



FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU DERGİSİ

Journal of Natural and Applied Sciences

agustos



2025
ISPARTA



SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Cilt 29, Sayı 2, Yıl 2025

SÜLEYMAN DEMİREL UNIVERSITY
Journal of Natural and Applied Sciences

Volume 29, Issue 2, Year 2025

DERGİ HAKKINDA

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (SDÜ Fen Bil Enst Der), 1995 yılında kurulmuş bir bilimsel araştırma dergisidir. SDÜ Fen Bil Enst Der, 2001 yılından itibaren mühendislik ve mimarlık bilimleri, tarım ve orman bilimleri ve temel bilimler alanlarında düzenli olarak Nisan, Ağustos ve Aralık aylarında yılda üç sayı yayımlanan ulusal ve uluslararası hakemli-indeksli bir dergidir. Yayımlanmak üzere gönderilen bütün makaleler; hakemler ve editörler tarafından değerlendirilir. Makaleleri değerlendiren hakemlerin isimleri yazarlara bildirilmez. Dergide, Türkçe veya İngilizce dillerinde yazılmış orijinal araştırma makaleleri yayımlanmakta olup; teknik not, editöre mektup, tartışma, vaka takdimi ve derleme türünde bilimsel çalışmalar yayımlanmamaktadır. İngilizce dilinde yazılmış orijinal araştırma makaleleri yayımlanma önceliğine sahiptir. Dergiye yayımlanmak için gönderilen makalelerden herhangi bir değerlendirme ve başvuru ücreti alınmamaktadır.

ABOUT THE JOURNAL

Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences (SDU J Nat Appl Sci) is a scientific research journal founded in 1995. SDU J Nat Appl Sci is a national and international indexed journal with referees, which has been published in the areas of engineering and architecture sciences, agriculture and forestry sciences and fundamental sciences three times in a year including in April, August and December, regularly since 2001. Articles submitted to the journal for publication are evaluated by referees, editorial board and editor. Names of referees evaluating the articles aren't informed to the authors (Blind peer review). The full-length original research articles written in Turkish or English language are published, but technical notes, letters to the editors, expositions and surveys are not published in the journal. The full-length original scientific research articles written in English language have the priority of publication. The Journal of Natural and Applied Sciences does not charge any publication or processing fee.

SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

İMTİYAZ SAHİBİ

Mehmet SALTAN, Prof. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi Adına (Rektör)

BAS EDİTÖR

Mert Şekerci, Doç. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

EDİTÖRLER

Mevlüt Ersoy, Doç. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

Buket Çapalı, Dr. Öğr. Üyesi

Süleyman Demirel Üniversitesi

ALAN EDİTÖRLERİ

Tahir Tilki, Prof. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

Abdullah Kaplan, Prof. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

Mehmet Gürdal, Prof. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

Ayşin Sev, Prof. Dr.

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

İsmail Serkan Üncü, Prof. Dr.

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

İrfan Kaymaz, Prof. Dr.

Erzurum Teknik Üniversitesi

Kübra Çamur, Prof. Dr.

Gazi Üniversitesi

Özgür Akkoyun, Prof. Dr.

Dicle Üniversitesi

Ramazan Şenol, Prof. Dr.

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Selda Tekin Özcan, Prof. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

Tendü Hilal Göktuğ, Prof. Dr.

Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

Volkan Emre Uz, Prof. Dr.

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Alev Yüksel Aydar, Doç. Dr.

Manisa Celâl Bayar Üniversitesi

Ali Silahtar, Doç. Dr.

Sakarya Üniversitesi

Ceren Karaman, Doç. Dr.

Akdeniz Üniversitesi

Gizem Karakan Günaydın, Doç. Dr.

Pamukkale Üniversitesi

Gür Emre Güraksın, Doç. Dr.

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Hasan Özdoğan, Doç. Dr.

Antalya Bilim Üniversitesi

Murat Varol, Doç. Dr.

Akdeniz Üniversitesi

Yiğit Ali Üncü, Doç. Dr.

Akdeniz Üniversitesi

Yusuf Yılmaz, Dr. Öğr. Üyesi

Pamukkale Üniversitesi

DANIŞMA KURULU

A. K. M. Rezaur Rahman, Prof. Dr.

University of Chittagong, Bangladeş

Chris McMahon, Prof. Dr.

University of Bristol, Birleşik Krallık

Jameel-Un Nabi, Prof. Dr.

University of Wah, Pakistan

Jorge Manuel Cárdenas Callirgos, Prof. Dr.
Dr. Universidad Ricardo Palma, Peru

Masoumeh Malek, Prof. Dr.
University of Tehran, Iran

Mohammad Mursaleen, Prof. Dr.
Aligarh Muslim University, Hindistan

Panagiotis Kyratsis, Prof. Dr.
University of Western Macedonia,
Yunanistan

S. Abdul Mohiuddine, Prof. Dr.
King Abdulaziz University, Suudi Arabistan

Snežana M. Urošević, Prof. Dr.
University of Belgrade, Sırbistan

Stojan Radenović, Prof. Dr.
University of Belgrade, Sırbistan

Martin Bohner, Prof. Dr.
Missouri University of Science and
Technology, ABD

Vincenzo Salzano, Prof. Dr.
University of Szczecin, Polonya

Mohamed Belgaid, Prof. Dr.
University of Sciences and Technology
Houari Boumediene, Cezayir

Sabina Olaru, Dr.
National R&D Institute for Textiles and
Leather, Romanya

Sadaf Kayani, Doç. Dr.
Mohi-ud-din Islamic University,
Pakistan

Lucia Mele, Dr.
University of Naples Federico II, İtalya

Victor Surugiu, Doç. Dr.
Alexandru Ioan Cuza” University of Iaşi,
Romanya

TEKNİK EDİTÖRLER

Remzi Gürfidan, Doç. Dr.

