonucunda, proseslerin girişindeki ve çıkışındaki akış özellikleri belirlenmiştir. Üretim prosesinin detaylı tekno-ekonomik analizi değerlendirmesi, farklı üretim kapasitelerinin modellenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Farklı DME üretim kapasiteleri için, üretim prosesinin toplam sermaye yatırımı 9,387 M\$ ve 12,352 M\$ arasında değişmektedir ve 55.000 ton/yıl üretim hızı için 11,406 M\$ olarak hesaplanmıştır. Bu üretim kapasitesi için yıllık işletme maliyeti 28,375 M\$ ve birim DME üretim maliyeti 515,93 \$/ton'dur. Kabul edilebilir bir geri ödeme süresinin 5,02 yıl olduğu tahmin edilmektedir. DME'nin satış fiyatı (750 \$/ton), metanolün (390 \$/ton) ve doğal gazın (3,15 \$/m³) satın alma fiyatları dikkate alındığında, 55.000 ton/yıl DME üretim hızında tesisin işletilmesiyle, yüksek bir karlılık potansiyelinin ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

SuperPro Designer V9 kullanım izni için Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahire, J. P., Mousavi-Avval, S. H., Rajendran, N., Bergman, R., Runge, T., Jiang, C., Hu J., 2024. Techno-economic and life cycle analyses of bio-adhesives production from isolated soy protein and kraft lignin. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141474. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141474>.
- Alshbuki, E. H., Bey, M. M., Mohamed, A. A., 2020. Simulation Production of Dimethylether (DME) from Dehydration of Methanol Using Aspen Hysys. *Scholars International Journal of Chemistry and Material Sciences*, 03 (02), 13-18. [10.36348/sijcms.2020.v03i02.002](https://doi.org/10.36348/sijcms.2020.v03i02.002).
- Azizi, Z., Rezaeimanesh, M., Tohidian, T., Rahimpour, M. R., 2014. Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 82, 150-172. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.06.007>.
- Baroi, G. N., Gavala, H. N., Westermann, P., Skiadas, I. V., 2017. Fermentative production of butyric acid from wheat straw: Economic evaluation. *Industrial Crops and Products*, 104, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.008>.
- Chen, H. J., Fan, C. W., Yu, C. S., 2013. Analysis, synthesis, and design of a one-step dimethyl ether production via a thermodynamic approach. *Applied Energy*, 101, 449-456. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.025>.
- Chmielarz, L., 2024. Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether—Current State and Perspectives. *Catalysts*, 14 (5), 308. <https://doi.org/10.3390/catal14050308>.
- Dahmen, N., Henrich, E., Dinjus, E., Weirich, F., 2012. The bioliq® bioslurry gasification process for the production of biosynfuels, organic chemicals, and energy. *Energy, Sustainability and Society*, 2, 1-44. <https://doi.org/10.1186/2192-0567-2-3>.
- De Tommaso, J., Galli, F., Weber, R., Dubois, J. L., Patience, G. S., 2024. Total Capital Investment of plastic recycling plants correlates with energy losses and capacity. *ChemSusChem*, 17 (5), e202301172. <https://doi.org/10.1002/cssc.202301172>.
- Dean, J. A., 1999. *Lange's Handbook of Chemistry*, Fifteenth Edition. McGraw-Hill, Inc.
- Dieterich, V., Neumann, K., Niederdränk, A., Spliethoff, H., Fendt, S., 2024. Techno-economic assessment of renewable dimethyl ether production pathways from hydrogen and carbon dioxide in the context of power-to-X. *Energy*, 301, 131688. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131688>.
- Dimethyl Ether Market Share, S., Trends, Industry Analysis Report, 2022-2030 <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/dimethyl-ether-market>. Erişim tarihi, 29.10.2024.
- Dobrowolski, Z.; Drozdowski, G. Does the Net Present Value as a Financial Metric Fit Investment in Green Energy Security? *Energies* 2022, 15 (1), 353. <https://doi.org/10.3390/en15010353>.
- Ereña, J., Sierra, I., Aguayo, A. T., Ateka, A., Olazar, M., Bilbao, J., 2011. Kinetic modelling of dimethyl ether synthesis from (H₂+CO₂) by considering catalyst deactivation. *Chemical Engineering Journal*, 174 (2-3), 660-667. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.067>.
- Fortin, C., Gianfolcaro, N., Gonzalez, R., Lohest, J., Lonnew, A., Kesnelle, A., ... & Schmitz, C. 2020. Dimethyl ether, a review of production processes and a modeling of the indirect route. *Liege Univ*, 2019-2020.
- Harahap, F., Silveira, S., Khatiwada, D., 2019. Cost competitiveness of palm oil biodiesel production in Indonesia. *Energy*, 170, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.115>.
- Harun, N., Othman, N. A., Zaki, N. A., Mat Rasul, N. A., Samah, R. A., Hashim, H., 2019. Simulation of Anaerobic Digestion for Biogas Production from Food Waste Using SuperPro Designer. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1315-1320. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.143>.

- Leonzio, G., 2018. State of art and perspectives about the production of methanol, dimethyl ether and syngas by carbon dioxide hydrogenation. *Journal of CO2 Utilization*, 27, 326-354. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.08.005>.
- Li, H. X., Zhang, Y., Li, Y., Huang, J., Costin, G., Zhang, P., 2021. Exploring payback-year based feed-in tariff mechanisms in Australia. *Energy Policy*, 150, 112133. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112133>.
- Lopes, G. D. F., Bonfim-Rocha, L., de Matos Jorge, L. M., Paraíso, P. R., 2020. Dimethyl Ether Production from Sugarcane Vinasse: Modeling and Simulation for a Techno-economic Assessment. *BioEnergy Research*, 13 (2), 397-410. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10089-9>.
- Maqhuzu, A. B., Yoshikawa, K., Takahashi, F., 2020. Stochastic economic analysis of coal-alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal carbonization in Zimbabwe. *Science of The Total Environment*, 716, 135337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135337>.
- Merkouri, L. P., Ahmet, H., Reina, T. R., Duyar, M. S., 2022. The direct synthesis of dimethyl ether (DME) from landfill gas: A techno-economic investigation. *Fuel*, 319, 123741. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123741>.
- Moghaddam A. L., Hazlett, M. J., 2023. Methanol dehydration catalysts in direct and indirect dimethyl ether (DME) production and the beneficial role of DME in energy supply and environmental pollution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (3), 110307. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110307>.
- Natural gas composition percentage, <https://group.met.com/en/media/energy-insight/composition-of-natural-gas>. Erişim tarihi, 16.11.2024.
- Ogrodowczyk, D., Olejnik, T. P., Kaźmierczak, M., Brzeziński, S., Baryga, A., 2016. Economic analysis for biogas plant working at sugar factory. *Biotechnology and Food Science*, 80 (2), 129-136. <https://doi.org/10.34658/bfs.2016.80.2.129-136>.
- Pang, Y. X., Yan, Y., Foo, D. C. Y., Sharmin, N., Zhao, H., Lester, E., Wu, T., Pang, C. H., 2019. The study of lignocellulosic biomass pyrolysis via superpro designer. 11th International Conference on Applied Energy, 2019, Paper ID: 0644.
- Pasha, M. K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., Du, W., 2021. An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnol Biofuels*, 14 (1), 129. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., West, R. E., 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Fifth Edition. McGraw-Hill Education.
- Roussos, A., Misailidis, N., Koulouris, A., Zimbardi, F., Petrides, D., 2019. A Feasibility Study of Cellulosic Isobutanol Production—Process Simulation and Economic Analysis. *Processes*, 7 (10), 667. <https://doi.org/10.3390/pr7100667>.
- Rownaghi, A. A., Rezaei, F., Stante, M., Hedlund, J., 2012. Selective dehydration of methanol to dimethyl ether on ZSM-5 nanocrystals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 119-120, 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.02.017>.
- Sidiras, D. K., Koukios, E. G., 2005. The effect of payback time on solar hot water systems diffusion: the case of Greece. *Energy Conversion and Management*, 46 (2), 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.02.018>.
- Tomczyk, S., Ozturk, S., Wawrzyniak, T., Tessman, M., Ehrlich, C., Shaikh, F., 2022. The design and techno economic analysis of a succinic acid production facility. *Frontiers in Sustainability*, 3, 953942. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.953942>.
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A., 2012. *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.

Ekler (Appendix)

EK A. Metanol Depolama Tankı, DME Depolama Tankı ve Pompa için işletme parametreleri
(Operating parameters for Methanol Storage Tank, DME Storage Tank and Pump)

İşletme Parametreleri	Metanol Depolama Tankı	DME Depolama Tankı	İşletme Parametreleri	Pompa
Basınç (bar)	1,013	10,40	Basınç değişimi (bar)	14,187
Sıcaklık (°C)	43,7	46	Çıkış sıcaklığı (°C)	44,01
Kalma zamanı (sa.)	1	1	Pompa gücü(kW)	8,07
Tank hacmi (m ³)	15,92	11,30	Hacimsel akış hızı (m ³ /sa.)	14,33

EK B. 1. ve 2. Isı değıştiriciler için işletme parametreleri (Operating parameters for 1. and 2. heat exchangers)

İşletme Parametreleri	Birim	1. Isı değıştirici	2. Isı değıştirici
		İşletme verileri	
Sıcak akışkan sıcaklık düşüşü	°C	1668,30	67,40
Soğuk akışkan sıcaklık artışı	°C	109,99	96,00
Sıcak akışkan çıkış sıcaklığı	°C	195,90	498,80
Soğuk akışkan çıkış sıcaklığı	°C	154,00	250,00
Tüp tarafı basınç düşüşü	bar	0,1	0,4
Kabuk tarafı basınç düşüşü	bar	0,1	0,4

EK C. DME ve Metanol distilasyon kolonları için işletme parametreleri
(Operating parameters for DME and Methanol distillation columns)

Bileşim	DME Kolonu		Metanol Kolonu	
	Bağıl uçuculuk	Distilattaki % bileşim	Bağıl uçuculuk	Distilattaki % bileşim
Metanol	3,63	0,92	2,85	98,91
Dimetil eter	39,94	98,93	15,59	100,0
Su	1	0,01	1	0,98
İşletme Parametreleri	DME Kolonu		Metanol Kolonu	
Reflaks oranı	1,773		1,815	
R/Rmin	3,605		1,155	
Besleme kalitesi (%)	50,48		96,19	
Kolon basıncı (bar)	10,4		7,4	
Buhar hızı (m/s)	3		3	
Teorik raf sayısı	5,44		21,21	
Raf verimliliği (%)	80		80	

EK D. PFR Reaktörü, DME ve Metanol distilasyon kolonları için tasarım parametreleri
(Design parameters for PFR Reactor, DME and Methanol distillation columns)

Tasarım parametreleri	PFR Reaktörü	Tasarım parametreleri	DME Kolonu	Metanol Kolonu
		Kolon çapı (m)	0,359	0,328
L/D	10	Kolon yüksekliği (m)	2,8	10,80
Uzunluk (m)	16,3	Gerçek raf sayısı	7	27,0
Çap (m)	1,63	Raf yüksekliği (m)	0,4	0,4
Hacim (m ³)	34	Soğutma yükü (kW)	1918,6	2112,2
Termal mod	Adyabatik	Isıtma yükü (kW)	861,6	2095,1

EK E. Dolaylı sentez yönteminde kullanılan ekipmanların satın alma maliyetleri
(Purchasing costs of equipment used in the indirect synthesis method)

Ekipmanlar	Özellikler	Maliyet (\$)
1. Distilasyon kolonu	Kolon hacmi = 0,28 m ³	14.000
1. Distilasyon kolonu	Kolon hacmi = 0,91 m ³	52.000
Metanol Depolama Tankı	Tank hacmi = 15,9 m ³	425.000
DME Depolama Tankı	Tank hacmi = 11,3 m ³	97.000
1. Küresel vana	Vana çapı = 0,45 cm	1.000
2. Küresel vana	Vana çapı = 1,34 cm	1.000
PFR Reaktör	Reaktör hacmi = 34 m ³	115.000
Pompa	Pompa gücü = 8,07 kW	73.000
1. Isı Değiştirici	Isı transferi alanı = 53,2 m ²	258.000
2. Isı Değiştirici	Isı transferi alanı = 1,89 m ²	17.000
1. Soğutucu	Isı transferi alanı = 3,35 m ²	25.000
2. Soğutucu	Isı transferi alanı = 15,13 m ²	61.000
Listelenmeyen ekipmanlar		285.000
Toplam Ekipman Maliyeti		1.423.000



DÖKÜM MAKİNELERİNDE EKED PROSEDÜRÜ UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

Kerem TOPAL^{1*}, Müge ENSARİ ÖZAY¹, Onur ŞAHİN¹

¹ Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kilitleme ve Etiketleme,
Makine Emniyeti,
Enerji İzolasyonu,
İş Güvenliği,
Metal Döküm.

Öz

Makinelere gerçekleştirilen bakım, ayarlama vb. operasyonlar sırasında makinelere tehlikeli enerjinin kontrolünün sağlanamaması sebepli istemsiz, beklenmeyen başlatmalar sonucu ciddi yaralanmalı iş kazalarının yaşandığını görmekteyiz. Bu riskin önüne geçilmesi amacıyla etiketleme ve kilitleme uygulamaları, makinelere gerçekleştirilecek operasyonlarda kullanılmalıdır. Bu çalışmanın amacı döküm sektöründe kullanılan makinelere gerçekleştirilen çalışmalarda istemsiz, beklenmeyen başlatma riskine karşı çalışmaların çeşidine, operasyonun sıklığına, makine içerisinde çalışma süresine, operasyondaki çalışan sayısına, tehlikeli enerji türlerine göre operasyonların incelenmesi ve operasyonlardaki enerji izolasyon noktalarının belirlenerek çalışmaların emniyetli bir şekilde yapılmasının sağlanmasıdır. Bu çalışma ile gerçekleştirilen operasyonların değerlendirileceği bir EKED (Etiketle, Kilitle, Emniyete al, Dene) risk değerlendirmesi sistemi geliştirilmiştir. Araştırma sonucu tespit edilen bulgulara istinaden makinelere operasyonlarda vardiya süresince rutin, tekrarlanan, kısa süreli ve/veya enerji ihtiyacı olan çalışmalarda etiketleme ve kilitleme uygulamalarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak makinelere operasyonlarda etiketleme ve kilitleme uygulamalarının kullanılmaması riskinin önüne geçilebilmesi için operasyonlarda tam veya kısmi etiketleme ve kilitleme uygulamalarının kullanılmasının sağlanması ve bir EKED risk değerlendirmesi sisteminin oluşturulması önerilmiştir.

EXAMINATION OF LOTOTO PROCEDURE APPLICATIONS IN CASTING MACHINES

Keywords

Lockout and Tagout,
Machinery Safety,
Energy Isolation,
Occupational Safety,
Metal Casting.

Abstract

We see that serious work accidents with injuries occur as a result of unintentional, unexpected starts due to failure to control the hazardous energy in the machines during operations such as maintenance, adjustment, etc. performed on the machines. In order to prevent this risk, tagging and locking applications should be used in operations to be performed on the machines. The aim of this study is to examine the operations according to the type of work, the frequency of the operation, the working time in the machine, the number of employees in the operation, the dangerous energy types against the risk of involuntary start-up in the works in the casting machines and to determine the energy isolation points in the operations and to ensure that the works are carried out safely. A LOTOTO (Lock out, Tag out, Try out) risk assessment system has been developed to evaluate the operations performed with this study. As a result of the research, it has been seen that tagging and locking applications differ in routine, repetitive, short-term and/or energy demanding operations during shifts in machine operations. In order to prevent the risk of not using lockout and tagout practices in operations on machines, it is recommended to ensure that full or partial lockout and tagout practices are used in operations and to establish a LOTOTO risk assessment system.

Alıntı / Cite

TOPAL, K., ENSARİ ÖZAY, M., ŞAHİN O., (2025). Döküm Makinelerinde EKED Prosedürü Uygulamalarının İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 353-368.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K. Topal / 0000-0002-1015-7277
M. Ensari Özay / 0000-0002-4785-5503
O. Şahin / 0000-0003-0712-2978

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	12.09.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	27.01.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	02.02.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: kerem.topal98@gmail.com

EXAMINATION OF LOTOTO PROCEDURE APPLICATIONS IN CASTING MACHINES

Kerem TOPAL^{1†}, Muge ENSARI OZAY¹, Onur SAHIN¹

¹ Uskudar University, Institute of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety, Istanbul, Türkiye

Highlights

- Work accidents occur as a result of the involuntary initiation of dangerous energy in machines.
- The aim is to examine the works against the risk of involuntary start-up in the works on the machines and to work safely.
- A LOTOTO risk assessment system has been developed to evaluate the operations performed with this study.
- In order to prevent the risk of involuntary startup in machines, LOTOTO applications should be used.

Purpose and Scope

As a result of involuntary and unexpected starts in the machines, occupational accidents occur due to the failure to control the dangerous energy. Locking and tagging applications should be applied according to the operations in the machines in order to avoid occupational accidents.

Design/methodology/approach

Various operations performed on casting machines were examined within the scope of LOTOTO procedure according to TS EN ISO 14118 Machinery Safety – Unexpected Start-Up Prevention Standard and OSHA 1910.147 The Control of Hazardous Energy (Locking/Tagging) Directive. Following the examination of the operations performed on the casting machines, a risk assessment was carried out on the LOTOTO procedure that the employees should apply before starting the operation. The purpose of the risk assessment is how the LOTOTO procedure should be applied, taking into account the frequency of some operations performed on the machines, the duration of their stay in the machine, the number of employees in the operation, the avoidance of the personnel inside the machine as a result of a possible involuntary, unexpected start-up, and the severity of injury as a result of a possible work accident. Since a risk score is determined using numerical values in the LOTOTO risk assessment study, the LOTOTO risk assessment method can be classified among the quantitative risk assessment methods.