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Hilal Kartal, Arş. Gör.

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Cem Deniz Kumral, Öğr. Gör.

Isparta Uygulamalı Bilimler
Üniversitesi

DİL EDİTÖRÜ

Nihan Erdemir, Doç. Dr.

Süleyman Demirel Üniversitesi

DERGİ SEKRETARYASI

Barış Sezgin, Dr. Öğr. Üyesi

Süleyman Demirel Üniversitesi

SÜLEYMAN DEMİREL UNIVERSITY JOURNAL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PRIVILEGE OWNER

Mehmet SALTAN, Prof. Dr.

On Behalf of Süleyman Demirel University (Rector)

EDITOR IN CHIEF

Mert Şekerci, Assoc. Prof. Dr.

Süleyman Demirel University

EDITORS

Mevlüt Ersoy, Assoc. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Buket Çapalı, Assist. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

SECTION EDITORS

Tahir Tilki, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Abdullah Kaplan, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Mehmet Gürdal, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Ayşin Sev, Prof. Dr.
Mimar Sinan Fine Arts University

İsmail Serkan Üncü, Prof. Dr.
Isparta University of Applied Sciences

İrfan Kaymaz, Prof. Dr.
Erzurum Technical University

Kübra Çamur, Prof. Dr.
Gazi University

Özgür Akkoyun, Prof. Dr.
Dicle University

Ramazan Şenol, Prof. Dr.
Isparta University of Applied Sciences

Selda Tekin Özcan, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Tendü Hilal Göktuğ, Prof. Dr.
Aydın Adnan Menderes University

Volkan Emre Uz, Prof. Dr.
Izmir Institute of Technology

Alev Yüksel Aydar, Assoc. Prof. Dr.
Manisa Celâl Bayar University

Ali Silahtar, Assoc. Prof. Dr.
Sakarya University

Ceren Karaman, Assoc. Prof. Dr.
Akdeniz University

Gizem Karakan Günaydin, Assoc. Prof. Dr.
Pamukkale University

Gür Emre Güraksın, Assoc. Prof. Dr.
Afyon Kocatepe University

Hasan Özdoğan, Assoc. Prof. Dr.
Antalya Science University

Murat Varol, Assoc. Prof. Dr.
Akdeniz University

Yiğit Ali Üncü, Assoc. Prof. Dr.
Akdeniz University

Yusuf Yılmaz, Dr.
Pamukkale University

ADVISORY BOARD

A. K. M. Rezaur Rahman, Prof. Dr.
University of Chittagong, Bangladesh

Jameel-Un Nabi, Prof. Dr.
University of Wah, Pakistan

Chris McMahon, Prof. Dr.
University of Bristol, United Kingdom

Jorge Manuel Cárdenas Callirgos, Prof. Dr.
Universidad Ricardo Palma, Peru

Masoumeh Malek, Prof. Dr.
University of Tehran, Iran

Mohammad Mursaleen, Prof. Dr.
Aligarh Muslim University, India

Panagiotis Kyratsis, Prof. Dr.
University of Western Macedonia, Greece

S. Abdul Mohiuddine, Prof. Dr.
King Abdulaziz University, Saudi Arabia

Snežana M. Urošević, Prof. Dr.
University of Belgrade, Serbia

Mohamed Belgaid, Prof. Dr.
University of Sciences and Technology
Houari Boumediene, Algeria

Martin Bohner, Prof. Dr.
Missouri University of Science and
Technology, ABD

Victor Surugiu, Assoc. Prof. Dr.
Alexandru Ioan Cuza” University of
Iasi, Romania

Stojan Radenović, Prof. Dr.
University of Belgrade, Serbia

Sadaf Kayani, Assoc. Prof. Dr.
Mohi-ud-din Islamic University, Pakistan

Sabina Olaru, Dr.
National R&D Institute for Textiles and
Leather, Romania

Vincenzo Salzano, Prof. Dr.
University of Szczecin, Poland

Lucia Mele, Dr.
University of Naples Federico II, Italy

TECHNICAL EDITORS

Remzi Gürfidan, Assoc. Prof. Dr.
Isparta University of Applied Sciences

Hilal Kartal, Res. Assist.
Afyon Kocatepe University

Cem Deniz Kumral, Lecturer
Isparta University Of Applied Sciences

LANGUAGE EDITOR

Nihan Erdemir, Assoc. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

SECRETARIAT

Barış Sezgin, Assist. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

İÇİNDEKİLER / TABLE OF CONTENTS

Sayfa / Pages

Araştırma Makaleleri- Research Articles

1- Akıllı Kirişlerin Dinamik Özelliklerinin Araştırılması256-267	
<i>Investigation of Dynamic Characteristics of Smart Beams</i>	
<i>Elif Nur Selçuk, Ekrem Gülsevinler, Hatice Akman, Gökçenur Çakmak Keçelioğlu, Mustafa Reşit Usal</i>	
2- Vision Transformer-Based Blood Group Classification on Slide Images268-277	
<i>Lam Görüntülerinde Görü Dönüştürücü Tabanlı Kan Grubu Sınıflandırması</i>	
<i>Tansel Uyar</i>	
3- Nanohidroksiapatit Katkılı PMMA, PS ve PVA Nanokompozit Membranların Hazırlanması ve Karakterizasyonu278-303	
<i>Preparation and Characterization of Nanohydroxyapatite Doped PMMA, PS and PVA Nanocomposite Membranes</i>	
<i>Tuğba Sardohan Köseoğlu, Emine Gönen</i>	
4- In Vitro Cytotoxicity and Cell Migration Activities of Lipid Extracted from <i>Chlorella Sorokiniana</i> Shihira & R.W.Krauss Exposed to Nitrogen Stress304-311	
<i>Azot Stresine Maruz Kalan Chlorella Sorokiniana Shihira & R.W.Krauss'dan Ekstrakte Edilen Yağın Yara İyileştirme Özelliklerinin Değerlendirilmesi</i>	
<i>Betül Yılmaz Öztürk, Bükay Yenice Gürsu, Halima Al-Thawr, İlknur Dağ</i>	
5- Yüksek Dayanımlı Betonlarda Uluslararası Standartlardaki Elastik Modüllerin Karşılaştırılması312-326	
<i>Comparison of Elastic Modules in High-Strength Concretes in International Standards</i>	
<i>Nevbahar Ekin</i>	
6- Theoretical Insight For The Diels-Alder Reaction Mechanism Between Pyrrole And Acrylonitrile327-334	
<i>Pirol Ve Akrilonitril Arasındaki Diels-Alder Reaksiyon Mekanizmasının Teorik Olarak İncelenmesi</i>	
<i>Aslı Öztürk Kiraz</i>	
7- Dizel Motorlarda Silindir İçi Basınç Tahmini için Veri Odaklı Makine Öğrenimi Modellerinin Performans Analizi335-349	
<i>Performance Analysis of Data-Driven Machine Learning Models for In-Cylinder Pressure Prediction in Diesel Engines</i>	
<i>Ahmet Karaoğlu, Hüseyin Söyler</i>	
8- Bilişsel Haritalar ve Mekân Algısı: ODTÜ Kampüsü Üzerine Bir İnceleme350-359	
<i>Cognitive Maps and Spatial Perception: A Study on the METU Campus</i>	
<i>Neşe Aydın, Elvan Kumtepe, Aynur Uluç Keçik</i>	
9- Parsiyal Hepatektomi ile Tetiklenen Karaciğer Rejenerasyonunda Olası Mitokondriyal Fizyon Mekanizmasının Araştırılması 360-365	
<i>Investigation of Possible Mitochondrial Fission Mechanism in Liver Regeneration Triggered by Partial Hepatectomy</i>	
<i>Ayşe Özmen Yaylacı, Mediha Canbek</i>	
10-Innovative Bioactive Zirconia Glass Ceramics: Combining Radiation Protection and Biocompatibility366-374	
<i>Yenilikçi Biyoaktif Zirkonya Cam Seramikleri: Radyasyon Zırhlama ve Biyouyumluluğun Birleşimi</i>	
<i>Özge Kılıçoğlu</i>	
11-Isparta Işıkkent Mahallesi Pomzalı Zeminin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi375-387	
<i>Determination of Dynamic Properties of Pumice Soil in Isparta Işıkkent District</i>	
<i>Kutay Güler, S. Nilay Keskin</i>	
12-Sistem Çağrısı Verilerinde Derin Öğrenme Mimarileri Kullanılarak Anomali Tespitinin Değerlendirilmesi: Performans ve Enerji Verimliliği388-396	
<i>Evaluation of Anomaly Detection in System Call Data Using Deep Learning Architectures: Performance and Energy Efficiency</i>	
<i>İbrahim Şanlıhalp, Mehmet Yıldız</i>	
13-Annealing Effects on Cu ₂ ZnSnSe ₄ Thin Films: Structural, Electrical, and Optical Characterization397-406	
<i>Cu₂ZnSnSe₄ İnce Filmleri Üzerindeki Tavlama Etkileri: Yapısal, Elektriksel ve Optik Karakterizasyon</i>	
<i>Duygu Takanoglu Bulut, Koray Yılmaz, Orhan Karabulut</i>	
14-Synthesis, Structural Analysis and Comparison with Theoretical Calculations of Heterocyclic Disperse Diazo Dyes407-414	
<i>Heterosiklik Dispers Diazo Boyalarının Sentezi, Yapısal Analizi ve Teorik Hesaplamalarla Karşılaştırılması</i>	
<i>Aykut Demirçalı</i>	
15-Development of a System for Translating Frequently Used Turkish Sign Language Words into Text for Deaf or Hard of Hearing Individuals415-425	
<i>İşitme Engellilere Yönelik Türk İşaret Dilinin Em Çok Kullanılan Kelimelerini Yazıya Çeviren Sistem Tasarımı</i>	
<i>Ayşe Nur Ay Gül, Nazife Nur Atukeren, Ahmet Orkun Öviç , Nuriye Sırmalı</i>	
16-Predicting bc ⁻ Meson Mass Spectra Using Neural Network with Combined Cornell and Quadratic Potentials426-433	
<i>Birleştirilmiş Cornell ve Kuadratik Potansiyeller ile Sinir Ağı Kullanarak bc⁻ Mezon Kütle Spektrumlarının Tahmini</i>	
<i>Tarık Akan</i>	