Findings

Based on the findings obtained as a result of the research, it has been observed that lockout and tagout applications differ in routine, iv repetitive, short-term and/or energy demanding operations during the shift in machine operations. As a result, in order to prevent the risk of not using lockout and tagout applications in operations on machines, it is recommended to ensure that full or partial lockout and tagout applications are used in operations and to establish a LOTOTO (Lock out, Tag out, Try out) risk assessment system. Operations performed on casting machines were examined in line with the danger of involuntary, unexpected start-up of the dangerous energy in the machine, and LOTOTO scores were created for each operation by evaluating the operations with the LOTOTO risk assessment created. In line with the scores, it has been stated that full LOTOTO can be applied for operations with a LOTOTO score of 10 and above, and partial LOTOTO can be applied for operations with a LOTOTO score of less than 10. After the LOTOTO risk assessment score was given to 44 different operations, the risk level was ranked from highest to lowest.

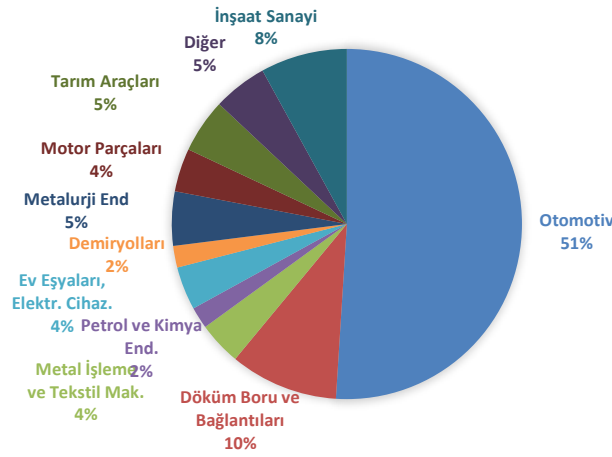
Originality

Various operations performed on casting machines have been examined within the scope of LOTOTO procedure and it has been stated that full and partial LOTOTO applications can be made in order to carry out safe works.

[†] Corresponding author: kerem.topal98@gmail.com

1. Giriş (Introduction)

Metallere şekil vermenin birçok yöntemi vardır. Makinelerle işleme, dövme, presleme, kaynak vb. şekillendirme yöntemlerinin haricinde bir başka yöntem de döküm yapmaktır. Eritilmiş malzemenin bir kalıba dökülerek katılaştırıldığı operasyona döküm denir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Döküm, sıvı halde olan erimiş metalin silis kumundan yapılan bir kalıbın içerisine döküldüğü ve kalıp boşluğuna dolan erimiş metalin katılaşmaya bırakıldığı bir üretim prosesidir (Şahin, 2022). Dökümcülük bir 4D sanayisidir. “Dirty” yani kirli, “Dusty” yani tozlu, “Difficult” yani zorlu, “Dangerous” yani tehlikeli tanımları döküm sektörüne anımsatan ifadelerdir (Günay, 2012). Döküm endüstrisi, tarım, madencilik ve imalat endüstrilerinin yanı sıra diğer endüstrilerde de yaygın olarak kullanılan ürünler sağlar. Son zamanlarda, yıllık üretimi milyon tonu aşan birçok döküm şirketi bulunmaktadır. Bu endüstrinin dünyaya katkısı birçok ekonomi için hayati ve kritik öneme sahiptir (Fore, 2010). Metal döküm sektörü ürünü kullanarak üretim yapan sanayiler; otomotiv, savunma, otomasyon (robot), tarım, çelik, havacılık, raylı taşımacılık vb. sektörler örnek olarak verilebilir (Tüdöksad, 2022). Şekil 1’de Türk Döküm Sektörü demir bazlı ürünlerin pazar dağılımı belirtilmiştir. Dünya döküm üretimi sıralamasında Türkiye 9. sırada (AFS, 2021), Avrupa’da ise 2. sırada yer almaktadır (CAEF, 2019).



Şekil 1. Türk Döküm Sektörü Demir Bazlı Ürünlerin Pazar Dağılımı (Günay, 2016)
(Market Distribution of Iron Based Products in Turkish Casting Industry)

Döküm işlemi altı temel unsurdan oluşmaktadır diyebiliriz. Bunlar sırasıyla kalıp boşluğunun oluşturulması, metalin ergitilmesi, sıvı metalin kalıba dökülmesi, sıvı metalin katılaşması, parça çapaklarının temizlenmesi ve son kontrol işlemleri olarak belirtebiliriz. Model yapımı gerçekleştirilerek modele göre kalıplar oluşturulur, döküm boşluğunun oluşturulabilmesi için maça yapılır ve oluşturulan kalıpların içerisine maça yerleştirilir, ergitimi sonucu elde edilen sıvı metal kalıbın içerisine dökülür ve döküm operasyonu gerçekleşir. Sıvı metalin katılaşmasının ardından döküm parça kalıptan çıkarılır, eleme, mıknaatısla ayırma vb. temizleme operasyonlarının ardından ürün elde edilir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Döküm, üretiminin çeşitleri, boyutları, kalitesi, kullanım alanları ve ürün verdiği sektör çeşitliliği bakımından imalat sanayiinin temel endüstrilerinden biri konumundadır. Bu sebeple döküm, metallere en yüksek katma değer sağlayan üretim metodu olarak ön plana çıkmaktadır. Döküm sektörünün önemi ve vazgeçilmezliğinin yanında içerisinde barındırdığı iş sağlığı ve güvenliği problemleri de bir o kadar önemli, göz ardı edilmemesi ve etkili önlemler ile çalışanların sağlığının korunması gereken bir sektördür (Şahin, 2020).

1 Ekim 2020 – 30 Eylül 2021 tarihleri arasında tüm endüstrilerde yapılan teftişlerin sonucunda en sık alıntılanan 10 standart listesi Amerika Birleşik Devletleri İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi tarafından yayınlanmıştır (OSHA, 2021). Yayınlanan listeye göre 2021 mali yılı için genel endüstride en çok ihlal edilen 7. konunun OSHA 1910.147 Tehlikeli Enerji Kontrolü (Kilitleme/Etiketleme) Direktifi olduğu belirtilmiştir (OSHA, 2021). 2021 mali yılında OSHA tarafından dökümhanelerde gerçekleştirilen 46 denetim sonucunda toplam 32 standart referans gösterilerek 168 alıntı ile ihlaller belirtilmiştir (OSHA, 2021). Belirtilen ihlaller içerisinde toplamda 21 alıntı yapılan ve en çok alıntı olan “tehlikeli enerjinin kontrolü (kilitleme/etiketleme)” konusudur (OSHA, 2021). 21 alıntı, toplam 14 denetim sonucunda oluşmuştur (OSHA, 2021). Yapılan denetimler sonucu dökümhanelere kesilen 1 164 690 \$ cezanın en büyük payını 327 743 \$ ile “tehlikeli enerjinin kontrolü (kilitleme/etiketleme)” ihlalleri %28 oranla oluşturmaktadır (OSHA, 2021).

Bakım veya servis operasyonları esnasında kilitleme – etiketleme faaliyetleri ürün ya da ekipmanın çalıştırılması ve enerji verilmesi durumunda meydana gelebilecek tehlikeli olay ve uygulamalardan çalışanların korunması için bir ön koşuldur ve bu kapsamda iş yerlerinde bir kilitleme – etiketleme talimatının oluşturulması gerekmektedir

(Kalyoncu, 2021).

EUROSTAT (European Community Statistical Office - Avrupa Birliği İstatistik Kurumu) istatistiklerine göre iş kazalarının % 15-20'si, ölümcül 50 kazalarının da %10-15'i bakım/onarım çalışmalarında yaşanmaktadır. OSHA her yıl en sık karşılaşılan ilk 10 ihlalin listesini yayınlamaktadır. Kilitleme ve etiketleme uygulamasının ihlali son 15 yıldır sürekli bu listede yer almaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere iş yerlerinde EKED prosedürünün uygulanması konusunda zorluklar yaşanmaktadır (Güvenli EKED, 2023).



Şekil 2. EKED Prosedüründe Kullanılan Asma Kilit ve Bilgilendirme Etiketi (Güvenli EKED, 2023)
(Padlock and Information Label Used in LOTOTO Procedure)

Bu çalışmada, çok tehlikeli sınıfta yer alan bir demir dökümhanesi ve işleme merkezinde bulunan çeşitli makinelerin kullanımı sırasındaki etiketleme ve kilitleme prosedürleri incelenmiştir. Makine enerji izolasyonunda yalnızca enerjiyi kesmek yeterli değildir, makine içerisinde yer alan artık enerji de boşaltılarak, tam anlamıyla bir izolasyon yapılmalıdır. Şekil 2’de belirtilen asma kilit ve bilgilendirme etiketleri bireysel olarak enerji izolasyon noktalarına asılmalıdır. Bu çalışmada, makinelerde gerçekleştirilen üretim, bakım, onarım, ayarlama, temizlik çalışmaları gibi operasyon çeşitleri incelenmiştir. İnceleme, OSHA 1910.147 Direktifi ve TS EN ISO 14118 Standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan incelemelerin ardından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen operasyonlara göre kilitleme ve etiketleme uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi ve çalışmaların daha emniyetli yapılabilmesi için bir EKED risk değerlendirmesi sistemi oluşturulmuştur. Bu çalışma, döküm sektöründeki makinelere yoğunlaşmış olsa da, sanayide kullanılan çoğu makinede, etiketleme ve kilitleme prosedürlerinin uygulanabilmesi, emniyetli çalışmaların gerçekleştirilebilmesi ve iş kazalarının önüne geçilebilmesi için yol gösterici bir rehber olabileceği öngörülmektedir, elde edilen sonuçlara göre öneriler de bulunulmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Etiketleme ve kilitleme uygulamalarında izole edilecek enerji türüne ve güç noktasındaki enerji açma – kapatma ekipmanına göre kullanılacak EKED ekipmanları değişiklikler gösterebilir. Ancak her EKED operasyonu için değişmez iki ekipman asma kilit ve bilgilendirme etiketidir (Taşçı ve Yağız, 2023). Makinenin bir bölgesinin enerji izolasyonu, makinenin diğer bölümlerinin çalışmasından dolayı bir tehlike oluşturmamalıdır. Makine enerji izolasyonu cihazının konumu, müdahalenin yapıldığı yerde veya erişim yolu üzerinde olmalıdır. Makine enerji izolasyonu sırasında, örneğin makinenin bir aksamının tuttuğu bir parça varsa, makine yazılım bilgilerini korumak veya aydınlatma sağlamak için belirli devrelerin güç kaynaklarına bağlı kalınması gerektiğinde, operatörlerin emniyetinin sağlanması için ek araçlar (örneğin kalıcı uyarı etiketleri) sağlanmalıdır (TS EN ISO 14118, 2018). Makine enerji izolasyonu sırasında makinedeki depolanan enerjiyi dağıtma araçları, hareketli parçaların kinetik enerjisini durdurması için frenleri, elektrik kondansatörlerini boşaltmak için ilgili devreleri, akışkan akümülatörlerin basıncını azaltmak için valfleri veya benzer cihazları içerebilir. Makineye müdahale edilmesi sırasında makinenin ilgili aksamında enerji olmadığını doğrulamak için sabit cihazlar (basınç ölçerler) veya test noktaları sağlanmış olmalıdır (TS EN ISO 14118, 2018).

OSHA her yıl en sık karşılaşılan ilk 10 ihlalin listesini yayınlamaktadır. Kilitleme ve etiketleme uygulamasının ihlali son 15 yıldır sürekli bu listede yer almaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere iş yerlerinde EKED prosedürünün uygulanması konusunda zorluklar yaşanmaktadır (Güvenli EKED, 2023). Çalışanlar kilitleme ve etiketleme operasyonunu acele ederek yapması, operasyonu hatalı yapma oranını 9 kat daha fazla artırmaktadır. Gerçekleştirilen 1000 kilitleme ve etiketleme operasyonunda acele edilerek yapılması durumunda ortalama 81 yanlış kilitleme ve etiketleme yapılmışken, acele edilmediğinde ortalama 9 yanlış kilitleme ve etiketleme operasyonu yapılmıştır. Eğer yapılması gereken operasyon aciliyet içeriyorsa ve kilitleme/etiketleme operasyonu acele yapıldıysa başka biri tarafından operasyonun gözden geçirilmesinde fayda olacaktır. Çünkü EKED operasyonunun ikinci bir kişi tarafından kontrol edilmesi sonucunda hatalı kilitleme/etiketleme sayısının ortalama binde 3 olduğu görülmüştür (Tj, 2020).

Makinelerde gerçekleştirilen bazı operasyonlarda, operatörlerin her zaman yaptığımız iş diyerek güvensiz davranışlarda bulunması, EKED prosedürünü uygulamaması sebebiyle iş kazaları yaşanmaktadır. Yaşanan iş kazalarını incelediğimizde genellikle temizlik, bakım, onarım vb. operasyonlar için makinenin tehlikeli bölgesinde çalışanların olduğundan habersiz, yapılan çalışmanın bitirilip tehlikeli alanda kimsenin olmadığı düşünülüp veya aralarında anlaşmalarını sanarak makineye kumanda panosundan hareket verilmesi sonucu tehlike bölgesinde bulunan çalışanların hareketli aksamlara dolanarak, sıkışarak, ezilerek, kapılarak vb. ciddi yaralanmalarla, ölümlerle sonuçlanan iş kazaları olduğunu görmekteyiz. Oysa ki çalışanlar, EKED prosedürünü uygulayarak, makinelerdeki tehlikeli enerjilerin kontrolünü sağlayıp emniyetli bir şekilde çalışabilirler (Tezcan, 2023).

Makinelerin bakım veya muayene sırasında güvenli bir şekilde enerjisinin kesilmesini sağlamak, böylece kazara çalıştırma riskini en aza indirmek ve genel iş yeri güvenliğini artırmak için kilitleme-etiketleme prosedürleri de dahil olmak üzere güvenlik protokollerine sıkı sıkıya bağlı kalmak hayati önem taşır (Yalçın, 2024). Etiketleme ve Kilitleme prosedürü basit ama önemli bir güvenlik sistemidir. Pahalı sensör ve alarm sistemlerinden daha az maliyette olması ek avantaj sağlamakla birlikte prosedürün doğru uygulandığında ortam emniyetinden emin olduğu bilinmektedir. Robotların çalışma alanına yapılan kısa süreli giriş ve çıkışlarda, emniyet kapısının çalışanın üstüne kapanmasını önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır. Örneğin kapı emniyet siviğine EKED asma kilidinin asılması ve etiketleme, kilitleme uygulanması ile birlikte kapının çalışanın üstüne kapanması önenebilir (Küçüksavcı, 2021). EKED standardının yürürlüğe girmeden önce ki on yılda, 100.000 çalışan başına makineyle ilgili yaralanma sayısının her yıl %0,1 azaldığını, makineyle ilgili olmayan yaralanmaların ise %2,8 azaldığını göstermiştir. Ancak EKED standardının uygulanmasından sonra ki dokuz yılda makineyle ilgili yaralanma oranları daha da önemli ölçüde azalmış, yılda ortalama %3,5 azalırken, makineyle ilgili olmayan yaralanmalar sadece %1,9 azalmıştır. Karşılaştırma daha sonra EKED standardının uygulanmasının makineyle ilgili yaralanmaları azaltmada bir etkisi olduğunu göstermektedir (Rocha, 2023).

Basmalı butonlar, emniyet siviçleri vb. diğer kontrol devresi tipi ekipmanları enerji izolasyon noktaları değildir. Bazı emniyet ekipmanlarının makinelerde yapılacak bakım, servis çalışması gibi operasyonlar için çalışanları tehlikeli enerjiden yeterince korumadığına dikkat edilmelidir. Örneğin makinelerde bulunan ışık perdeleri yalnızca normal üretim modu sırasında operatörlerin vücut veya uzuvlarının makinenin herhangi bir tehlikeli bölgesine girmeden önce makineyi durdurma görevi vardır. Bakım, servis faaliyeti, temizlik vb. çalışmalarda ışık perdelerine güvenilmesi uygun değildir. Makinenin resetlenip istemsiz, beklenmeyen başlatımı sonucunda tehlikeli enerjinin açığa çıkmasıyla birlikte iş kazaları yaşanabilir. Ancak normal üretim operasyonlarında gerçekleştirilen rutin, tekrarlanan ve üretimin doğasında olan, üretim için gereken bazı küçük operasyonlarda çalışanları tehlikeli enerjiye, beklenmeyen başlatmaya karşı korumak için alınan emniyet tedbirleri (emniyet siviçli muhafazalar, fensler, varlık algılama ekipmanları, operatörün özel kontrolü altındaki çeşitli ekipmanlar) doğrultusunda, bu kısa ve küçük operasyonlar EKED prosedürü kapsamına dahil edilmeyebilir (OSHA, 2011).

Makinelerde yapılan servis veya bakım çalışmalarında test etmek veya yeniden konumlandırmak gibi enerji verme ihtiyacı doğan operasyonların yapılması gerektiğinde şu adımlar izlenmelidir;

1. Makine içerisinde servis veya bakım için kullanılan alet ve ekipmanlar kaldırılarak makine içi toparlanmalıdır,
2. Makine içerisinde tehlikeli alanda kimse bulunmamalıdır, makine çalışma alanından personeller uzaklaşmalıdır,
3. Makine enerji izolasyon bölgesindeki kilitleme ve etiketleme ekipmanları kaldırılmalıdır,
4. Makine test edilirken veya konumlandırılırken makineye enerji verilmesi sırasında makine çevresinde çalışan etkilenen personellerin korunması ve emniyeti sağlanmalıdır,
5. Operasyonların ardından makinede ilave servis veya bakım ihtiyacı var ise makinenin enerjisi kesilerek, enerji izolasyon bölgesinden tekrar kilitleme ve etiketleme ekipmanları takılıp EKED prosedürü uygulanarak makine içerisinde çalışmaya devam edilmelidir (OSHA, 2011).