17-Çizgelerde Ağırlıklı Bağlama Sayısı Üzerine	434-439
<i>On the Weighted Binding Number of Graphs</i> Şevket Keser, Ersin Aslan	
18-Corrosion Performance and Protection of Centrifuged Hot-Dip Galvanized Coatings (CHDG) on St37 Steel Hooks in GFRC Façade Systems: A Case Study	440-451
<i>GFRC Cephe Sistemlerinde St37 Çelik Kancalar Üzerinde Santrifüjlü Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamaların (CHDG) Korozyon Performansı ve Korunumu: Bir Vaka Çalışması</i> Hüsnü Gerengi, Muhammed Maraşlı, Doğu Ramazanoğlu, Kader Coşkun, Mesut Yıldız, Gözen Bereket	
19-RMR, Q ve RMQR Kaya Kütle Sınıflama Sistemlerinin Demirkapı Tüneli'ne (İbradı-Antalya) Uygulanması	452-464
<i>Application of RMR, Q and RMQR Rock Mass Classification Systems to Demirkapı Tunnel (Ibradı-Antalya)</i> Muhammet Beyhan, Mahmut Mutlutürk	
20-Pandemi Süreçlerinde S-I-R Gruplarının Tahmini: Farklı Regresyon ve Diferansiyel Modellerin Performans Analizi	465-473
<i>Prediction of S-I-R Groups in Pandemic Processes: A Performance Analysis of Various Regression and Differential Models</i> Hamit Armağan, Ulaş Yamancı	
21-Effect of Different Types of FRP Placed Between Layers on Flexural Properties of Laminated Timber.....	474-482
<i>Tabakalar Arasına Yerleştirilen Farklı FRP Türlerinin Lamine Kerestelerin Eğilme Özellikleri Üzerine Etkisi</i> Yasemin Şimşek Türker, Şemsettin Kılınçarslan, Simla Ünal	
22-A Hybrid Retrieval and Generation Framework for Radiology Report Summarization with Faiss Indexing and T5 Transformers	483-492
<i>Faiss İndeksleme ve T5 Dönüştürücüleri ile Radyoloji Rapor Özetleme için Hibrit Bir Erişim ve Üretim Çerçevesi</i> Ayhan Arisoy	
23-Simulation and Optimization of the Thermal Performance of Polymer Composite Materials Produced by 3d Printing	493-501
<i>3D Baskı ile Üretilen Polimer Kompozit Malzemelerin Termal Performansının Simülasyonu ve Optimizasyonu</i> Selim Bacak	

Akıllı Kirişlerin Dinamik Özelliklerinin Araştırılması

Elif Nur SELÇUK¹, Ekrem GÜLSEVİNÇLER², Hatice AKMAN³, Gökçenur ÇAKMAK KEÇELİOĞLU¹,
Mustafa Reşit USAL⁴

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Isparta, Türkiye

²Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye

³Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

⁴Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 31.05.2024, Kabul / Accepted: 19.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Akıllı kirişler,
Harmonik yükleme,
Sönümleme,
Piezo sensör.
PLA.

Öz: Sağlık sektöründe, robotik sistemlerde ve endüstride kullanılan cihazların kullanım ömrü ve performansı dinamik yüklemelere maruz kaldıklarında verdikleri tepkilerle doğrudan ilişkilidir. Dinamik yüklemeler sonucunda ortaya çıkan titreşimler stabilitesi ve mekanik performansı üzerinde kritik etkilere sahiptir. Bu nedenle, dinamik yükleme altındaki titreşim davranışının analiz edilmesi, özellikle biyomekanik uygulamalar kapsamında önem taşımaktadır. Özellikle biyolojik doku simülasyonları üzerinde gerçekleştirilen titreşim analizleri, sistemlerin dinamik yanıtlarının belirlenmesi ve güvenilirliğinin artırılmasına yönelik temel bir adımdır. Polilaktik asit (PLA), hem yapay biyolojik doku üretiminde hem de üç boyutlu yazıcı filamenti için yaygın olarak tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarda, motor tahriki ile harmonik yük uygulanmış kirişler üzerinde konuma göre dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Kirişler üzerinde konum olarak üç düğüm noktası belirlenmiş ve bu noktalar arasına piezo sensörler yerleştirilerek analizler yapılmıştır. PLA kutu içerisine yerleştirilen kirişli sistemin sönümlü ve sönümsüz titreşimine bağlı olarak zaman analizi, doğal frekansı, sönümleme oranı incelenmiştir. Kirişlerin üretiminde iki farklı malzeme seçilmiştir. Metal malzeme olarak geleneksel yöntem ile imal edilmiş A366/CQ siyah çelik levha (Soğuk haddelenmiş sac-DKP) ve polimer malzeme olarak PLA filament kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalarımız sonucunda, her iki sistemin kararlı olma durumu serbest uç bölgesinde tespit edilmiştir. Çelik ve PLA kiriş için bahsedilen bölgedeki sönüm oranları deneysel olarak sırasıyla 0,227 ve 0,755 bulunmuştur. Sayısal sonuçlara göre ise çelik kirişli sistemin sönüm oranları [0,93; 0,93; 0,55; 0,55; 0,76; 0,76], PLA kirişli sistemin ise [1; 0,98; 0,98; 0,97; 0,97; 0,94; 0,94] olarak elde edilmiştir. Çalışma, malzeme ve sistem dinamiklerinin optimize edilmesi, titreşim kontrolü ve kararlılık artırmaya yönelik mühendislik uygulamalarına katkı sağlayabilecek bir referans niteliği taşımaktadır.

Investigation of Dynamic Characteristics of Smart Beams

Keywords

Smart beams,
Harmonic Load,
Damping,
Piezo sensor,
PLA.