Makinelerde yapılan her türlü operasyonda makinenin beklenmedik şekilde çalışmasından kaynaklı iş kazalarını önlemek için sesli ve/veya görsel bir uyarı sinyali ve makinenin gecikmeli başlatımı sağlanmalıdır. Uyarı sinyali, makine içerisinde tehlikeli bölgede çalışan operatörlerin makinenin çalışmaya başlamadan önce tehlikeli alanı terk etmelerine veya örneğin bir acil durdurma teçhizatına erişerek makinenin çalışmasını engellemeye yetecek kadar uzun olmalıdır (TS EN ISO 14118, 2018).

Kilitleme ve etiketleme uygulamasının bir ana enerji kesici, güç devresinden yapılması, bir buton (acil durdurma butonu vb.) üzerinden, kontrol devresi üzerinden yapılmasına göre daha emniyetlidir. Çünkü kontrol devresi üzerinden yapılan kilitleme ve etiketlemelerde aşağıdaki beklenmeyen durumlar yaşanabilir. Yine aşağıdaki benzer durumlar makine muhafazaları, tehlikeli alanlara giriş kapıları gibi bölgelerde bulunan limit emniyet siviçlerinde de yaşanabilir.

1. Başka bir çalışan, makine motor kontrolörünün içerisine girebilir ve manuel olarak röleyi kapatabilir,
2. Buton arızası yaşanabilir,
3. Röle veya motor kontrolöründe arıza olabilir (yay arızası, kontak yapışması gibi),
4. Gevşek bir kablo, kanala temas edebilir,
5. Hasarlı bir kanal içerisindeki iki kablo kısa devre yapabilir (örneğin titreşim sebebiyle kabloların sürtünmesi ve kablo yalıtkanının aşınması sonucu kısa devre oluşarak, kontrol devresinde köprü oluşabilir),
6. Su, kir, metal parçacıklar veya diğer iletken yabancı maddeler, kontrol devresi içerisine girerek akım akışına izin verebilir (OSHA, 2011).

İş yerlerinde tehlikeli enerjinin kontrolünü sağlamak amacıyla oluşturulması gereken EKED prosedürleri şu 8 maddeyi içermelidir;

1. Tehlikeli enerjinin bulunduğu ortamda çalışan personellerin, etkilenen personellerin belirlenmesi ve isimleri,
2. İşletmede bulunan enerji türleri ve enerjilerin büyüklükleri,
3. Tehlikeli enerjinin yol açacağı tehlikeler,
4. Tehlikeli enerjiyi kontrol etme yöntemleri,
5. Makine ve ekipmanlardaki enerji kaynaklarının kontrollerinin türleri ve lokasyonları,
6. Kilitleme ve etiketleme uygulamasında kullanılacak enerji izolasyon ekipmanlarının çeşitleri ve yerleri,
7. Depolanan enerji türleri, artık enerji durumu, artık enerjinin izolasyonu ve sıfır enerjinin sağlanması için yöntemler,
8. Makine ve ekipmanlardaki enerji izolasyonlarının doğrulama yöntemleri (OSHA, 2011).

Literatürde genellikle etiketleme ve kilitleme prosedürlerinin genel uygulamalarına değinilmiştir. Bu çalışma ile etiketleme ve kilitleme uygulamasının vardiya süresince kısa süreli, rutin, tekrarlanabilen ve/veya enerji ile çalışma ihtiyacının olduğu bakım, arıza tespiti, ayarlama gibi makinelerde gerçekleştirilen çeşitli operasyonlarda nasıl emniyete alma işleminin gerçekleştirilebileceği, kısmi veya tam EKED uygulaması sağlanarak emniyetli çalışmaların yapılabilmesi ele alınmış ve bu yönde literatüre katkı yapılması amaçlanmıştır.

İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği'ne göre "işveren; çalışma ortamının ve çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlama, sürdürme ve geliştirme amacı ile iş sağlığı ve güvenliği yönünden risk değerlendirmesi yapar veya yaptırır. Madde 5 (1)". İşyerlerinde iş sağlığı ve güvenliği yönünden yapılan risk değerlendirmelerinin birçoğu L Tipi Matris risk değerlendirmesi metodolojisi kullanılarak yapılmaktadır. Bu risk değerlendirmesi yöntemi; kullanımı basit, az parametrelili ve çoğu iş koluna uyumlu olan yöntemdir. Ancak ulusal ve uluslararası mevzuatlarda da belirtildiği üzere bazı risk grupları özelinde spesifik risk değerlendirmesi yöntemlerine de ihtiyaç olduğu bir gerçektir. Risk gruplarının özelinde mevcut var olan spesifik risk değerlendirmesi yöntemleri, ilgili risklerin tespit edilmesi ve risklere karşı aksiyonların belirlenerek önlemlerin alınmasında daha etkilidir, bazı risklerin gözden kaçmamasını sağlamaktadır.

Makinelerde risk değerlendirmesi çalışmaları için TS EN ISO 12100:2011 standardı bulunmaktadır. Kimyasalların kontrollü kullanılabilmesi için kimyasal maruziyet risk değerlendirmesi yöntemi kullanılmaktadır (International Chemical Control Toolkit) (ILO, 2006). Engelli çalışanlar ile ilgili iş yerlerinde risk değerlendirmesi yapılabilmesi için ayrıca risk değerlendirmesi yöntemi kullanılmaktadır (Garipoğlu, 2021).

Kalyoncu, 2021 yılında yapmış olduğu çalışmada oluklu mukavva üretim makinelerinde tehlikeli enerjinin yönetimi konusunda bakım çalışmalarında tehlikeli enerji kaynaklarının belirlenmesi ve izole edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmada tehlikeli enerji kaynaklarının izole edilmesi sırasında tam ve kısmi EKED uygulama çalışmalarının kullanılarak EKED prosedürü çalışmaları sürdürülebilir. Literatürde tehlikeli enerji kaynaklarının belirlenmesi ve EKED prosedürünün nasıl uygulanması gerektiği hakkında çalışmaların olduğunu yukarıda bahsedilen örneklerle görmekteyiz ancak EKED prosedürünün bir metodolojiye dayanarak değerlendirme yapıldıktan sonra uygulandığı görülmemiştir. Bu çalışma ile EKED risk değerlendirmesi oluşturularak EKED prosedürü uygulamalarında daha sistematik bir yol izlenmesi, makinelerdeki tehlikeli enerji hızlarının kısıtlanarak, enerji altında emniyetli çalışılması, vardiya süresince rutin ve tekrarlanan işlerde EKED prosedürünün nasıl uygulanabileceği ve makinenin nasıl emniyetli duruma getirilip çalışmanın sürdürülebileceği amaçlanmıştır. Bu husus doğrultusunda TS EN ISO 12100 ve TS EN ISO 14118 standartları referans alınarak Tablo 1 oluşturulmuştur. Makinelerdeki operasyonların içeriğine göre değerlendirme yapılarak Tablo 1'de belirtilen parametrelere göre operasyonel bazlı risk puanları belirlenmektedir.

Bu çalışmada; endüksiyon ocağında refrakter bozma/yapma çalışması ortalama haftada bir gerçekleştirildiğinden makine ve operasyon EKED prosedürü kapsamında incelenmiştir. Otomatik yatay kalıplama hattının soğutma tüneline derece devrilmesine müdahale çalışması yılda birkaç defa olabilen bir arıza bakımudur, bu arızanın

bildirimi ile operasyon EKED prosedürü kapsamında incelenmiştir. Maça pres makinesinde maça sandığı nozul temizleme operasyonu yaklaşık 1 saat içerisinde bir veya iki defa yapılan bir operasyon olduğundan örnek bir maça makinesi seçilerek operasyon EKED prosedürü kapsamında incelenmiştir. Askılı temizleme/kumlama makinesinde helezon değişimi çalışması birkaç yılda bir yapılan operasyon olduğundan bakım planı doğrultusunda operasyon inceleme planlaması yapılmış ve EKED prosedürü kapsamında çalışma incelenmiştir. İşleme CNC freze tezgahında üretim metodu ayarlama çalışması haftada bir veya birkaç defa yapılan bir çalışma olduğundan metot ekibiyle yapılan planlama doğrultusunda operasyon EKED prosedürü kapsamında incelenmiştir. Kızgın su kazanında yıllık periyodik bakım çalışması yılda bir gerçekleştirilen bir operasyon olduğundan yıllık bakım çalışmaları sırasında operasyon EKED prosedürü kapsamında incelenmiştir.

Fiziksel, kimyasal, biyolojik, psikososyal, ergonomik, makine, patlama, alt işveren, engelli personeller vb. özelinde oluşturulan spesifik risk değerlendirmelerine ek olarak bu çalışmada makinelerde tehlikeli enerjinin kontrolü, beklenmedik, istemsiz başlatma konusu özelinde bir EKED risk değerlendirmesi oluşturulmuştur. Bu risk değerlendirmesi makinelerde yapılan operasyonlarda tehlikeli enerji sebebiyle istemsiz, beklenmeyen başlatma sebepli iş kazalarının yaşanmaması ve bu sebeple olası yaşanabilecek kazalar oluşmadan önlem alınabilmesi yönünde olumlu fayda sağlayacaktır. EKED risk değerlendirmesi çalışmasında sayısal değerler kullanılarak bir risk puanı belirlendiği için EKED risk değerlendirmesi yöntemi, kantitatif (nicel) risk değerlendirmesi yöntemleri arasında sınıflandırılabilir.

Ulusal ve uluslararası mevzuatlarda da değinilen risk değerlendirmesi çalışmalarının yapılması, özel risk gruplarına özgü spesifik risk değerlendirmesi yöntemlerinin kullanılması ve makinelerde gerçekleştirilen operasyonlarda tehlikeli enerjilerin istemsiz, beklenmeyen başlatımı sebebiyle iş kazalarının yaşanmaması için önlemlerin alınması gerektiği belirtilmektedir. Bu durum doğrultusunda EKED prosedürü çalışmalarının yürütülmesi, tehlikeli enerjilerin izolasyonlarının sağlanması, enerji ihtiyacının olduğu operasyonlarda ise gerekli emniyet tedbirlerinin alınarak çalışmaların yürütülmesi amacıyla bir EKED risk değerlendirmesi yönteminin kullanılması ve gerçekleştirilen operasyonlarda tam veya kısmi EKED uygulamasının yapılması için değerlendirme yapılabilmesinin önem arz ettiği görülmektedir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Döküm sektöründe kullanılan makinelerde yapılan operasyonlarda (üretim, bakım, temizlik, servis çalışması vb.) uygulanan kilitleme ve etiketleme uygulamaları birçok farklı makinede ve farklı enerji türlerinde (elektrik, hidrolik, pnömatik, doğalgaz, kızgın su) gözlemlenmiştir. Döküm makinelerinde yapılan operasyonların incelenmesinin ardından çalışanların operasyona başlamadan önce uygulamaları gereken EKED prosedürü hakkında bir risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Risk değerlendirmesinin amacı makinelerde gerçekleştirilen bazı operasyonların gerçekleştirilme sıklıkları, makine içerisinde kalma süreleri, operasyondaki çalışan sayıları, olası bir istemsiz, beklenmeyen başlatma sonucu makine içerisindeki personelin tehlikeli bölgeden kaçınabilmesi ve olası bir iş kazası sonucu yaralanma şiddetleri dikkate alınarak EKED prosedürünün nasıl uygulanması gerektiğidir.

OSHA 1910.147 ve TS EN ISO 14118:2018 standartlarında da belirtildiği üzere rutin, kısa süreli ve vardiya süresince sık tekrarlanan operasyonlar ile enerjiyle çalışma ihtiyacının olduğu operasyonlar EKED prosedürü kapsamında istisnai kabul edilebilmektedir. Bu istisnai durumların emniyetli bir şekilde yapılabilmesi için operasyonun gerçekleştirileceği alanda ışık bariyeri, makine içi algılama emniyet sensörleri, kilitlemeli mod şalterleri ve çift el kumanda tertibatı vb. mevcut emniyet önlemleri olması gerekmektedir. Çalışmanın gerçekleştirildiği demir dökümhanesinde bulunan farklı makinelerde ve makinelerin istasyonlarında farklı operasyonlar incelenmiştir ve geliştirilen EKED risk değerlendirmesi kapsamında değerlendirmeleri yapılmıştır. EKED risk değerlendirmesi metodolojisinin 6 adet parametresi bulunmaktadır. Tablo 1’de belirtildiği gibi bu parametreler; sıklık, makine içerisinde kalma süresi, operasyondaki çalışan sayısı, kaçınma, şiddet ve vardiya süresince rutin ve tekrarlanan iş mi parametreleridir. Her bir parametre ayrı ayrı derecelendirilerek, puanları oluşturulmuştur. Makinelerde gerçekleştirilen operasyonlar ayrı ayrı incelenmiş ve her operasyona özgü EKED risk değerlendirmesi parametrelerine göre puanlamalar yapılmış ve belirlenen puanların toplamı neticesinde risk değerlendirmesi sonucu olarak makinede gerçekleştirilen operasyonda “kısmi EKED uygulaması” ya da “tam EKED uygulaması” yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 1. Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED (Etiketle- Kilitle - Emniyete Al -Dene) Risk Değerlendirmesi (LOTOTO (Lockout, Tagout, Tryout) Risk Assessment in Operations on Casting Machines)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED (Etiketle - Kilitle - Emniyete Al - Dene) Risk Değerlendirmesi											
EKED Puanı= "Sıklık + Makine İçerisinde Kalma Süresi + Operasyonlardaki Çalışan Sayısı + Kaçınma + Şiddet + Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?" parametrelerinin toplamıdır.											
Puan	Sıklık	Puan	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Puan	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Puan	Kaçınma	Puan	Şiddet	Puan	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
6	Birkaç saatte birkaç defa	6	8 saatten fazla	4	5 ve daha fazla kişi	3	İmkansız	4	Ölüm	-14	Evet
5	Günde bir veya birkaç defa	5	8 saat	3	3-4 kişi	2	Olası	3	Uzuv kaybı veya kalıcı hastalık	0	Hayır
4	Haftada bir veya birkaç defa	4	Birkaç saat	2	2 kişi	1	Yüksek ihtimal	2	Tıbbi tedavi gerektiren yaralanma		
3	Ayda bir veya birkaç defa	3	30 - 60 dakika arası	1	1 kişi			1	İlk yardım müdahaleli yaralanma		
2	Yılda bir veya birkaç defa	2	10 - 30 dakika arası								
1	Birkaç yılda bir	1	0 - 10 dakika arası								

Makinelerde gerçekleştirilen operasyonlara özgü EKED risk değerlendirmesi parametrelerine göre puanlamalar yapılmış ve belirlenen puanların toplamının ardından sonuç Tablo 2'de belirtildiği gibi 10 puan altı ise "kısmi EKED uygulaması" yapılır, sonuç 10 ve üzeri puan ise "tam EKED uygulaması" yapılması sonucuna varılır. "Vardiya süresince rutin ve tekrarlanan iş mi" parametresi yapılan operasyonun vardiya süresince kısa süreli, rutin, tekrarlanan ve proses gereği yapılması gereken bir operasyon olması ve/veya operasyon sırasında enerji ile çalışma ihtiyacının olması sebebiyle bu parametre oluşturulmuştur. Bu parametre neticesinde operasyon vardiya süresince rutin, tekrarlanan ve/veya operasyon sırasında enerji ihtiyacı olan bir iş ise risk değerlendirmesinde ilgili satıra 1 yazılır ve -14 puan sayılır, değil ise ilgili satıra 0 yazılır ve puan verilmez olarak belirleme yapılmıştır.

Makinelerde gerçekleştirilen operasyonlarda uygulanabilecek EKED uygulamasında eğer operasyon kısa süreli, rutin, tekrarlanan bir iş ya da enerji ile çalışma ihtiyacının olduğu bir iş ise kısmi EKED uygulaması, değil ise tam EKED uygulaması yapılmalıdır. EKED uygulaması ya tam olarak; sıfır enerji durumu sağlanarak enerji izolasyonunun sağlanması ya da kısmi olarak; enerji izolasyonu tam sağlanamamış ama operasyonun gerçekleştirileceği bölgede makine içi algılama emniyet sensörleri, kilitlemeli mod şalter, ışık bariyeri, kapı emniyet siviçleri gibi mühendislik önlemleri alınarak yapılabileceğinden iki adet sonuca varılmaktadır.

Tablo 2. Risk Değerlendirmesi Sonuç Tablosu (Risk Assessment Result Table)

Risk Değerlendirmesi Sonucu	
Kısmi EKED Uygulaması	10 puan altı
Tam EKED Uygulaması	10 ve üzeri puan

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Demir dökümhanesinde farklı bölümlerde farklı makinelerde gerçekleştirilen çeşitli operasyonların tehlikeli enerjinin istemsiz/beklenmeyen başlatma tehlikesi kapsamında incelenmesinin ardından aşağıdaki bulgulara rastlanmıştır;

4.1. Ergitme Bölümü Endüksiyon Ocağında Refrakter Bozma/Yapma Çalışması (Refractory Decomposition/Making Study in the Induction Furnace of the Melting Department)

Endüksiyon ocağında refrakter bozma/yapma operasyonunun gerçekleştirilme sebebi; ocak içerisinde ergitme işleminin gerçekleştirilmesi ve sıvı metalin bekletilmesi sebebiyle zamanla ocak iç astarının incelenmesi sonucu ocağın delinmesi vb. nedenlerle ocağa ve çevredeki diğer ekipmanlara zarar vermemesi, iş kazalarına sebep olmaması, çevre sorunlarına yol açmaması gibi olumsuz durumların yaşanmaması için periyodik aralıklarla endüksiyon ocaklarında gerçekleştirilen çalışmalardır.

Tablo 3. Endüksiyon Ocağında Refrakter Bozma/Yapma Çalışması – EKED Risk Değerlendirmesi
(Refractory Decay/Making Study in Induction Furnace – LOTOTO Risk Assessment)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED Risk Değerlendirmesi				
Makine	Yapılan operasyon	Mod	Tehlikeli enerji türleri	Mevcut önlemler
Endüksiyon ocağı	Refrakter bozma/yapma	Üretim	Elektrik, Hidrolik, Yer çekimi	Topraklama, Acil durdurma butonu

Sıklık	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Kaçınma	Şiddet	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
4	5	2	3	4	0

EKED Puanı	EKED Uygulaması
18	Tam EKED Uygulaması

Endüksiyon ocağında refrakter bozma/yapma çalışması için gerçekleştirilen EKED risk değerlendirmesinde Tablo 3’de belirtildiği gibi makinede belirtilen operasyon haftada bir veya birkaç defa yapıldığından sıklık puanı 4 olarak belirtilmiş ve operasyon süresince makine içerisinde 8 saat kaldığından 5 puan olarak belirtme yapılmıştır. Operasyonu 2 çalışan gerçekleştirmekte ve olası bir tehlikeli enerjinin istemsiz/beklenmeyen başlatımı sonucunda makine içerisindeki operatörün kaçınabilmesi neredeyse imkansızdır ve yaralanma şiddeti ölüm olabilir. Operasyon vardiya süresince rutin, kısa süreli, tekrarlanan bir iş olmadığından ve enerji ile çalışma ihtiyacı bulunmadığından bu çalışmada tam EKED uygulamasının yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3. Endüksiyon Ocağında Refrakter Bozma/Yapma Çalışması Sırasında EKED Uygulaması
(LOTOTO Application During Refractory Degrading/Making Study in Induction Furnace)

Refrakterciler, endüksiyon ocağının içerisine girip çalışmaya başlamadan önce elektrik bakım personeline bilgi vermişler ve elektrik bakım personeli ocak ana enerji şalterinden EKED uygulamasını gerçekleştirmiş ve deneme çalışmasını yapmıştır. Ardından ocak içerisindeki artık enerjiyi izole etmek ve makineyi sıfır enerji konumuna getirmek için topraklama şalterinden de kilitleme ve etiketleme uygulamasını elektrik bakım personeli gerçekleştirmiş ve grup kilitleme - etiketleme kutusuna anahtarlarını atmış ve kutuyu kapatarak kutu üzerine de kilitleme - etiketleme işlemini gerçekleştirmiştir. Refrakterciler de grup kilitleme - etiketleme kutusu üzerine EKED işlemini gerçekleştirmişler ve makinede çalışmışlardır. Endüksiyon ocağında refrakter bozma/yapma çalışması sırasında yukarıdaki Şekil 3’de görüldüğü gibi EKED uygulaması gerçekleştirilmiştir. Operasyonun tamamlanmasının ardından her operatör bireysel kilitleme - etiketleme ekipmanlarını grup EKED kutusu üzerinden kaldırmış ve elektrik bakım personeli etkilenebilecek çalışanlara haber verdikten sonra endüksiyon ocağını çalıştırmış ve üretim operatörüne teslim etmiştir.

4.2. Kalıplama Bölümü Otomatik Yatay Kalıplama Hattının Soğutma Tünelinde Derece Devrilmesine Müdahale Çalışması (Response Study for the Automatic Horizontal Molding Line in the Cooling Tunnel for Mold Tip-over of the Molding Department)

Döküm işleminin gerçekleştirilmesinin ardından kalıplar soğutma tünelinin içerisine vagonlar aracılığıyla girerek soğutulmaktadır. Vagonların yürüdüğü raylarda zaman zaman oluşabilen çapak vb. engeller sebebiyle vagonlar takılmakta ve dereceler devrilebilmekte, raydan çıkabilmektedir. Kalıplama hattının ilerleyebilmesi için devrilen dereceye müdahale edilmekte ve kalıplama hattı tekrardan otomatik moda çalıştırılmaktadır.

Tablo 4. Otomatik Yatay Kalıplama Hattının Soğutma Tünelinde Derece Devrilmesine Müdahale Çalışması – EKED Risk Değerlendirmesi (Response Study for the Automatic Horizontal Molding Line in the Cooling Tunnel for Mold Tip-over – LOTOTO Risk Assessment)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED Risk Değerlendirmesi				
Makine	Yapılan operasyon	Mod	Tehlikeli enerji türleri	Mevcut önlemler
Otomatik yatay kalıplama hattı	Soğutma tünelinde derece devrilmesine müdahale	Bakım	Mekanik, Elektrik, Hidrolik, Yer çekimi	Kapı emniyet sivici, Acil durdurma butonu, Emniyet fensi

Sıklık	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Kaçınma	Şiddet	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
2	4	2	3	4	0

EKED Puanı	EKED Uygulaması
15	Tam EKED Uygulaması

Otomatik yatay kalıplama hattının soğutma tünelinde derece devrilmesine müdahale çalışması için gerçekleştirilen EKED risk değerlendirmesinde Tablo 4’de belirtildiği gibi makinede belirtilen operasyon sıklığı yılda bir veya birkaç defa olduğundan 2 puan olarak belirtme yapılmıştır. Makine içerisinde kalma süresi birkaç saat sürdüğünden 4 puan, operasyondaki çalışan sayısı 2 olduğundan 2 puan olarak belirtme yapılmıştır. Çalışma süresince makinenin istemsiz/beklenmeyen başlatımı sonucunda operatörlerin kaçınabilmesi imkansızdır, yaralanma şiddeti ölüm olabilir. Operasyon vardiya süresince rutin, kısa süreli, tekrarlanan bir iş olmadığından ve enerji ile çalışma ihtiyacı bulunmadığından bu çalışmada tam EKED uygulamasının yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4. Otomatik Yatay Kalıplama Hattının Soğutma Tünelinde Derece Devrilmesine Müdahale Çalışması Sırasında EKED Uygulaması (LOTOTO Implementation During the Response Study for Mold Tilt in the Cooling Tunnel of the Automatic Horizontal Molding Line)

Soğutma tünelinde derece devrilmesine müdahale çalışmasına başlamadan önce Şekil 4’de görüldüğü gibi operatörler makine ana enerji kontrol ünitesinden kilitleme – etiketleme işlemini gerçekleştirmiş ve deneme çalışmasını yapmışlardır. Devrilen dereceyi soğutma tünelinden mobil vinç yardımıyla çıkardıktan sonra çalışma alanını kontrol etmişler ve etkilenebilecek çalışanlara haber verdikten sonra makine ana enerji şalteri üzerinden her personel bireysel kilitleme – etiketleme ekipmanını sökmüş ve kalıplama hattını tekrardan devreye almışlardır.

4.3. Maça Bölümü Maça Pres Makinesinde Maça Sandığı Nozul Temizleme Operasyonu (Core Box Nozzle Cleaning Operation in Core Press Machine of the Core Department)

Maça pres makinelerinde üretilecek olan maçanın geometrisini içerisindeki kalıpta bulunduran maça sandığı, alt ve üst sandık olarak iki ayrı parçadan oluşmaktadır. Üst maça sandığı üzerinde nozullar bulunmakta ve maça üretimi sırasında zaman zaman bu nozullarda kum birikmesi sebebiyle tıkanmalar yaşanmaktadır. Maça pres makinesi operatörü tarafından makine içerisine girilerek tıkanan nozullar şiş aracılığıyla açılmaktadır.

Tablo 5. Maça Pres Makinesinde Maça Sandığı Nozul Temizleme Operasyonu – EKED Risk Değerlendirmesi
(Core Chest Nozzle Cleaning Operation in Core Press Machine – LOTOTO Risk Assessment)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED Risk Değerlendirmesi				
Makine	Yapılan operasyon	Mod	Tehlikeli enerji türleri	Mevcut önlemler
Maça pres makinesi	Maça sandığı nozul temizliği	Üretim	Mekanik, Elektrik, Hidrolik, Pnömatik, Yer çekimi	Kapı emniyet sivici, Acil durdurma butonu, Makine içi algılama emniyet sensörleri, Işık bariyeri, Acil durdurma ipi

Sıklık	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Kaçınma	Şiddet	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
6	1	1	3	4	1

EKED Puanı	EKED Uygulaması
1	Kısmi EKED Uygulaması

Maça pres makinesinde maça sandığı nozul temizleme operasyonu için gerçekleştirilen EKED risk değerlendirmesinde Tablo 5’de belirtildiği gibi makinede operasyonun gerçekleştirilme sıklığı birkaç saatte birkaç defa olduğundan 6 puan olarak belirtme yapılmıştır. Operasyon süresince makine içerisinde kalma süresi ortalama 2 dakika olduğundan 1 puan olarak belirtme yapılmıştır. Operasyonu 1 operatör tek başına gerçekleştirebilmektedir Makinenin operasyon sırasında istemsiz/beklenmeyen başlatımı sonucunda operatörün kaçınabilmesi imkansızdır ve yaralanma şiddeti ölüm olabilir. Operasyon vardiya süresince rutin, kısa süreli, tekrarlanan bir iş olduğundan dolayı bu çalışmada makine içerisinin emniyete alınmasının ardından kısmi EKED uygulamasının yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5. Maça Pres Makinesinde Maça Sandığı Nozul Temizleme Operasyonu Sırasında EKED Uygulaması
(LOTOTO Application During the Core Chest Nozzle Cleaning Operation in the Core Press Machine)

Maça pres makinesi içerisinde üst maça sandığının nozullarını temizlemek için operasyona başlamadan önce Şekil 5’de görüldüğü gibi makine içerisine giriş kapısında bulunan emniyet sivicinin üzerine makine operatörü kilitleme ve etiketleme uygulamasını yapmış ve deneme işlemini gerçekleştirmiştir. Ardından makine içerisine girerek üst maça sandığı nozullarını temizlemiş ve makine içerisinden çıkmıştır, kapı emniyet sivici üzerinde bulunan EKED ekipmanlarını sökerek kapıyı kapatmış ve makineyi çalıştırarak operasyonu tamamlamıştır.

4.4. Tamamlama Bölümü Askılı Temizleme/Kumlama Makinesinde Helezon Değişimi Çalışması (Screw Change Study in the Suspended Cleaning/Sandblasting Machine of the Fetting Department)

Döküm parçaların temizlendiği askılı kumlama makinesinde döküm parçaların üzerine çelik bilyalar püskürtülerek temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Makinede kullanılan çelik bilyaların püskürtme sistemine tekrardan kazandırılabilmesi için elevatör ve helezonlardan yararlanılmaktadır. Kullanılan helezonlar bir süre sonra aşınmakta ve helezon değişim ihtiyacı olmaktadır.

Tablo 6. Askılı Temizleme/Kumlama Makinesinde Helezon Değişimi Çalışması – EKED Risk Değerlendirmesi (Screw Change Study in Suspended Cleaning/Sandblasting Machine – LOTOTO Risk Assessment)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED Risk Değerlendirmesi				
Makine	Yapılan operasyon	Mod	Tehlikeli enerji türleri	Mevcut önlemler
Askılı temizleme/kumlama makinesi	Helezon değişimi	Bakım	Mekanik, Elektrik, Yer çekimi	Kapı emniyet sivici, Acil durdurma butonu

Sıklık	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Kaçınma	Şiddet	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
1	5	3	3	4	0

EKED Puanı	EKED Uygulaması
16	Tam EKED Uygulaması

Askılı temizleme/kumlama makinesinde helezon değişimi çalışması için gerçekleştirilen EKED risk değerlendirmesinde Tablo 6'da belirtildiği gibi makinede operasyonun gerçekleştirilme sıklığı birkaç yılda bir olduğundan 1 puan olarak belirtilmiştir. Operasyon süresince makine içerisinde kalma süresi 8 saat olduğundan 5 puan verilmiştir. Operasyonda 3 bakımcı çalışmaktadır, makinenin istemsiz/beklenmeyen başlatılması sonucunda kaçınabilme imkansızdır ve yaralanma şiddeti ölüm olabilir. Operasyon vardiya süresince rutin, kısa süreli, tekrarlanan bir iş olmadığından ve enerji ile çalışma ihtiyacı bulunmadığından bu çalışmada tam EKED uygulamasının yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6. Askılı Temizleme/Kumlama Makinesinde Helezon Değişimi Çalışması Sırasında EKED Uygulaması (LOTOTO Application During the Screw Change Study in the Suspended Cleaning/Sandblasting Machine)

Makinede çalışmaya başlamadan önce Şekil 6'da görüldüğü gibi bakım operatörleri makine ana enerji panosu üzerindeki şalterden kilitleme – etiketleme işlemini gerçekleştirmiş ve deneme çalışmasını yapmışlardır. Daha sonra makinenin hasarlı helezonunun sökümünü gerçekleştirmiş ve yerine yeni helezonun montajını yapmışlar ve helezonun sabit muhafazasını takmışlardır. Çalışma alanını kontrol ettikten ve etkilenebilecek çalışanlara haber verdikten sonra ana enerji şalteri üzerindeki EKED ekipmanlarını bireysel olarak bakımcılar sökmüşler ve makineyi çalıştırarak operasyonu tamamlamışlardır.

4.5. İşleme Bölümü CNC Freze Tezgahında Üretim Metodu Ayarlama (Set-up) Çalışması (Production Method Adjustment (Set-up) Study on CNC Milling Machine of Machining Department)

CNC freze tezgahında işlenecek döküm parçanın hangi koordinatlarının işleneceği, ne kadar kesme yapılacağı vb. ayarlamaların yapılarak makineye metodun öğretildiği çalışmalar sırasında operatör, operasyonu yakından izleyebilmek için tezgah içerisine çok kısa sürelerle girebilmektedir.

Tablo 7. CNC Freze Tezgahında Üretim Metodu Ayarlama (Set-up) Çalışması – EKED Risk Değerlendirmesi
(Production Method Adjustment (Set-up) Study on CNC Milling Machine – LOTOTO Risk Assessment)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED Risk Değerlendirmesi				
Makine	Yapılan operasyon	Mod	Tehlikeli enerji türleri	Mevcut önlemler
CNC freze tezgâhı	Üretim metodu ayarlama (set-up)	Üretim	Mekanik, Elektrik, Hidrolik, Pnömatik, Yer çekimi	Kapı emniyet sivici, Acil durdurma butonu, Kilitlemeli mod şalteri

Sıklık	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Kaçınma	Şiddet	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
4	4	1	2	4	1

EKED Puanı	EKED Uygulaması
1	Kısmi EKED Uygulaması

CNC freze tezgahında üretim metodu ayarlama (set-up) çalışması için gerçekleştirilen EKED risk değerlendirmesinde Tablo 7’de belirtildiği gibi makinede operasyonun gerçekleştirilme sıklığı haftada bir veya birkaç defa olduğundan 4 puan olarak belirtilmiştir, operasyon süresince makine içerisinde kalma süresi birkaç saat olabildiğinden 4 puan olarak belirtilmiştir. Operasyondaki çalışan sayısı 1’dir. Makinenin istemsiz/beklenmeyen başlatılması sonucunda kaçınılma olasıdır ancak yaralanma şiddeti ölüm olabilir. Operasyon süresince enerji ile çalışma ihtiyacı bulunduğu için dolayı bu çalışmada kısmi EKED uygulamasının yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 7. CNC Freze Tezgahında Üretim Metodu Ayarlama (Set-up) Çalışması Sırasında EKED Uygulaması
(LOTOTO Application During the Production Method Set-up Study on the CNC Milling Machine)

Makinede çalışmaya başlamadan önce Şekil 7’de görüldüğü gibi makine operatörü makine kilitlemeli mod şalteri üzerine kendine ait anahtarı takmış ve CNC tezgâhı eksen hızlarını yavaşlatan ayarlama modunu seçmiştir. Mod şalteri üzerinden ayarlama yaptıktan sonra deneme çalışmasını gerçekleştirmiş ve tezgâh eksen hızlarının azaldığından emin olmuştur. Daha sonra üretim metodu ayarlama (set-up) çalışmasını tezgâh el çarkı üzerinden gerçekleştirmiş ve operasyonu tamamladıktan sonra kilitlemeli mod şalter üzerinden anahtarını çıkarmış ve çalışmasını tamamlamıştır.

4.6. Tesisler Bölümü Kızgın Su Kazanında Yıllık Periyodik Bakım Çalışması (Annual Periodic Maintenance Study in the Hot Water Boiler of the Facilities Department)

Tesiste sıcak suyun kullanılmasını sağlayan kızgın su kazanında yıllık olarak periyodik bakım çalışması gerçekleştirilmektedir. Bu bakım çalışması sırasında kızgın su kazanında hidrostatik testler, basınç testleri vb. çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Tablo 8. Kızgın Su Kazanında Yıllık Periyodik Bakım Çalışması – EKED Risk Değerlendirmesi
(Annual Periodic Maintenance Study in Hot Water Boiler – LOTOTO Risk Assessment)

Döküm Makinelerindeki Operasyonlarda EKED Risk Değerlendirmesi				
Makine	Yapılan operasyon	Mod	Tehlikeli enerji türleri	Mevcut önlemler
Kızgın su kazanı	Yıllık periyodik bakım	Bakım	Kızgın su, Elektrik, Doğal gaz	Acil durdurma butonu, Emniyet valfi

Sıklık	Makine İçerisinde Kalma Süresi	Operasyondaki Çalışan Sayısı	Kaçınma	Şiddet	Vardiya Süresince Rutin ve Tekrarlanan İş mi?
2	5	2	2	4	0

EKED Puanı	EKED Uygulaması
16	Tam EKED Uygulaması

Kızgın su kazanında yıllık periyodik bakım çalışması için gerçekleştirilen EKED risk değerlendirmesinde Tablo 8'de belirtildiği gibi makinede operasyonun gerçekleştirilme sıklığı yılda bir defa olduğundan 2 puan olarak sıklık bölümünde belirtme yapılmıştır. Operasyon süresince makine içerisinde kalma süresi 8 saat olduğundan 5 puan olarak belirleme yapılmış, çalışmayı 2 bakım çalışanı gerçekleştirdiğinden 2 puan olarak belirleme yapılmıştır. Makinenin istemsiz/beklenmeyen başlatılması sonucunda kaçınılabilir olasıdır ancak yaralanma şiddeti ölüm olabilir. Operasyon vardiya süresince rutin, kısa süreli, tekrarlanan bir iş olmadığından ve enerji ile çalışma ihtiyacı bulunmadığından bu çalışmada tam EKED uygulamasının yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 8. Kızgın Su Kazanında Yıllık Periyodik Bakım Çalışması Sırasında EKED Uygulaması (LOTOTO Application during the Annual Periodic Maintenance Study in the Hot Water Boiler)

Kızgın su kazanında çalışmaya başlamadan önce Şekil 8'de görüldüğü gibi bakım operatörleri ana güç panosundaki pako şalter üzerinden elektrik enerjisini kesmiş ve çoklayıcı yardımıyla kilitleme - etiketleme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Ardından kazan küresel vanasını kapatarak vana üzerine de aparat yardımıyla kilitleme - etiketleme işlemini gerçekleştirmişler ve artık enerji ortadan kaldırılarak sıfır enerji konumu sağlanmıştır. Periyodik bakım çalışması tamamlandıktan sonra küresel vana ve pako şalter üzerinden kilitleme - etiketleme ekipmanlarını kaldırarak kazanı çalıştırmışlar ve operasyonu tamamlamışlardır.