Abstract: The service life and performance of devices used in the healthcare sector, robotic systems, and industry are closely associated with their response under dynamic loading conditions. Vibrations resulting from dynamic loads have a significant impact on stability and mechanical performance. Consequently, the analysis of vibration behavior under dynamic loading is of critical importance, particularly in biomechanical applications. Vibration analyses conducted on biological tissue simulations play a fundamental role in determining the dynamic responses of systems and improving their reliability. Polylactic acid (PLA) is widely utilized as a material for the production of artificial biological tissues and as a filament in 3D printing applications. In this study, experimental and numerical

investigations were carried out on beams subjected to harmonic loading via motor excitation, with dynamic analyses performed at specific positions. Three nodal points were identified on the beams, and piezoelectric sensors were placed between these points for analysis. The damped and undamped vibration responses of the beam system housed in a PLA box were analyzed in terms of time response, natural frequency, and damping ratio. Two different materials were used in beam production: A366/CQ black steel sheet (cold-rolled steel) manufactured using conventional methods as the metallic material, and PLA filament as the polymer material. Experimental and numerical results revealed that the stability of both systems was achieved at the free end region. The damping ratios in the specified region were experimentally determined as 0.227 for the steel beam and 0.755 for the PLA beam. Numerical results indicated that the damping ratios for the steel beam system were [0.93; 0.93; 0.55; 0.55; 0.76; 0.76], while those for the PLA beam system were [1; 0.98; 0.98; 0.97; 0.97; 0.94; 0.94]. This study provides a reference that can contribute to engineering applications focused on optimizing material and system dynamics, controlling vibrations, and enhancing stability.

1. Giriş

Titreşim, günlük hayatımızda çeşitli şekillerde karşımıza çıkan fiziksel bir olgudur [1]. Titreşim analizi, tıbbi cihazların tasarımında, kalite değerlendirmelerinde ve mekanik parçaların dayanım değerlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Dış ortam etkileri, makine titreşimleri, gürültü ve dinamik yüklere maruz kalan yapılarda meydana gelen mekanik titreşimler, bazı durumlarda çatlak oluşumuna ve sistemlerin rezonansa girmesine neden olabilmektedir [2]. Bir yapının titreşim ayarı ve kontrolü açısından, elektro-mekanik bağlantı faktörleri olan doğal frekans ve sönüm oranı, iki önemli belirleyici parametreyi oluşturmaktadır. Doğal frekans, bir sistemdeki serbest titreşimlerin karakteristik frekansı olarak tanımlanır ve bu, her saniyede gerçekleşen salınım sayısıdır. Sönüm ise, yapıda meydana gelen enerjiyi absorbe etme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Yapıya eklenen sönüm elemanları, dinamik yapıların ömrünü uzatmak, gürültü kirliliğini azaltmak ve yapının kompaktlığını artırmak gibi çeşitli avantajlar sağlamaktadır [3], [4]. Sönümleme oranı, salınımların ardışık tepe noktaları arasındaki logaritmik azalma ile tanımlanan birimsiz bir parametredir [5]. Titreşimleri azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla aktif, pasif ve hibrit titreşim kontrolü yöntemleri uygulanmaktadır. Titreşim kontrolünde genellikle piezoelektrik sensörler ve aktüatörler kullanılmaktadır [6], [7], [8]. Akıllı malzeme olan piezoelektrik malzemeler, bir enerji türünü başka bir enerji türüne dönüştürme özellikleri sayesinde çeşitli cihazlarda kullanılabilir [9]. Örneğin, biyomedikal alanda kullanılan elektrofizyolojik cihazlar, canlıların titreşimlerini elektriksel sinyallere dönüştürerek çeşitli hastalıkların teşhisinde yer almaktadır [10], [11], [12]. Titreşimi azaltmak amacıyla kullanılan bir diğer yöntem, piezo sensör ve aktüatörlerin yerleşim ve tasarımının optimizasyonudur. Poudrel ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kemik implantının stabilitesini ölçmek için piezo sensörlerin konumlandırma optimizasyonu

yapılmış ve titreşimin en az olduğu konum belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, en fazla 50 N darbe etkisi altında beş farklı bölgeye yerleştirilen piezo sensörler kullanılarak, implantın yerleşimine uygun en ideal konum belirlenmiştir [13]. Chhabra ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise alüminyum kiriş üzerine piezo sensör üç farklı pozisyona yerleştirilmiş ve piezo aktüatör ile tahrik edilmiştir [14]. Ghodsi ve ark. tarafından yapılan çalışmada, uçakların aktif titreşim kontrolünde piezo sensör ve aktüatör konumları ile yönü araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, konumun yapısal titreşim özelliklerinde önemli değişikliklere yol açtığı bulunmuştur [15]. Titreşim kontrolü, robotik sistemler ve esnek yapıların kontrolü gibi alanlardaki çalışmalarda, kirişler sıklıkla tercih edilmekte olup, bu yapıların dinamik analizleri detaylı bir şekilde incelenmektedir [16]. Sonsuz serbestlik derecesine sahip sürekli sistem olarak tanımlanan, bir ucu serbest, diğer ucu ankastre olan elastik kirişlere piezo sensör ve aktüatör eklendiğinde akıllı kiriş elde edilmektedir. Geleneksel malzemeler ise mikroişlemci, kontrol algoritmaları ve yapay zekâ eklentileri ile akıllı yapı davranışı sergileyebilmektedir [17].