Tablo 9. Döküm Sektöründeki Makinelerde Gerçekleştirilen Birkaç Çalışmada EKED Risk Değerlendirmesi (LOTOTO Risk Assessment in Several Studies Conducted on Machines in the Casting Industry)

Kısım/İş	EKED Puanı	EKED Uygulaması
Endüksiyon ocağında refrakter bozma/yapma çalışması sırasında EKED uygulaması	18	TAM EKED UYGULAMASI
Otomatik yatay kalıplama hattının soğutma tüneline derece devrilmesine müdahale çalışması sırasında EKED uygulaması	15	TAM EKED UYGULAMASI
Maça pres makinesinde maça sandığı nozul temizleme operasyonu sırasında EKED uygulaması	1	KİSMİ EKED UYGULAMASI
Askılı temizleme/kumlama makinesinde helezon değişimi çalışması sırasında EKED uygulaması	16	TAM EKED UYGULAMASI
CNC freze tezgahında Üretim metodu ayarlama (set-up) çalışması sırasında EKED uygulaması	1	KİSMİ EKED UYGULAMASI
Kızgın su kazanında yıllık periyodik bakım çalışması sırasında EKED uygulaması	16	TAM EKED UYGULAMASI

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Dökümhaneler, İşyeri Tehlike Sınıfları Listesi EK-1'de belirtildiği gibi çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerinden biridir. Bu sınıfta bulunmasının sebeplerinden birisi de döküm parça üretimi sürecinde çeşitli, büyük boyutlu ve tehlikeli enerjinin istemsiz, beklenmeyen başlatılması sebebiyle çalışanların ciddi iş kazaları yaşama potansiyeli barındıran makineler ile çalışmasıdır.

Literatürde EKED konusu araştırıldığında; oluklu mukavva üretim makinelerinde gerekli bakımların yapılması sırasında tehlikeli enerji kaynaklarının belirlenmesi ve bu enerji kaynaklarının nasıl emniyetli bir şekilde kullanılabilirliğinin tanımlanması ve çalışanlar tarafından EKED uygulamasının daha bilinçli yapılmasının sağlanması ile ilgili çalışmaların olduğu görülmüştür (Kalyoncu, 2021). Kömür madeni endüstrisinde üretim ve bakım sırasında beklenmedik enerji salınımından kaynaklanan risklere karşı kilitleme ve etiketleme sisteminin önemini belirten, EKED prosedürü süreçlerini açıklayan ve EKED sisteminin madende emniyet yönetiminin güçlendirilmesini sağladığını belirten çalışmaların literatürde olduğu tespit edilmiştir (Zhang, Liu, 2011). Bu çalışmanın literatürde ki benzer çalışmalardan farkı; EKED risk değerlendirmesi oluşturularak EKED prosedürü uygulamalarında daha prosedürel ve emniyetli bir yol izlenmesi, makinelerdeki tehlikeli enerji kaynaklarının

hızlarının sınırlandırılarak, enerji altında makinede emniyetli çalışılması, vardiya süresince rutin ve tekrarlanan işlerde EKED prosedürünün nasıl uygulanabileceği ve makine çalışma ortamının nasıl emniyetli hale getirilip çalışmanın sürdürülebileceği amaçlanmıştır.

EKED prosedürü uygulamalarının özellikle vardiya içerisinde sık sık yapılan, rutin ve tekrar gerektiren kısa süreli işlemlerde, enerji altında çalışma gerektiren operasyonlarda göz ardı edilebildiğini hemen hemen tüm sektörlerde görmekteyiz. Prosedürde yaşanan bu eksikliğin doğurduğu risk sebebiyle yaşanabilecek iş kazası durumunda işletmelerin ve her seviyedeki yöneticinin hukuki, maddi ve manevi zorluklarla karşılaşabilmesi muhtemeldir. Bu sebeple vardiya içerisinde sık sık yapılan, rutin, tekrarlanan ve/veya enerji altında çalışma ihtiyacı olan operasyonlarda EKED prosedürünün nasıl uygulanması gerektiğini EKED risk değerlendirmesi ile analiz edip tam veya kısmi EKED uygulamasının yapılması sağlanabilir. Tehlikeli enerjiye karşı radar emniyet sensörleri, ışık bariyerleri, kapı emniyet siviçleri, hız sınırlandırıcı emniyet mod şalterleri vb. iş güvenliği ekipmanlarıyla riskler kontrol altına alınabilir.

Bu çalışmanın giriş kısmında da bahsedildiği gibi makineler için risk etmenleri özelinde oluşturulan risk değerlendirmesi yöntemleri mevcuttur. Kimyasalların kontrollü kullanılabilmesi amacıyla bir kimyasal maruziyet risk değerlendirmesi yöntemi ILO tarafından işyerlerine önerilmiştir. Engelli çalışanların, sağlık kurulu raporlarındaki engel oranı değerleri kullanılarak da bir risk değerlendirmesi yöntemi geliştirilmiş ve engelli çalışanlar özelinde bir risk değerlendirmesi yöntemi oluşturulmuştur. Fiziksel, kimyasal, biyolojik, psikososyal, ergonomik, makine, patlama, engelli personeller vb. özelinde oluşturulan spesifik risk değerlendirmelerine ek olarak bu çalışmada da makinelerde tehlikeli enerjinin kontrolü, beklenmedik, istemsiz başlatma konusu özelinde bir EKED risk değerlendirmesi belirtilmiştir. Bu risk değerlendirmesi makinelerde yapılan operasyonlarda tehlikeli enerji sebebiyle istemsiz, beklenmeyen başlatma sebepli iş kazalarının yaşanmaması ve bu sebeple olası yaşanabilecek kazalar oluşmadan önlem alınabilmesi yönünde olumlu fayda sağlayacaktır. EKED risk değerlendirmesi çalışmasında sayısal değerler kullanılarak bir risk puanı belirlendiği için EKED risk değerlendirmesi yöntemi, kantitatif (nicel) risk değerlendirmesi yöntemleri arasında sınıflandırılabilir.

EKED risk değerlendirmesi yöntemi ile makinelerde gerçekleştirilen operasyonlarda tehlikeli enerjilerin izolasyonunun yapılması, makinelerin sıfır enerji konumuna getirilmesi, enerji ihtiyacının olduğu operasyonlarda çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için gerekli emniyet tedbirlerinin alınarak çalışmaların yürütülebilmesi amacıyla EKED risk değerlendirmesi yöntemi oluşturularak bu çalışmada incelenen operasyonlarda kullanılmıştır. Bu risk değerlendirmesi yöntemine bağlı olarak makinelerde gerçekleştirilen operasyonların EKED puanları ve derecelendirmeleri yapılmıştır. EKED risk değerlendirmesi sonucunda oluşan risk puanı neticesinde tam veya kısmi EKED uygulaması yapılarak makinelerde gerçekleştirilen her türlü operasyonun emniyetli bir şekilde yapılabilmesi için risk öngörülerinin oluşturularak önlemlerin alınabilmesi amaçlanmıştır.

Yalnızca belli bir sektör ve makine özelinde değil, hemen hemen her sektördeki makinelerde gerçekleştirilen operasyonlarda bulunan tehlikeli enerjinin izolasyonu ve makinelerin beklenmeyen, istemsiz başlatılması durumlarına karşı önlemlerin alınması ile tam ve kısmi EKED uygulama yapılabileceği hususunda bir risk değerlendirmesi yapılabilmesi sağlanacaktır.

Makinelerde gerçekleştirilen operasyonlarda tehlikeli enerji kaynağı olarak sadece elektrik enerjisi düşünülmemelidir, makinelerdeki tüm enerji türleri; mekanik, hidrolik, pnömatik, kızgın su, doğal gaz, yer çekimi kuvveti vb. tüm enerji türleri değerlendirilerek kilitleme – etiketleme uygulamaları gerçekleştirilmelidir.

Makinelerde gerçekleştirilen EKED prosedürü uygulamalarında çalışanların kendi insiyatiflerine göre kilitleme – etiketleme çalışmasını yapmaları veya yapmamaları gibi uygunsuz, güvensiz durumlarla karşılaşılması ihtimaline karşı kilitleme ve etiketleme uygulamaları iş yerlerinde dijital programlar üzerinden takip edilebilir. Bu dijital EKED takip uygulamaları sayesinde hem EKED prosedürleri daha emniyetli bir şekilde gerçekleştirilebilir hem de iş yeri için EKED prosedürü çalışmaları için bir veri tabanı oluşturulabilir. Takip sistemi sayesinde hatalı kilitleme – etiketleme uygulamaları düzeltilebilir ve operatörler tecrübelenerek hatalı kilitleme- etiketleme uygulamaları azaltılabilir. Gelecek çalışmalar için EKED risk değerlendirmesi metodolojisinin yapay zekâ ve dijital uygulamalar ile entegrasyonunun sağlanması için ilgili operasyonlar ile ilgili veriler veri tabanına işlenebilir ve bu veriler şart koşularak makinelerdeki operasyonlar dijital uygulamalardan anında seçilip tam veya kısmi EKED uygulamasının nasıl yapılması gerektiği açıklanmalı izlenebilir. Yapay zekâ destekli kameralar ile çalışmalar canlı izlenerek EKED prosedürü ihlali durumunda ayrıca yöneticilere bildirim de yapılması sağlanabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın oluşunda kıymetli katkılarını sunan iş yerime ve çalışma arkadaşlarıma en derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatımın her döneminde yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili anneme, babama ve kardeşlerime en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- AFS, American Foundry Society / Census of World Casting Production, Modern Casting Magazine, (2021).
- CAEF, The European Foundry Association, The European Foundry Industry, (2019) Erişim adresi: <https://www.caef.eu/statistics/> Erişim tarihi: 11.03.2023.
- Garipoğlu O., 2021. Engelli Çalışanların, Sağlık Kurulu Raporlarındaki Engel Oranı Değerleri Kullanılarak Bir Risk Değerlendirme Yöntemi Geliştirilmesi: Döküm Sektöründe Bir Uygulama, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Günay, Y., 2012. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Türkiye’de Sanayiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi, Döküm Sektörü Rehber Doküman.
- Günay Y., 2016. TÜDÖKSAD Akademi, Döküm ve Değişen Pazar, Döküm Sanayinin Yeni Teknolojiler ve Değişen Pazar Yapısı ile İmtihani, s.: 15.
- Güvenli EKED, 2023. EKED Nedir, Eked Ürünleri, Erişim adresi: <https://guvenlieked.com/eked-nedir> Erişim tarihi: 09.05.2023.
- ILO, International Labour Organization (2006). International Chemical Control Toolkit. Erişim adresi: https://www.ilo.org/legacy/english/protection/safework/ctrl_banding/toolkit/icct/ Erişim tarihi: 15.05.2023.
- İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği, Madde 4, f), Madde 5, 29.12.2012 Tarihli 28512 Sayılı Resmi Gazete.
- Kalyoncu S., 2021. Oluklu Mukavva Üretim Makinelerinde Tehlikeli Enerjinin Yönetimi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli.
- Küçüksavcı G., 2021. Makine Risk Değerlendirmesinin Çalışma Hayatına Entegrasyonu, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, II. Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Öğrenci Kongresi Bildiri Kitabı, İstanbul.
- OSHA, Occupational Safety and Health Administration, The Industry Profile For Violations Of Any Specific OSHA Standard, 2021.
- OSHA, 2011. Occupational Safety and Health Administration, Standard Numarası: 1910.147, Tehlikeli Enerjinin Kontrolü, (Kilitleme / Etiketleme).
- Rocha F., 2023. Implementation Of Lockout/Tagout (LOTO) Methodologies On Production Lines, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Polytechnic of Porto.
- S.Fore, 2010. Cleaner Production For Environmental Conscious Manufacturing In The Foundry Industry, Department of Management/Project Management, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa. Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 8 No. 3, pp. 314-333.
- Şahin O., 2020. Dökümhane Maça Üretiminde Ortaya Çıkan Kimyasal Maddeler ve Bu Maddelerin Kontrolü, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Şahin O., Özay E., Uçan R., 2022. Döküm Parça Taşlama İşlerinde El-Kol Titreşiminin Ölçülmesi ve Maruziyetinin Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 856-868.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Demir Döküm Sanayi Kılavuzu Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editedosya/Demir_Dokum_Sanayi_Kilavuzu.pdf Erişim tarihi: 20.01.2023.
- Taşçı H., Yağız E. 2023. Elektrik Tesislerine Güvenli Müdahaleye Standartlarla Bakış EKED / LOTO. Elektrik Mühendisleri Odası, 47. Dönem İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Komisyonu. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=135390&tipi=2&sube=0 Erişim tarihi: 09.05.2023.
- Tezcan E., 2023. Etiketle, Kilitle, Emniyete Al, Dene. Makina Mühendisleri Odası, Mühendis ve Makina Dergisi, 48 (567).
- Tj L., 2020. Safety Minute: Rushing Causes Errors, Larkin Communication, AIChE – American Institute of Chemical Engineers, CEP August 2020, s.: 43-44.
- Erişim adresi: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2020/august/safety-minute-rushing-causes-errors> Erişim tarihi: 09.05.2023.
- TS EN ISO 12100, 2011. Makinalarda Güvenlik, Tasarım İçin Genel Prensipler, Riskin Değerlendirilmesi ve Azaltılması.
- TS EN ISO 14118, 2018. Makinelerde Güvenlik, Beklenmeyen Start-up Önlenmesi, 4.4 Sinyal Verme ve Uyarı (Gecikmeli Başlatma), 5.3.2 Güç Kaynaklarından İzolasyon için Cihazlar, 5.4 Depolanmış Enerjinin Dağıtılması veya Sınırlandırılması (Muhafaza) için Cihazlar, 7.3 Enerji Dağılımını veya Kısıtlamayı (Muhafaza) Doğrulamak için Hükümler.
- TÜDÖKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, 2022. Döküm Sektörü Genel Bakış ve Önemi, Erişim adresi: <https://tudoksad.org.tr/genel-bakis-ve-onemi> Erişim tarihi: 01.12.2022 ve 07.03.2023.
- Yalçın D., 2024. Deniz Olaylarının Kişisel Yaralanma Perspektifinden Kapsamlı Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Zhang Hong-jie, Liu Zhen-tang, 2011. Application of Lockout & Tagout System in the Coalmine Industry, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, SciVerse ScienceDirect, Procedia Engineering 26, s.: 2065 – 2069.



ELEKTRİK KESİLMELERİNE KARŞI AKILLI PRİZ SİSTEMİ

Harun SÜMBÜL^{1*}, Cansu GÜLAY¹

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Yeşilyurt Demir Çelik MYO, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Bölümü, Samsun, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Elektrik Kesilmesi, Akıllı Priz, Enerji Verimliliği, Akıllı Ev.</i>	Anlık elektrik gidip gelmesi, ülkemizde özellikle aşırı yağış alan Karadeniz Bölgesi gibi yüksek kesimlerde oldukça sık karşılaşılan önemli bir problemdir. Bu durum neticesinde, evde kullanılan birçok elektronik cihaz (tablet, tv, gibi) zarar görüp arızalanabilmekte, uzun süre elektriğin gelmemesi sonucunda da buzdolabı ve dondurucu içerisindeki gıdalar çözünüp bozularak gıda israfına sebep olabilmektedir. Özellikle uzun yaz tatili dönemlerinde insanlar tatil yapma, mevsimlik işçi olarak tarlada çalışma, aile ziyareti için memlekete gitme gibi sebeplerden dolayı evlerinden uzun süre ayrı kalabilmektedir. Evden uzakta iken evi hakkında anlık bilgi alabilme üzerine pratik bir çözüm önerisi getirilen bu çalışmada gerek şebeke arızaları gerekse de doğal şartlardan dolayı evde elektrik kesildiği veya sigortanın attığı anda kullanıcılar, dünyanın neresinde olursa olsunlar SMS ile bilgilendirilecek ve evlerindeki bu olumsuz durum karşısında müdahale etme/ettirebilme fırsatı yakalayacaklardır. Böylece gerek elektronik cihazların güvenliği gerekse de gıda güvenliği konusunda önemli bir koruma sağlanmış olacaktır. Bu kapsamda yapılan bu çalışmanın, barındırdığı teknolojik aksamaları ve ergonomik tasarımı ile gıda sağlığı ve ev güvenliği üzerinde önemli bir boşluğu dolduracağına inanılmaktadır.

SMART PLUG SYSTEM AGAINST POWER OUTAGES

Keywords	Abstract
<i>Power Outage, Smart Plug, Energy Efficiency, Smart Home.</i>	Sudden power outage is an important problem that is frequently encountered in our country, especially in high areas such as the Black Sea Region, which receives heavy rain. As a result of this situation, many electronic devices used at home (such as tablets, TVs, etc.) may be damaged and malfunction, and as a result of lack of electricity for a long time, the foods in the refrigerator and freezer may decompose and spoil, causing food waste. Especially during long summer periods, people may stay away from their homes for long periods of time for reasons such as going on vacation, working in the fields as seasonal workers, or going to their hometown to visit family. In this study, where we propose a practical solution to get instant information about the home while away from home, users will be informed via SMS wherever they are in the world, whenever the electricity is cut off or the fuse is blown at home due to either network failures or natural conditions, and they will be able to intervene in case of this negative situation in their home. They will seize the opportunity. Thus, significant protection will be provided regarding both the safety of electronic devices and food safety. In this context, it is believed that this study will fill an important gap in food health and home safety with its technological components and ergonomic design.