İstenilen görev doğrultusunda hareket edebilen robotik sistemlerde, kavrama hareketi gibi esnek yapı tabanlı konumlandırma işlemlerinde genellikle motorlar kullanılmaktadır. Konumlandırma sırasında, tüm yapıların kavranması, dönme hareketleri, zayıf sönümleme ve çeşitli lineer olmayan etkiler nedeniyle karmaşık titreşimler meydana gelmektedir [18]. Sinyal jeneratörü ve motor gibi tahrik elemanlarıyla sisteme uyarı verilir ve çıkış sinyallerinin genlik değerleri genellikle osiloskop cihazı ile ölçülmektedir [19], [20]. Singh ve Nanda, çalışmalarında iki katmanlı ve kaynaklı bağlantılara sahip yapıların dinamik davranışını analiz etmişlerdir. Araştırmada, kirişlerin serbest ucu sinyal jeneratörü ile 0-500 Hz frekans aralığında uyarılarak osiloskop cihazından giriş ve çıkış sinyalleri alınmıştır. Sinyallerin genlik değerlerinden frekans analizi yapılmıştır [21]. Lin ve ark., yaptıkları çalışmada ince esnek plakaların motor

tahrikli dönüşünü servo motor kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapı, 1 Hz sinüs dalgası ile tahrik edilmiştir. İnce esnek plakaların motor tahriki ile titreşim hareketi doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Ayrıca, motor tekrarlayan hareket yaptığı için periyodik titreşim oluşturmaktadır. Burada oluşan istenmeyen karmaşık titreşimlerin azaltılmasında akıllı hibrit kontrol yaklaşımı kullanılmaktadır [18].

Piezoelektrik ve viskoelastik katmanlara sahip sandviç kirişlerin sönümlenme analizi için sonlu eleman metodu kullanılmaktadır [22]. Modal analiz, bir yapının titreşim karakteristiklerini (frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri) anlamada yardımcı olarak sorun giderme, simülasyon, tahmin ve tasarım optimizasyonu gibi süreçlerde kullanılabilir. ANSYS, mühendisler için yapı, titreşim, akışkanlar dinamiği, ısı transferi ve elektromanyetik gibi farklı disiplinlerin etkileşimlerini simüle etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanan genel amaçlı bir yazılımdır. ANSYS, CAD verilerini içe aktarabilme yeteneği ile geometri oluşturulmasına imkân tanırken, aynı önışlemci aracılığıyla hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli de oluşturulabilmektedir. Yüklemeler tanımlanıp analizler yapıldıktan sonra, sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak görüntülenebilmektedir [23]. Akıllı yapılar da genellikle ANSYS programı ile simüle edilebilmektedir [24]. Khalatkar ve ark., çalışmalarında alüminyum konsol kirişe yerleştirilen motor ile yaklaşık 850 d/d dönme hızıyla yedi farklı konumda titreşim üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kirişin serbest ucu, motordan gelen yükleri karşılamaktadır. Kiriş üzerine eklenen piezo sensör ile voltaj verilerini, nümerik analiz (ANSYS programı ile) ve deneysel olarak incelemişlerdir [25]. Sonlu elemanlar analizi için SOLID 45 ve SOLID 5 olmak üzere iki tip eleman seçilmektedir. Kiriş kısmı için SOLID 45 elemanı, piezoelektrik yama için ise SOLID 5 elemanı kullanılmıştır [26]. Vinayaga ve ark., ANSYS programında kiriş üzerine sensörleri 5 farklı bölgeye yerleştirerek uygun konumu belirlemeyi amaçlamışlardır. 100 kN yük ile kirişi tahrik ederek, kurşun zirkonat titanat (PZT) ve polivinilidinden florür (PVDF) olmak üzere iki farklı sensör ile çıkış sinyallerini elde etmişlerdir [27].

Üç boyutlu (3B) baskı üretim yöntemlerinden en yaygın olan eritilmiş biriktirme modelleme (EYM), malzeme ekstrüzyonu prensibi ile çalışan bir yöntemdir. Bu yöntem ile üretilen parçalar, biyomedikal (örneğin, fantom üretimleri), havacılık ve otomotiv sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanlarda tercih edilen malzemelerin başında polilaktik asit (PLA) yer almaktadır [28]. PLA ile üretilen numunelerin en önemli avantajlarından biri hafif olmalarıdır. Ayrıca, yüksek darbe dayanımı, basınç dayanımı ve sönümlenme yetenekleri nedeniyle PLA, en çok tercih edilen malzemelerden biridir [29]. Biyomedikal alanda, insan dokusuna benzerliği

nedeniyle toraks, kaburga, kafatası kemiği gibi karmaşık yapılarda kemik fantomu üretiminde PLA kullanılmaktadır [30], [31], [32]. Bu karmaşık geometrili ve hassas yapıların eklemeli imalat (Eİ) ile üretiminde birçok avantaj bulunmasına rağmen, filament rengi, parça oryantasyonu, malzeme tabakası kalınlığı, malzeme biriktirme hızı, nozul sıcaklığı, yatak sıcaklığı, dolgu tipi ve dolgu yoğunluğu gibi birçok parametrenin numunelerin mekanik özelliklerini etkileyebileceği yönünde birçok çalışma mevcuttur [33]. Literatürde, PLA malzemesi hakkında üretim yöntemi ve parametrelerinin değiştirilmesiyle ortaya çıkan mekanik özellik farklılıkları sıklıkla incelenmiş olsa da, bu yapılara dinamik yükleme sonucu meydana gelen titreşimin analizi ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır [34]. PLA, hafifliği ve nispeten yüksek sertliği sayesinde kafes yapılar, geçici koruyucu kaplamalar, çoklu rezonatör sistemleri, enerji emilimi ve titreşim sönümlenme gibi birçok yenilikçi uygulamada hafif tasarımlar için tercih edilmektedir [35], [36], [37]. A366/CQ siyah çelik levha (Soğuk haddelenmiş sac-DKP), iyi yüzey kalitesi, mükemmel şekillendirilebilirlik ve orta seviyede mukavemeti sayesinde yapı ve inşaat bileşenleri, otomotiv endüstrisi, makine ve ekipman üretimi, mobilya ve donanım, imalat ve metal işleme ile enerji sektöründe kiriş ve taşıyıcı sistemlerde tercih edilmektedir [38], [39].

Bu makalede, harmonik yüklemeye maruz bırakılan iki farklı malzemeden üretilmiş (polimer ve metal bazlı) akıllı kirişlerin deneysel ve nümerik dinamik analizi sunulmaktadır. Konum optimizasyonu yapabilmek için kirişler üzerinde titreşim modları dikkate alınarak üç düğüm noktası belirlenmiş ve bu düğüm noktaları arasına yerleştirilen piezo sensörler ile osiloskop cihazından alınarak mekanik uyarıcı cevabı (zaman cevabı) elektriksel sinyallere dönüştürülmüştür.

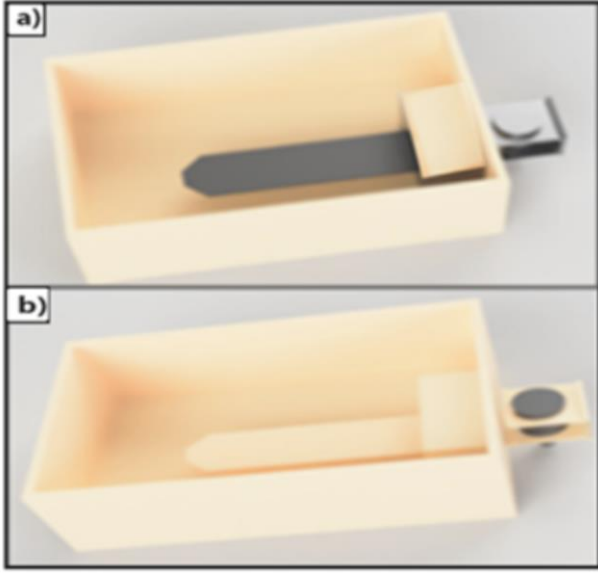
Kirişler üzerinden alınan verilerin doğal frekansı, sönümlenme oranı Python yazılımı ile bulunmuştur. Sistemin nümerik analizi için ANSYS programı kullanılmış, harmonik analiz ile frekans tepkileri elde edilmiştir. Frekans cevabından Bode diyagramı Python yazılımı ile çıkarılmış, bu diyagramdan transfer fonksiyonu elde edilerek sönüm oranları hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sistemin modellenmesi

Sistemi modellerken, bir ucu serbest, bir ucu ankastre olan kirişlerin yerleştirilmesi için 190x130x60 mm boyutlarında kutu şeklinde bir yapı tasarlanmıştır. Motor kuvveti kutunun dışından uygulandığından, kiriş **yarı ankastre** özellik göstermektedir. Kirişlerin boyutları 180x30x1.5 mm olup, motorun ve ankastre kirişin yerleştirildiği toplam uzunluk 70 mm'dir. Şekil 1'de, Fusion 360 öğrenci versiyonunda çizilip

modellenen çelik ve PLA kirişlerin CAD modeli gösterilmektedir.