Alıntı / Cite

Sümbül, H., Gülay, C., (2025). Elektrik Kesilmelerine Karşı Akıllı Priz Sistemi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 369-381.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Sümbül, 0000-0001-5135-3410
C. Gülay, 0009-0008-0509-4516

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	06.07.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	11.02.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.03.2025
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: harun.sumbul@omu.edu.tr, +90-362-312-1919

SMART PLUG SYSTEM AGAINST POWER OUTAGES

Harun SUMBUL^{1†}, Cansu GULAY¹

¹ Ondokuz Mayıs University, Yeşilyurt Demir Çelik Vocational School, Department of Biomedical Device Technology, Samsun, Türkiye

Highlights

- Ability to define as many users as you want,
- Working independently of the internet, not requiring an internet connection,
- Ability to plug it into any socket you want at home and turn that socket into a smart one,
- Secure communication with the ability to work with any phone

Graphical Abstract

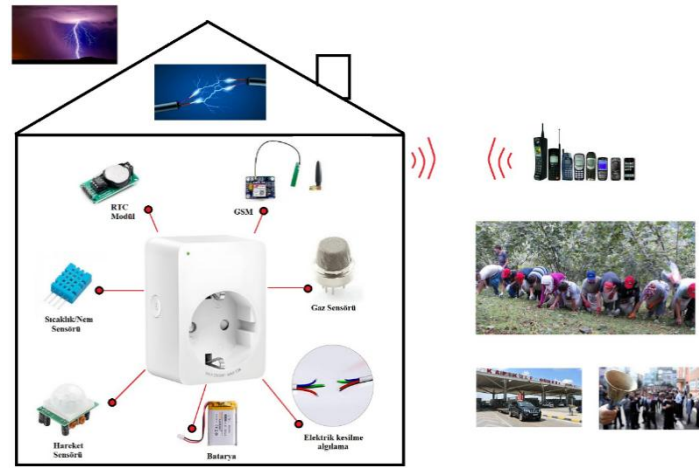


Figure. Smart Plug

Purpose and Scope

The aim of this study is to develop a device that allows individuals who have to stay away from their homes for a long time, such as expatriates, seasonal workers and summer vacationers, to communicate with their homes. Thus, people will be able to get various information (temperature, humidity, fire, theft, etc.) about their homes from wherever they want.

Design/methodology/approach

The main goal of the work is to ensure home safety and food safety. The product that emerged in the study carried out in line with this goal has a highly technological structure with units such as microcontroller, temperature-humidity sensor, motion detection mechanism, power outage detection unit, gas leakage detection unit. GSM communication is used as communication protocol via SIM800L module. This system offers the opportunity to communicate and message independently of the internet.

Findings

This study has been tested especially in the Black Sea region, where hazelnut workers are concentrated, where electricity is frequently cut off for no reason, and as a result, it has been found that people are instantly informed of this situation when the electricity goes out unintentionally, and thus they can intervene in negativities. In this way, people ensured that they could protect their food in the freezer and refrigerator before it spoiled, either by going personally or by informing their neighbors.

Originality

The proposed innovation of the study is the ability to communicate wherever in the world, regardless of the Internet. Additionally, the system is suitable for development and it is also possible to communicate by voice if you wish. The main focus is on automatic notification in case of a power outage, and its similarities and advantages with other existing devices are presented for comparison in the study.

[†] Corresponding author: harun.sumbul@omu.edu.tr, +90-362-312-1919

1. Giriş (Introduction)

İstem dışı ve kontrolsüz bir şekilde (topraklama hatası, rölelerin aşırı yüklenmesi, şimşek düşmesi veya gerilim dalgalanmaları sebebi ile) elektriğin anlık gidip gelmesinin maddi manevi birçok olumsuz etkisi olabilmektedir. Bu durum, özellikle TV, bilgisayar gibi önemli cihazların arızalanabilmesine, ev içerisindeki ampullerin bozulabilmesine ve hatta bazen prizlerde sorun oluşturup yangınlara sebep verebilmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek zorunda olduklarından dolayı bu durumdan dağıtıcı şirketlerde mağdur olabilmektedir. Yapılan bu çalışmada, evlerde elektrik kesilmesi veya istem dışı elektrik sigortasının atması neticesinde oluşabilecek aksaklıklara karşı kullanıcıya anlık bilgilendirme yapmak ve bunun yanında ev ile alakalı önemli parametreleri istenildiği anda kullanıcıya sunmak amacıyla akıllı bir cihaz geliştirilmiştir. Özellikle gurbetçiler için oldukça faydalı olacak bu çalışma ile kullanıcılar evde yok iken elektrikler kesildiğinde veya sigorta attığında ev sahipleri cep telefonu üzerinden (GSM) bir bildirim ile (SMS) bilgilendirileceklerdir.

Mevcut durumda tatil dönemlerinde memleketine giden tatilciler uzun süre evlerinden uzakta kalabilmektedirler. Elektrikler gittiğinde veya evin sigortası attığında derin dondurucu, buz dolabı vb. ortamlardaki gıdalar çözünmekte ve bozulabilmektedir. Yapılan çalışma ile bu olumsuz durumun önüne geçilecek ve evde sigorta attığında bu durum gerçek zamanlı olarak ev sahibine haber verilecektir. Elektrikler tekrar geldiğinde kullanıcı tekrar bilgilendirilecektir. Böylece ev sahibi, dolaplardaki gıdalar bozulmadan müdahale edebilecek bir fırsatı (mümkün ise bizzat kendisi müdahale ederek veya komşularını eve yönlendirerek) yakalamış olacaklardır. Bu kısım önemlidir zira yapılan çalışma bu yönü ile gıda israfının da önüne geçmektedir. Bunun yanında geliştirilen cihaz üzerinde bulunan Gaz dedektörü, Hareket Dedektörü, Elektrik kesinti algılama sistemi, Sıcaklık ve Nem sensörü ile kullanıcı bilgilendirmesi yapılabilmektedir. Kullanıcı istediği yerden, (internetsiz ortamlarda dahil) bir SMS atmak suretiyle (örneğin "EV" veya "BAĞ" yazıp göndererek) yaşam alanına ait sıcaklık, nem ve gaz bilgilerini de anlık olarak öğrenebilecektir. Sistem üzerinde barındırdığı GSM modülü aracılığı ile belirtilen parametrelerde bir değişiklik olduğunda da anında kullanıcıya SMS gönderebilmektedir ("UYARI: ELEKTRİKLER KESİLMİŞTİR!", "UYARI: HAREKET ALGILANDI!", "UYARI: GAZ ALGILANDI!" gibi...). Böylece kullanıcı evi ile alakalı olumsuzluklardan anlık haberdar olabilmekte ve bu durumlara müdahale edebilme fırsatını yakalayabilmektedir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

İnsanoğlu ilk çağlardan beri konfor ve yaşam kalitesini artırmak için çeşitli arayış içerisine girmiştir. Tarih boyunca şehir, kasaba ve köylerin gaz lambaları, kandiller ve mum gibi ilkel yöntemlerle aydınlatıldığı çok uzun bir dönem bulunmaktadır (Anonim, 2024). 1752 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Benjamin Franklin, bir uçurtma ve elektrik anahtarı sayesinde yıldırım kıvılcımındaki elektriği kontrol etmeyi başararak elektriğin keşfinde ilk adımlar atılmaya başlamış ve bu tarihten itibaren elektriğin kullanımı insan yaşamında büyük değişikliklere yol açmıştır. İnsanlar ilk başlarda daha çok elektriği aydınlatma amaçlı kullanmışlardır. İlerleyen dönemlerde ise artık hayatlarının her noktasında elektriğe bağımlı hale gelmişlerdir (Sarısaman, 2019).

Dünyada elektriğin aydınlatma amacıyla kullanılması ilk defa 1857 yılında Fransa'nın Lyon şehrinde olmuştur (Anonim, 2024). Türkiye'de ise Osmanlı döneminde başlayan şehirleri elektrik ile aydınlatma faaliyetleri, Cumhuriyetin ilk yıllarında yoğunlaşarak birçok şehir artık elektrik ile aydınlatılmaya başlanmıştır (Gençosman, 1960). Günümüzde hayatımızın merkezinde bulunan ve insanlığın yaşam kalitesini yükselten elektrik, tarihin en büyük buluşlarından biri olarak dikkat çekmektedir.

Son yıllarda elektrik enerjisi, her sektörde kullanılan ve olmaz ise olmaz bir pozisyona sahip bir güç haline gelmiştir. Ülkeler bazında ise enerji savaşlarında ekonomiler için vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Çünkü elektrik; hemen hemen bütün sektörlerde üretilen mal ve hizmetler için girdi, meskende tüketilen önemli bir nihai mal niteliğindedir (Erol, 2007). Öyle ki otoriteler tarafından bütün Türkiye'nin sanayisinin bir saat elektriksiz kalması durumunda ülke zararın 18 milyar lira olacağını tahmin etmektedirler (Anonim, 2024).

Bunun yanında teknolojinin getirdiği yeniliklerle beraber elektrikli araçların sayısının artması, cep telefonu kullanıcılarının artması, evde kullanılan elektrikli ev aletlerinin kullanımının artmasına karşılık elektrik şebekeleri gerekli duyulan elektriği sağlamakta zorlanmaktadır. İnsan hayatını ve konforunu oldukça artıran bu tür elektrikli araçları artık hayatımızın her alanında görmek mümkündür. Elektrik olmadan çalışmayacak olan bu araçların sayısının da giderek artacağı muhakkaktır. Bu ise kesinti dolayısı ile oluşacak zararları en aza indirebilecek ve kullanıcı dostu akıllı dağıtım sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Yapılan bir çalışmada, evden çıkmadan önce elektrikli cihazların açık olup olmadığını kontrol edenlerin oranı %22, prizleri kontrol edenlerin oranının ise %11 olduğu görülmüştür (Anonim, 2024).

Buna karşılık doğal zaruri sebepler veya şebeke arızaları neticesinde elektriğin anlık gidip gelmesi veya şalterin

atması ile meskenlerde kullanılan teknolojik araçlar bozulabilmekte, donduruculardaki gıdalar çözünebilmekte ve yeni nesil teknoloji tablet, PC ve TV' ler arızalanabilmektedir. Bunlara karşılık olarak birtakım önlemler alınmaya çalışılsa da yeterli olmamaktadır. Örneğin elektrik kesildiğinde devreye giren otomatik elektrik kesintisi alarm sistemleri, elektrik kesildiğinde devreye girmekte ve elektrik geri gelene kadar (bataryası imkanları dahilinde) siren çalmaktadır (Anonim, 2024). Bu tip sistemler kullanıcı bilgilendirme uygulamasına sahip değildirler ve herhangi bir uzaktan bildirim yapamazlar.

Akıllı prizler ile alakalı literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Akıllı priz uygulamaları; priz güvenliği, hassas koruma gerçekleştirilerek cihaza zararlı olan aşırı akım engelleme ve dolaylı olarak enerji verimliliğine katkı sağlama amaçlı önemli kullanım alanlarına sahiptir (Kıral, 2024). Örneğin akıllı prizler, belirli bir periyot da tüketilen enerji verilerini kaydetmek içinde oldukça sık kullanılmaktadır (Veleva, 2012). Buna yönelik yapılan bir çalışmada tüketim bilgisinin kullanıcıya iletilmesi suretiyle tüketici bilinci oluşturularak yaklaşık %15 tasarruf sağlanmıştır (Shajahan vd., 2013). Benzer amaçlı geliştirilen başka bir akıllı priz uygulamasında ise priz yüklerinde yapılan enerji yönetim algoritmalarıyla, %10'a kadar tasarruf sağlandığı görülmüştür [Guo vd., 2013]. Benzer şekilde akıllı prizler ile cihaz durumları izlenebilmekte ve prize bağlı cihazlar kullanılmadıkları zamanlarda kapatılması sağlanarak enerji tasarrufu gerçekleştirilebilmektedir (Ghosh vd., 2013).

Bulut modeli ve kablosuz haberleşme tabanlı akıllı ev modeli ile de enerji tasarrufu sağlayabilen akıllı priz uygulamaları mevcuttur (Byun vd., 2012). Mevcut akıllı prizlere sensör (ışık, sıcaklık, nem, hareket) özellikleri eklenerek yapılan çalışmalar da vardır ve akıllı ev uygulamalarında oldukça sık kullanılmaktadırlar (Morimoto vd., 2013). Bu prizler, bağlı olan sensörler yardımı ile yangın, deprem, doğal gaz kaçağı ve diğer felaketlerde enerjinin kolay bir şekilde kesilmesini sağlayabilmektedirler. Böylece bu teknolojiler güvenlik amacı ile de kullanılmaktadırlar (Kıyıcı, 2019). Örneğin bu cihazlar elektrik kesildiğinde modem aracılığı ile internet üzerinden kullanıcılarına mail iletmektedirler (Anonim, 2024). Fakat elektrik kesildiğinde modem de kesileceğinden kullanımda sorunlar yaşanabilmektedir.

Yapılan detaylı literatür araştırmasından da anlaşılacağı üzere akıllı priz uygulamaları genellikle uzaktan bir cihazın kontrolü, prize bağlı cihazların kullanım parametrelerinin (akım, güç vs) takibi, kullanıcı farkındalığı oluşturularak enerji verimliliğinin sağlanması gibi konular için kullanılmaktadır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada ise, elektrikler kesildiği ve geri geldiği anlarda, kullanıcılar bilgilendirilmekte ve böylece kullanıcı evindeki elektrik olup olmadığını, ne kadar süredir elektriksiz kaldığını öğrenebilmektedir. Yapılan çalışmanın özgün yanı ise, elektrik kesilme bilgisinin anlık iletilmesi ve ev sahiplerine müdahale edebilme şansı sağlanması, gıda israfının da önüne geçebilmesi üzerinedir. Piyasadaki ticari ürünlerden farklı olarak; ev içi portatif ve pratik kullanıma uygunluk, tak-çıkaz özellikte olma, her prizde kullanılabilme, taşınabilirlik, daha ekonomik olma gibi konularda üstün farklılıklar göstermektedir. Ayrıca piyasada bulunan bu ürünler pano şeklindedir ve montaj gerektiren cihazlardır. Yapılan çalışma çıktısı ile kullanıcılar veya ev sahipleri, evde olmadıkları zamanlarda elektrikler kesildiğinde veya sigorta attığında cep telefonu üzerinden bir bildirim ile bilgilendirileceklerdir. Sistem internetten bağımsız olduğundan dünyanın neresinde olursa olsun, kullanıcılar evleri hakkında anlık bilgi sahibi olabilmektedirler. Yapılan bu çalışma, barındırdığı teknolojik donanımları ve ergonomik tasarımı ile gıda sağlığı ve ev güvenliği üzerinde önemli bir boşluğu dolduracağı tahmin edilmektedir.

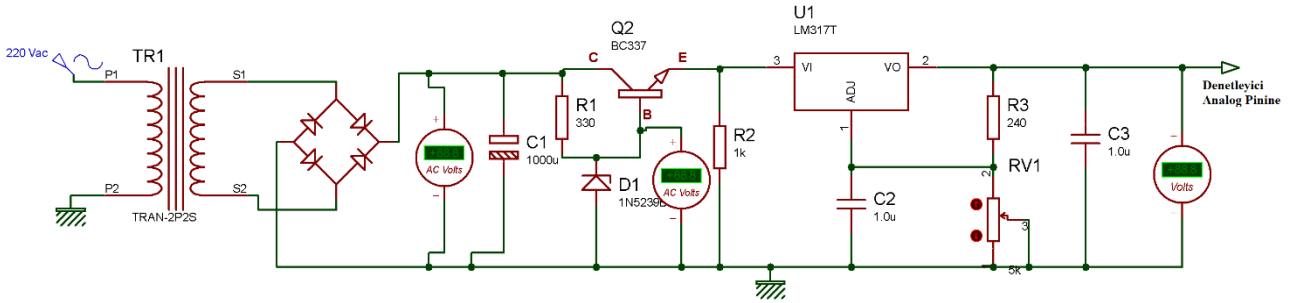
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Fındık üretiminin yoğun olarak yapıldığı Doğu Karadeniz'de jeopolitik şartlar dolayısıyla aşırı yağış alması sonucu elektrikler sık sık kesilmektedir. Fındık işçiliği yapılan bu bölgelerde insanlar uzun süre evlerinden uzakta kalmakta ve tarlalarında fındık toplama işleri ile uğraşmaktadır. Elektriğin yukarıda değinilen sebeplerden veya farklı sebeplerden dolayı kesilmesi veya sigortanın atması sonucu insanlar uzakta olduklarından bu durumdan haberdar olamamaktadır. Aynı şey gurbetçiler için de geçerlidir. Uzun yaz tatili dönemlerinde gurbetçiler evlerinden haberdar olamamakta, herhangi bir sebeple elektrikler kesildiğinde de bilgi sahibi olamamaktadırlar. Bunun için ev sahipleri evde yok iken buzdolabı/derin dondurucularında bulunan gıdaların bozulması, evde oluşabilecek tehlikeli durumlarda ev sahibinin bilgilendirilmesi, ev sahibine önlem alabilme zamanının kazandırılması oldukça önemlidir.

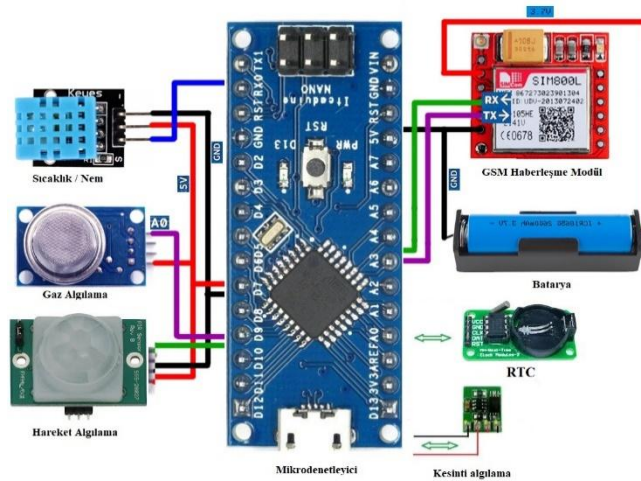
Örneğin bir fındık üreticisi, fındık toplamak için tarlasında birkaç ay geçirebilmekte, bu süre de esas ikamet ettiği evine hiç uğrayamamaktadır. Fındık üreticisi, tarladaki işleri bitip evine döndüğünde elektrikler kesildi veya salter attı ise, buzdolabı ve derin dondurucudaki tüm gıdaların çözünüp bozulması kaçınılmaz bir sonudur.

Mevcut durumda akıllı ev sistemleri, kameralı takip sistemleri vs. şeklinde birçok sistem bulunmaktadır. Ama bu sistemler kurulumu ve kullanımı pratik olmayıp aynı zamanda maliyetlidir. Mevcut elektrik kesilme algılama cihazları ise sadece alarm özelliğine sahiptir ve elektrikler gittiğinde ev içerisinde alarm vermektedir. Uzaktaki ev sahibine bilgi gönderme özelliği bulunmamaktadır. Ayrıca bazı tür geleneksel elektrik kesilme algılama cihazlarında elektrik kesildiğinde veya geri geldiğinde anlık bilgi verme özelliği olsa da çoğu sistem internet tabanlı çalışmaktadır. Dolayısı ile internet bağlantısı koptuğunda yine mevcut sistemler kullanıcıya bildirim verememektedir. Tasarlanan sistem ise gayet ekonomik ve pratik kullanıma sahiptir. GSM hattı ile haberleştiğinden internete ihtiyaç duyulmadan dünyanın neresinden olursa olsun kullanıcılar evleri hakkındaki olumsuzluklardan haberdar olabilmekte ve anlık olarak ev ortamı ile alakalı bilgi edinebilmektedirler. Bunu için tek yapmaları gereken şey akıllı prizi alıp evinde istediği bir noktadaki prize takmaktır. Akıllı Priz; küçük boyutlu, az güç tüketen, ekonomik, pratik, internetten bağımsız çalışan, hayat kurtarıcı teknolojik bir üründür. Geliştirilen Akıllı Priz, normal şarj aletleri kullanımında olduğu gibi ev içerisinde (evden ayrılmadan önce) uygun bir prize takılacaktır. Kesinti algılama algoritması şu şekilde çalışmaktadır; Akıllı Priz içerisinde bulunan transformatör yardımı ile ev içinde kullanılan 220v gerilim bu trafoda düşürüldükten sonra mikroişlemcinin analog pinine bağlanmıştır. Burada gerilim bölücü devre yardımı ile transformatör sekonder gerilimi uygun voltaj aralığına çekilerek devamlı izlenmektedir. Eğer sekonder geriliminde bir düşme olmuş ise bu durum gerilim bölücü çıkışına voltaj düşmesi olarak yansiyacak ve mikrodenetleyicinin analog giriş voltajı da düşecektir. Kesinti algılama devresi Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Elektrik kesintisi algılama devresi (Electrical interruption detection circuit)

Geliştirilecek yerli-millî yazılım ile mikrodenetleyici, RTC (gerçek saat modülü) üzerinden elektrik gittiği saati ve kesinti bilgisini GSM (Sim800L) modül üzerinden kullanıcıya iletacaktır. Aynı şekilde ev içi gaz kaçak bilgisi, sıcaklık/nem bilgisi ve hareket (hırsızlık önleme amaçlı) bilgisi de ilgili sensörler ile devamlı ölçülüp işlemci EEPROM birimine kaydedilmektedir. Kullanıcı istediği anda Akıllı Prize bir SMS atmak sureti ile bu bilgilere anlık ve gerçek zamanlı erişebilmektedir. Sensörler için önceden tanımlanan eşik değerleri aşıldığında sistem otonom Arama Yapma/SMS atma özelliğini devreye alacak ve yine kullanıcılar anlık bilgilendirileceklerdir. Kullanılacak Sim modül ile kullanıcı kendisi harici 5 kişiyi de (bu sayı istenilirse artırılabilir) SMS atmak yoluyla ekleyebilir. Böylece SMS bilgisi kendisi yanı sıra diğer kullanıcılara da (evin diğer bireyleri) gidecektir. Böylelikle tek bir kullanıcıya gelen SMS gözden kaçma ihtimalide ortadan kalkmış olacaktır. Gerçekleştirilen akıllı sistem donanımları Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Sistem çevresel birimleri (System peripherals)

Arduino Nano Mikrodenetleyicisi: Arduino Nano, Atmega328 çekirdeğine sahip bir mikrodenetleyicidir. Kart üzerinde 14 adet dijital giriş/çıkış pini, 8 analog giriş, 16Mhz kristal, USB soketi, ICSP (In-Circuit Serial Programming) konektörü ve reset tuşu bulundurmaktadır. Devre üzerinde tüm işlemlerin gerçekleştirilmesinden sorumludur. Küçük boyutları ve az güç tüketiminden dolayı akıllı ev sistemleri, robotik gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Duran, 2022).

DHT11 Isı ve Nem Sensörü: Bu sensör, günlük yaşamdan endüstriyel uygulamalara kadar pek çok alanda kullanılan son derece kullanışlı bir karttır. Bu kart, sıcaklık ve nem seviyelerini ölçmek ve izlemek için hassas sensörlerle donatılmıştır ve yüksek doğrulukta sıcaklık (0°C ila 50°C) ve nem (%20 ila %90 RH) ölçümü yapabilir. Basit yapılandırma ve hızlı entegrasyon sayesinde, hobi projelerinden profesyonel uygulamalara kadar çeşitli projelerde kullanılabilir (Amasya vd., 2022; Sümbül vd., 2020).

MQ-5 LPG/Propan Gaz Sensörü: MQ-5 LPG sensörü izobütan ve 300ppm ve 10.000ppm yoğunluklarında propan algılar. MQ-5 sensörleri çıkış olarak gazın yoğunluğuna göre analog voltaj çıkışı verir. 10.000ppm ve 300ppm aralığında algılama yapabilmek gaz kaçağı için uygundur (Er, 2022). Sensörden algılanan gaz değeri, yazılım ile ayarlanan gaz eşik seviyesini aştığı anda kullanıcıya bildirim gitmektedir.

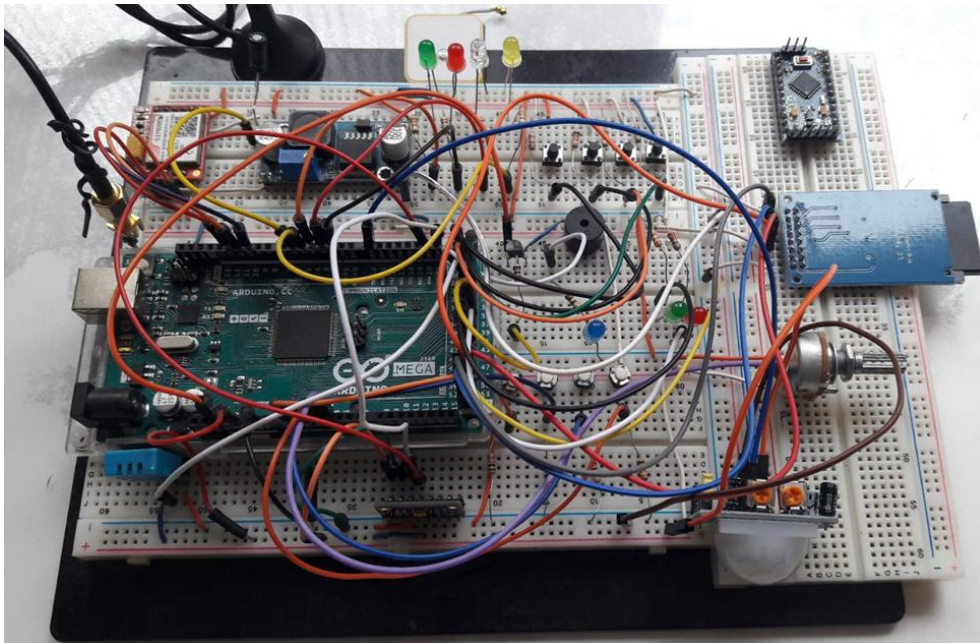
HC-SR501 PIR Sensör: PIR (Passive Infrared Sensor- pasif kızılötesi algılayıcı) sensörleri, bir ortamda oluşan canlı hareketini algılamak için kullanılan sensörlerdir (Olgun, 2019). Kullanıcı, sistemi aktif edip evden çıktıktan 2dk sonra devreye girmektedir. Ev içerisinde sensör çevresinde herhangi bir hareket algılandığı anda SMS ile kullanıcı bilgilendirmesi yapılır. Bu sensör bilgisi istenildiği taktirde acil durum girişi modunda ayarlanabilip sistemin otomatik olarak polisi araması ve sesli mesaj göndermesine de yetkilidir.

DS1302 RTC Modülü: DS1302 gerçek zamanlı saat devresi entegresi olup saat bilgisinin anlık ve sürekli olarak okunabildiği çok kullanışlı bir modüldür (Yumurtacı, 2023). Elektriğin gidip gelme saat ve tarih bilgileri bu modülden alınarak SMS' e eklenir.

Sim800L GSM GPRS Modülü: Bu kartı kullanarak SMS gönderip almak mümkündür. Kartın üzerindeki SIM800 L kasası, GSM ünitesi ve GPRS alıcı kapağına sahiptir. SIM800L, GPRS işlemi, SMS gönderip alma ve sesli arama özelliklerine sahip küçük bir modüldür. Üzerinde Sim kart takılabilecek bir soket bulunmaktadır. Sim kart üzerinden haberleşme imkânı sağlar (Dandil vd., 2020).

Li-Ion Batarya: 3000mAh, 3.7V değerine sahiptir. Cihaz, dahili Li-ion batarya ve şarj-koruma devreleri sayesinde elektrik kesildiğinde de çalışmasını sürdürecektir.

Tüm bahsedilen donanımlar bir araya getirilmiş ve sistem test kartı bread board üzerine kurularak test işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk deneme sonuçları oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Şekil 3, donanım devresi test amaçlı ilk halini göstermektedir.



Şekil 3. Donanım devresi test amaçlı ilk hali (The first version of the hardware circuit for testing purposes)

3.2. Sözde Kod (Pseudocode)

Sözde kod, bilgisayar bilimi ve yazılım mühendisliği alanında temel bir araç olarak hizmet vermektedir. Bir algoritmanın veya programın mantığını açıklamak için yapılandırılmış bir format sağlayarak doğal dil ile programlama dilleri arasındaki boşluğu doldurur. Sözde kod, herhangi bir özel programlama dilinin sözdizimine bağlı kalmadan mantığını ana hatlarıyla belirten bir algoritmanın yapılandırılmış metinsel temsili olarak tanımlanabilir. Birincil amacı, bir kod parçasının tam olarak nasıl uygulanması gerektiğinden ziyade neyi başarması gerektiğini tanımlamaktır. Sözde kodun bu dilden bağımsız doğası, geliştiriciler ve analistler arasında daha net iletişimi kolaylaştırır ve onların dile özgü söz dizimi yerine algoritmaların mantığına odaklanmalarına olanak tanır. Normalde mikrodenetleyici üzerinde 1500'den fazla komut satırı yer almaktadır. Geliştirilen sistemdeki gömülü sistemin yazılım kodlarının sözde kodları Ek olarak makale sonunda paylaşılmıştır.

3.3. Kullanıcı Komutları (User Commands)

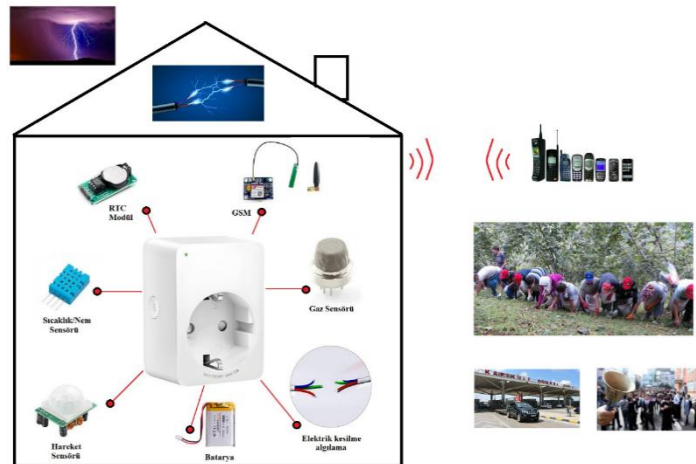
Yapılan çalışmada kullanıcılar, dünyanın neresinde olursa olsunlar kendi evleri ile mesajlaşmak sureti ile iletişime geçebilmektedirler. Bu amaçla gömülü sistem üzerinden çeşitli komutlar oluşturulmuştur. Kullanıcı, cihaz içerisinde bulunan SİM kart numarası ile bu komutları SMS atarak iletişim kurabilir, evleri hakkınca anlık bilgi ve olağanüstü durumlarda anlık bilgilendirme alabilirler. Tablo 1'de komutların bir kısmı ve açıklamaları verilmiştir.

Tablo 1. Komut örnekleri ve anlamları (Command examples and explanations)

Komut	Açıklama
k2=	Sisteme 2. kullanıcı tanımlar
k3=	Sisteme 3. kullanıcı tanımlar
k4=	Sisteme 4. kullanıcı tanımlar
k5=	Sisteme 5. kullanıcı tanımlar
liste	Tüm kayıtlı numara listesini mesaj olarak geri döndürür
sil=2	2. sırada kayıtlı kullanıcıyı listeden siler
sil=hepsi	Tüm kullanıcıları siler
sicaklik	Anlık sıcaklık bilgisini iletir
nem	Anlık nem bilgisini iletir
s1=	Sıcaklık alt limite belirler
s2=	Sıcaklık üst limite belirler
reset	Cihazı resetler
s1	Sıcaklık üst limit kontrol komutudur.
s2	Sıcaklık alt limit kontrol komutudur.
elektrik	Şebekede elektrik var olup olmadığı bilgisini verir

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yapılan çalışmanın çözüm önerisi; gurbetçiler, yazlıkçılar ve meslek gereği evinden uzakta çalışan insanlar için evlerinde yok iken buzdolabı/derin dondurucularında bulunan gıdaların bozulması, evde oluşabilecek tehlikeli durumlarda ev sahibinin bilgilendirilmesi, önlem alabilme zamanının kazandırılmasıdır. Çözüme ait görsel Şekil 4'te verilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere gerek evinden uzakta fındık toplayan insanlar, gerek yazın memleketine giden memurlar ve gerekse de gurbetçiler evleri hakkında önemli parametreleri (sıcaklık, nem, basınç, hırsız, elektrik bilgisi, gaz kaçağı) internet olmadan anında öğrenebilecektir.



Şekil 4. Proje çözüme ait görsel (Visual of the project solution)

3. bölümde bahsedilen tüm donanımlar bir araya getirilerek sistem, evde kullanılabilir bir hale dönüştürülmüştür. Solidworks programında katım model tasarımı yapılan cihaz, 3D yazıcıda eklemeli imalat yöntemi ile PLA plastikten üretilmiş ve evde kullanıma hazır hale getirilmiştir. Cihaz içerisindeki tüm donanımlar; SMS yöntemi ile aktif/pasif edilebilmekte ve tüm ayarlamalar bu şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 5' de geliştirilen cihazın prototip hali görülmektedir.



Şekil 5. Geliştirilen cihazın priz üzerinden kullanımı (Usage of the developed device via socket)

Cihaz prize takılarak test edilmiştir. Cihaz içerisindeki sim kart üzerinden cihaz ile test amaçlı bir takım iletişim ve bilgi alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mesajlaşma örnekleri, cihazın verdiği cevaplar ve sensör bilgisi okumaya ait örnek iletişim görselleri Şekil 6'da görülmektedir.

Şekil 6. Mesajlaşma örnekleri, cihazın verdiği cevaplar ve sensör bilgisi okumaya ait örnek iletişim görselleri (Messaging examples, device responses and sample communication images of reading sensor information)

Yapılan detaylı literatür ve akademik araştırma sonucunda bu tarz bir çalışma örneğine rastlanılmamıştır. Yapılan çalışma bu yönü ile oldukça özgün bir yapıya sahip olup ticarileşebilme potansiyeli yüksek bir ürün durumundadır. Sms ile kullanıcı ekleme özelliği ile zahmetsizce ve sorunsuzca yeni kullanıcılarda eklenebilmekte, yeni kullanıcılar da bildirimlerden haberdar olabilmektedir. Ayrıca cihaz istenilen noktada (farklı mekanlarda) ve tak çıkar mantığı ile istenilen prize takmak sureti ile sorunsuzca kullanılabilir. Tüm bu özellikler, yerli-milli yazılım ile geliştirilmiş olan ürünün kodlarda ve tasarımda yenilikçi yönlerini ortaya koymaktadır. Tablo 2' de geliştirilen cihazın mevcut ticari ürünlerden üstün yanları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2. Geliştirilen cihazın mevcut ticari ürünler ile karşılaştırılması
(Comparison of the developed device with existing commercial products)

Özellik	Bu Çalışma	(Rotek, 2024)	(bqtek, 2024)	(kcm, 2024)
SMS ile haberleşebilme	Evet	Evet	Hayır	Evet
Sıcaklık/Nem algılama	Evet	Evet	Evet	Evet
Hareket Algılama	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Gaz algılama	Evet	Evet	Hayır	Evet
Deprem Algılama	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Sesli iletişim	Evet	Hayır	Evet	Hayır
Elektrik var/yok bilgisi	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
SMS ile sınır parametresi belirleyebilme	Evet	Hayır	Evet	Hayır
Tüm prizlere uyumluluk	Evet	Hayır	Hayır	Hayır

Şimdiye kadar incelenen benzer ticari ürünlerde bulunan başlıca sınırlamalar şunlardır:

- Evlerin veya binaların tamamını kapsamayan, her prize bağlanamayan veya bunun için ek donanım kurulmasını gerektiren kısa mesafeli Wi-Fi, Bluetooth ZigBee kablosuz teknolojiler olması,
 - Bu ürünlerin İnternet erişimi gerektirmesi nedeniyle uzak cihazlara veri aktarımında yaşanan sorunlar,
 - Wi-Fi, Bluetooth gibi kablosuz teknolojilerin, bilgisayar korsanlarının cihazın bağlandığı ev/ofis kontrolünü ele geçirmesine olanak sağlayabilecek önemli güvenlik açıklarının bulunması,
 - Yaygın olarak kullanılan kablosuz teknolojilerin yüksek güç tüketimi gerektirmesi,
 - Kullanılan sensörlerin doğruluğunun oldukça düşük olması (%5'in üzerindedir),
 - Veri toplamada yüksek çözünürlük sağlayamamaları,
 - Ev verilerinin yalnızca uygulamada veya web'de mevcut olması, kullanıcının bilgileri indirmesinin mümkün olmaması,
 - Çoğu ticari cihazın, özel olarak sakladığı bilgilerin indirilmesine izin vermeyen protokolleri kullanması,
- Ayrıca incelenen araştırma prototipleri ve ticari cihazlar, açık kaynak koduna sahip değildir. Bu, kullanıcıların bunları kendi özel ihtiyaçlarına göre uyarlayamayacağı anlamına gelir. Ticari ekipmanı değiştirmek için (şifre değişikliği, kullanıcı ekleme/çıkarma işlemleri vs.) ilgili firma ile görüşülmesi veya fazladan ücret ödenmesi gerekmektedir. Sunulan çalışmada ise bu ve benzeri işlemler, tanımlanan admin üzerinden SMS yolu ile kısa süre içerisinde gerçekleştirilebilmektedir. Yukarıda belirtilen sınırlamalara dayanarak, bu çalışmada geliştirilen prototip, şu ana kadar geliştirilen ticari prototipleri ve ekipmanları iyileştiren bir tasarım içermeyi amaçlamıştır.

Tablo 3, Yapılan çalışmanın literatüre katkısını sunmak amacıyla, geliştirilen cihazın literatürdeki farklı araştırmacılar tarafından önerilen diğer önemli çalışmalar arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.

Tablo 3. Geliştirilen cihaz ile güncel literatürdeki diğer önemli çalışmalar arasında bir karşılaştırma
(A comparison between the developed device and other important studies in the current literature.)

Kaynakça	Denetleyici	Haberleşme Protokolü	Ölçülebilen Parametreler	Sensörler	Kullanım amacı
F. Sanchez-Sutil vd., 2023	Arduino Nano	LoRa	Voltaj, akım, güç, enerji	PZEM-004T (Akım Ölçer)	Doğrudan WI-Fİ
Thongkhao vd., 2016	ESP-WROOM02	Wi-Fi	Aktif, reaktif ve görünür enerji	STPM01	Elektrik enerjisi tüketimini izlemek
Musleh vd., 2017	Raspberry pi	Zigbee	Voltaj, akım	ACS712	Gerçek zamanlı güç tüketim davranışlarının analiz edilmesi
Dhaou vd., 2023	Raspberry Pi	Zigbee	Akımın, frekansın, güç faktörünün, aktif gücün ve reaktif gücün kök ortalama kare (RMS) değeri	ZMPT101B	Konut ve ticari binalardaki enerji ihtiyacını belirlemek
Aqeel-ur Rehman vd., 2021	Arduino UNO	WSN	Harcanan güç	YUN shield	Enerji tasarrufu sağlamak
Chen vd., 2021	WeMos D1 - ESP8266 Tabanlı Arduino Kartı	Wifi Access Point (WAP)	Akım ve Gerilim	ACS712, YS-1202CN3	Güç tüketimini ölçmek
Deng vd., 2023	STM32L432	Wi-Fi	Voltaj, akım	ACS733KLATR	Kısa devre, aşırı yük, ark ve toprak arızalarını tespit edebilmek
Zhang vd., 2020	STM32	Wi-Fi	Voltaj, akım, güç	HLW8012	Enerji tasarrufu sağlamak
Önerilen Sistem	Arduino Mega/ Nano	GSM (Sim800L)	Gerilim, akım, gaz, sıcaklık, basınç, nem, titreşim	DHT11, DS1302, MQ-5, HC-SR501, Li-Ion Batarya	Gıda güvenliği sağlamak, israfı azaltmak, anlık kesinti bilgisini iletmek, ev güvenliği sağlamak

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Akıllı priz sistemleri, genellikle elektrikli cihazları uzaktan kontrol edebilmek amacı ile tasarlanmaktadır. Bu sistemlerin amacı; daha verimli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve kesintisiz enerji sağlamaktır. Bu amaç ile ülkemizde farklı özelliklerde akıllı prizlerin satışı yapılmasına rağmen yerli üretimi konusunda sıkıntılar bulunmaktadır. Bu çalışmada yerli akıllı priz üretiminin yapılabilir olduğunu göstermek amacı ile Tübitak projesi kapsamında prototip üretimi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma ile ortaya çıkan üründe istenilen kadar kullanıcı tanımlanabilmekte, internetten bağımsız çalışma özelliği ile internet bağlantısı gerektirmeme, tüm prizlerde kullanılabilme, istenirse farklı donanımlar ile (ateş algılama, su algılama vs.) daha akıllı hale getirilebilme, SD kartta kayıtlı sesler ile ev ile konuşabilme, İstenildiğinde otonom hale getirilebilme (Hareket algılayıcıdan bilgi aldığı anda polisi veya ev sahibini kendi kendine arama ve sesli mesaj iletmeye gibi...), her telefona uyumlu çalışabilme, güvenli haberleşme imkânı sunma, taşınabilir, kolay kullanım, ergonomik tasarım gibi muadillerinden farklı ve özgün özellikler mevcuttur.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A 2023 Yılı 2. Dönem başvurusu kapsamında (7153 sıra nolu proje) desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Anonim, 2024. Elektrik Mühendisliğinin Tarihçesi, <http://www.yildiz.edu.tr/~inan/Elktarihce.htm> (Erişim Tarihi. 06. 05 2024)
- Anonim, 2024, <https://www.sevensensor.com/tr/elektrik-kesintisi-algilama-cihazı>, (Erişim Tarihi. 07. 04 2024)
- Anonim, 2024, <https://www.trendyol.com/diasithalat/elektrik-kesintisi-alarım-cihazı-elektrik-alarım-voltaj-kesinti-alarım-p-164384414>, (Erişim Tarihi. 03. 07 2024)
- Anonim, 2024, <https://www.dunya.com/ekonomi/1-saat-kesinti-18-milyon-tl-kaybettiriyor-haberi-344340>, (Erişim Tarihi. 03. 06 2024)
- Anonim, 2024, Evde daha fazla elektronik daha fazla evham mı demek?, <https://digitalage.com.tr/evde-daha-fazla-elektronik-daha-fazla-evham-mi-demek-arastirma/>, (Erişim Tarihi: 08.10.2024, Saat: 16.36)
- Anonim, 2024, Karanlıktan Aydınlığa, <http://www.olive.info.tr/?p=418>, (Erişim Tarihi: 05.07.2024, Saat: 18.32)
- Anonim, 2024, bqtek, <https://www.otomatikkapimarketim.com/brand/12/bqtek>, (Erişim Tarihi. 07. 06 2024)
- Anonim, 2024, kcmteknoloji, <https://kcmteknoloji.com.tr/>, (Erişim Tarihi. 07. 06 2024)
- Anonim, 2024, Roltek, <https://www.roltek.com.tr/blog/gsm-ile-alarım-uygulamaları/>, (Erişim Tarihi. 06. 06 2024)
- Amasya, H., Orhan, K., Alkan, A., 2022. Comparison of the Effect of the Time Under the Three Primary Color Lighting of LED Production Before Scanning of Phosphorus Plates. *European annals of dental sciences* (Online), 49(3), 131- 138. 10.52037/eads.2022.0040
- Aqeel-ur Rehman, Aqeel Raza Syed, Iqbal Uddin Khan, Ali Akber Mustafa, Muhammad Bilal Anwer, Umer Amir Ali, 2021. IoT-Enabled Smart Socket, *Wireless Personal Communications* 116:1151–1169, <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07043-5>
- Byun, J., Hong, I. Park, S. 2012. Intelligent Cloud Home Energy Management System Using Household Appliance Priority Based Scheduling Based on Prediction of Renewable Energy Capability', *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 4(58):1194-1201.
- Chen T. L., Kang T. C., Chang, C. Y. Hsiao T. C. and Chen C. C., 2021. Smart home power management based on Internet of Things and smart sensor networks, *Sens. Mater.*, vol. 33, pp. 1687-1702, 2021.
- Dandil, E., Demir, Y. M., 2020. Gerçek Zamanlı Araç Hız Ölçümü ve Takip Sistemi Tasarımı. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol.10, no.1, 2020, ss.13 - 27. 10.21597/jist.590782
- Deng, Z., Zhou, Y., Kamal, A., Na, R., Brown I. P. and Shen Z. J., 2023. Smart Plug 2.0: A Solid-State Smart Plug Device Preventing Fire and Shock Hazards, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 3, pp. 3140-3151, doi: 10.1109/TPEL.2022.3224483
- Dhaou, Imed Ben., 2023. Design and Implementation of an Internet-of-Things-Enabled Smart Meter and Smart Plug for Home-Energy-Management System, *Electronics* 12, no. 19: 4041. <https://doi.org/10.3390/electronics12194041>
- Duran, E., 2022. Arduino Nano Tabanlı Bir Eğitim Robotu Geliştirilmesi: myNanoBot. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 15(1), 25-33. 10.17671/gazibtd.948478
- Erol, E., 2007. Türkiye'de Elektrik Enerjisinin Tarihi Gelişimi: 1902–2000, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, İktisat Tarihi Bilim Dalı, İstanbul, 2007
- Er, I. K., 2021. Düşük Hidrojen Gaz Konsantrasyonunda Tungsten Katkılı ZnO İnce Filmlerin Gaz Sensörü Uygulamaları. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 1055- 1062. 10.2339/politeknik.747938
- Gençosman, M. N., 1960, Belediyecilikte aydınlatma vasıtaları ve tekâmülü, *İller ve Belediyeler Dergisi*, yıl 16, sayı 174, Nisan 1960, s. 152.
- Ghosh, A., Patil, K.A., Vuppala, S.K., 2013. PLEMS: Plug Load Energy Management Solution for Enterprises, *IEEE 27th International Conference on (AINA) Advanced Information Networking and Applications*, 25-28 March 2013, Barcelona, 25-32.
- Guo, Y., Wu, J., Long, C., 2013. Agent-based multi-time-scale plug load energy management in commercial building, *10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 12-14 June 2013, Hangzhou, 1884-1889
- Kıral, G., E. Akıllı Şebekelerde Enerji Yönetimi İçin Akıllı Priz Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014
- Kıyıcı, İ. Akıllı, Otonom ve Korunmalı Priz, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Aralık - 2019
- Morimoto, N., Fujita, Y., Yoshida, M., Yoshimizu, H., Takiyamada, M., Akehi, T., Tanaka, M., 2013. Smart Outlet Network for Energy-aware Services Utilizing Various Sensor Information, *27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, 25-28 March 2013, Barcelona, 1630-1635.
- Musleh, A., Debouza, M., & Farook, M., 2017. Design and Implementation of Smart Plug: An Internet of Things (IoT). In *Approach. 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*. <https://doi.org/10.1109/ICECTA.2017.8252033>
- Olgun, O., Nakir, i., 2019. Türkiye'deki Pasif Kızılötesi Sensörlü Aydınlatma Armatürlerinin Işıksal ve Elektriksel Performanslarının Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol.0, no.16, 2019, ss.765- 775. 10.31590/ejosat.579306
- Sarısamam, S., 2019. Bringing Electricity to Afyonkarahisar During the First Years of The Republic, *Akademik Bakış*, (12), 24.
- Shajahan, A.H., Anand, A., 2013. Data acquisition and control using Arduino-Android Platform: Smart plug, *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, 10-12 April 2013, Nagercoil.
- Sanchez-Sutil, F., Cano-Ortega, A., 2023. Smart plug for monitoring and controlling electrical devices with a wireless communication system integrated in a LoRaWAN. *Expert Systems with Applications* 213, 118976
- Sümbül, H., Çolak, H., 2020. Robotik Kodlama Eğitim Setinin Tasarlanması ve Oluşturulması. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4 (2), 103-109. DOI: 10.30516/bilgesci.672296

- Thongkhao Y., and Pora, W., 2016. A low-cost Wi-Fi smart plug with on-off and Energy Metering functions. *13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, pp. 1-5, doi: 10.1109/ECTICon.2016.7561264.
- Veleva, S., Davcev, D., 2012. Data Mining as an Enabling Technology for Home Energy Management System, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 16-20 January 2012, Washington.
- Yumurtacı, M., 2023, Çok Fonksiyonlu Akıllı Masa Saati. *Journal of Materials and Mechatronics:A (Online)*, vol.4, no.1, 2023, ss.271 - 285. 10.55546/jmm.1273687
- Zhang, M., and Du.J., 2020. Design and development of smart socket based on STM32. *J. Comput. Methods Sci. Eng.* 20, 227-243.

Ekler (Appendix):

Sözde Kod (Pseudocode)

```
// GLOBAL VARIABLES
boolean STATE_RELAY_1, STATE_RELAY_2, STATE_RELAY_3, STATE_RELAY_4
int BUTTON_1, BUTTON_2, BUTTON_3, BUTTON_4
int RELAY_1, RELAY_2, RELAY_3, RELAY_4
int buzzer
// MAIN LOOP
function main():
  LoadStateEEPROM() // EEPROM'dan röle durumlarını yükle
  while true:
    if sim800.available():
      buff = sim800.read() // GSM modülünden gelen mesajı oku
      caller_id = getCallerID(buff)
      cmd = getMsgContent(buff)
      doAction(cmd, caller_id) // Mesaja göre işlem yap
      listen_push_buttons() // Buton durumlarını dinle
// HANDLE GSM MESSAGES
function doAction(cmd, caller_id):
  if cmd equals "1on" or cmd equals "1off":
    controlRelay(1, cmd equals "1on", caller_id)
  else if cmd equals "2on" or cmd equals "2off":
    controlRelay(2, cmd equals "2on", caller_id)
  else if cmd equals "3on" or cmd equals "3off":
    controlRelay(3, cmd equals "3on", caller_id)
  else if cmd equals "4on" or cmd equals "4off":
    controlRelay(4, cmd equals "4on", caller_id)
  else if cmd equals "d1" to "d4":
    sendStatus(toInt(cmd.substring(1, 2)), caller_id)
  else if cmd contains "k2=" to "k5=":
    RegisterPhoneNumber(toInt(cmd.substring(1, 2)), getNumber(cmd), caller_id)
  else if cmd equals "liste":
    Reply(GetRegisteredPhoneNumbersList(), caller_id)
  else if cmd contains "sil=":
    DeletePhoneNumber(toInt(cmd.substring(4)), caller_id)
  else if cmd equals "sil=hepsi":
    DeletePhoneNumberList()
    Reply("Butun telefon numaralari silindi", caller_id)
  else if cmd equals "sicaklik":
    sicaklik(caller_id)
  else if cmd equals "nem":
    nem(caller_id)
  else if cmd contains "s1=" or "s2=":
    sicaklik_limit(toInt(cmd.substring(1, 2)), getLimit(cmd), caller_id)
  else if cmd equals "s1":
    Reply("Sicaklik 1 : " + readFromEEPROM(offsetsicak[0]) + " derece idi", caller_id)
  else if cmd equals "s2":
    Reply("Sicaklik 2 : " + readFromEEPROM(offsetsicak[1]) + " derece idi", caller_id)
  else if cmd equals "slimit":
    Reply(GetRegisteredsicaklikList(), caller_id)
  else if cmd equals "tesekkurler":
    Reply("rica ederim :)", caller_id)
  else if cmd equals "kullanici":
    Reply("Kullanici Sayisi : " + String(kayitli_no) + " kisi", caller_id)
  else if cmd equals "elektrik":
    elektrk(caller_id)
  else:
    Reply("HATA: Bilinmeyen komut: " + cmd, caller_id)
// BUTTON LISTENER
function listen_push_buttons():
  for each button in BUTTON_1 to BUTTON_4:
    if digitalRead(button) == HIGH:
```

```
controlRelay(button - BUTTON_1 + 1, not STATE_RELAY(button - BUTTON_1 + 1), caller_id)
buzz()
// CONTROL RELAY FUNCTION
function controlRelay(relay_no, status, caller_id):
    digitalWrite(RELAY(relay_no), status)
    EEPROM.update(totalMemory + relay_no, status)
    Reply("Role " + String(relay_no) + " " + (status ? "ON" : "OFF"), caller_id)
// BUZZER ANIMATION FUNCTION
function buzz():
    for i from 0 to 5:
        digitalWrite(buzzer, HIGH)
        delay(100 * (i + 1))
        digitalWrite(buzzer, LOW)
        delay(100 * (i + 1))
// EEPROM OPERATIONS
function LoadStateEEPROM():
    STATE_RELAY_1 = EEPROM.read(totalMemory + 1)
    STATE_RELAY_2 = EEPROM.read(totalMemory + 2)
    STATE_RELAY_3 = EEPROM.read(totalMemory + 3)
    STATE_RELAY_4 = EEPROM.read(totalMemory + 4)
    digitalWrite(RELAY_1, STATE_RELAY_1)
    digitalWrite(RELAY_2, STATE_RELAY_2)
    digitalWrite(RELAY_3, STATE_RELAY_3)
    digitalWrite(RELAY_4, STATE_RELAY_4)
// UTILITY FUNCTIONS
function getCallerID(buff):
    // GSM mesajından caller ID'yi al
function getMsgContent(buff):
    // GSM mesajından içerik kısmını al
function getNumber(text):
    // GSM mesajından telefon numarasını al
function getLimit(text):
    // GSM mesajından sıcaklık limitini al
function Reply(text, caller_id):
    // GSM üzerinden mesaj gönder
```