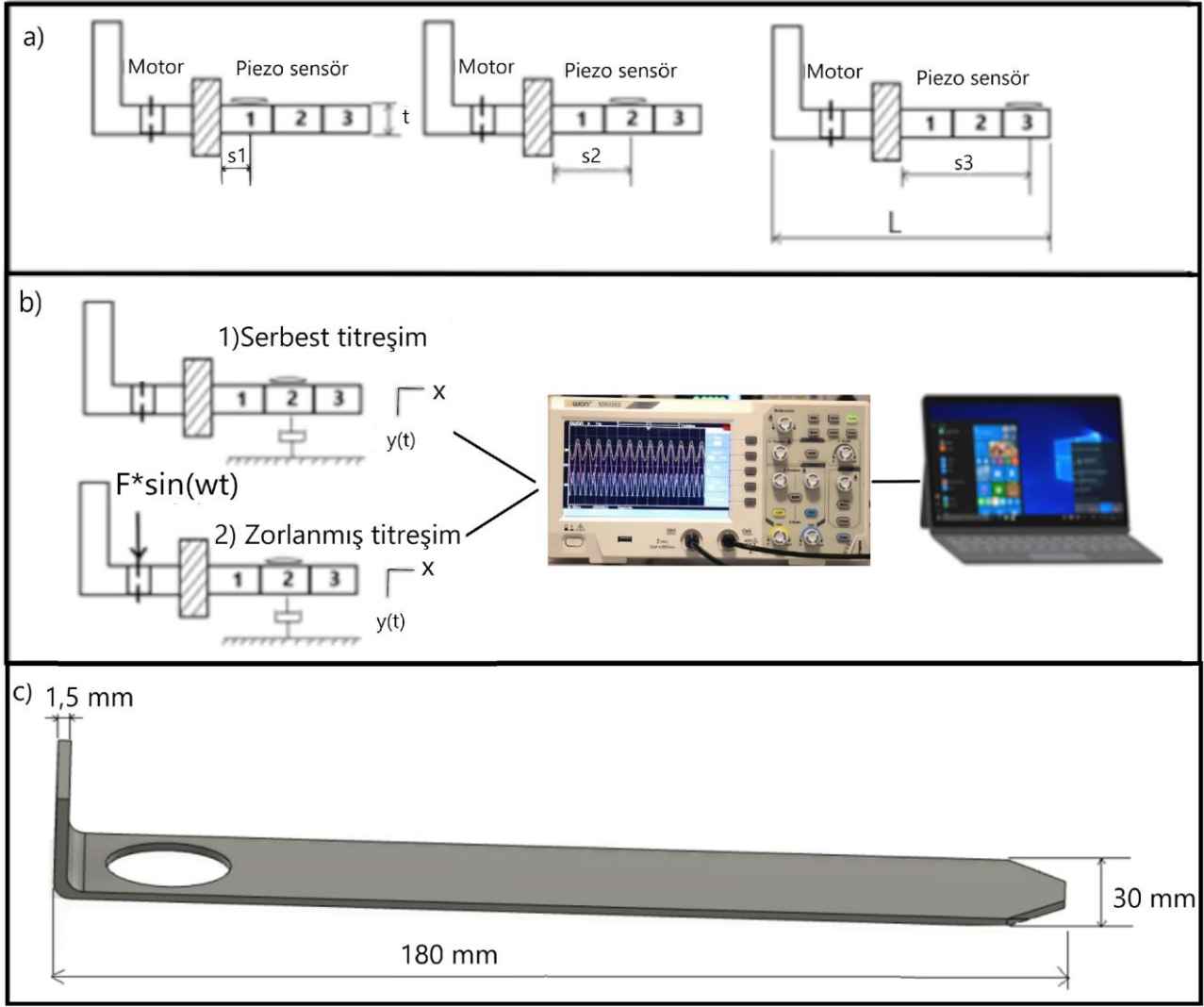


Şekil 1. a) Çelik ve **b)** PLA kiriş sistemlerinin dinamik analizi için Fusion 360 programında modellenmesi

Şekil 2’de, sistemin serbest cisim diyagramı ve tüm sistem için gerçekleştirilen işlemler görsel olarak sunulmaktadır. Sönümleyici olarak termojel malzemeden yapılmış kalıp kullanılmış ve bu kalıp kirişin tamamını kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. Kiriş üzerindeki titreşim modlarına bağlı olarak, sönümleyicinin konumlandırılması, titreşim enerjisinin en etkili şekilde sönümlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Kirişin doğal titreşim modlarında en yüksek genliğe ulaşan bölgeler, genellikle orta ve uç noktalardır. Bu nedenle, termojel malzemenin tüm kiriş boyunca yerleştirilmesi, sistemin bütününe entegre edilerek kirişin dinamik davranışını etkileyen bir unsur olarak ele alınmıştır. Yarı ankastre mesnetten itibaren sistem, üç düğüm

noktasına ayrılmış ve bu düğüm noktaları arasına yerleştirilen piezo sensörler, ayrı ayrı osiloskopa bağlanarak veriler termojel malzemenin varlığı (sönümlü) ve yokluğu (sönümsüz) koşullarında elde edilmiştir. Bu çalışmada, "**sönümlü**" ve "**sönümsüz**" terimleri, sistemin termojel malzemenin etkisi altında ve etkisi dışında gösterdiği davranışları tanımlamak için kullanılmıştır. PLA kutunun sönümleme davranışı, tüm sistemin sönümleme oranı hesaplamalarına dahil edilmiş ve bu etkinin dikkate alındığı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, sistem üzerinde **serbest ve zorlanmış titreşim analizi** gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 100 d/d hızında çalışan bir motor tahriki kullanılarak ve motor tahriki devre dışı bırakılarak iki farklı durum incelenmiştir. Motor tahriki, sistemde zorlanmış titreşimlerin oluşturulmasını sağlarken, tahrikin devre dışı bırakıldığı durumda serbest titreşim davranışları gözlemlenmiştir. Bu yöntem, sistemin dinamik özelliklerini hem harici bir tahrik altında hem de doğal frekanslar çerçevesinde detaylı bir şekilde incelemek için uygulanmıştır.

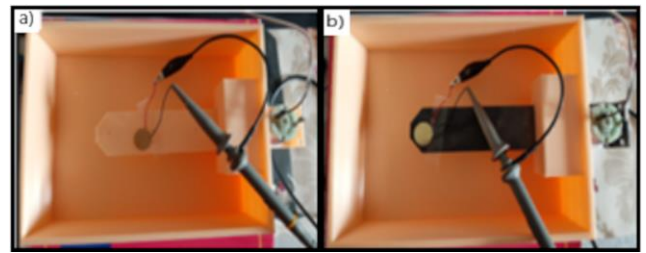
Kirişin serbest titreşim modlarına bağlı olarak üç düğüm noktası belirlenmiştir. Düğüm noktalarının konumu ve sayısı, kirişin mod şekilleriyle doğrudan ilişkilidir. Düğüm noktalarını tespit etmek için kirişin ikinci modundan başlayarak daha yüksek modlarındaki titreşim şekilleri analiz edilmelidir [40]. Genellikle birinci mod düğüm noktası içermezken, daha yüksek modlarda düğüm noktalarının sayısı artmakta ve konumları daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle, düğüm noktalarının eksiksiz bir şekilde tanımlanabilmesi için birden fazla titreşim modunun analiz edilmesi gerekmektedir [41], [42]. Literatürde yapılan çalışmalar ve taramalar göz önünde bulundurularak üç düğüm noktası tercih edilmiştir ve 1.bölge, 2.bölge, 3.bölge olarak adlandırılmıştır. Mesnete olan uzaklıkları s1, s2, s3, L sırasıyla 10, 46, 83, 180 mm, t kalınlığı ise 1.5 mm’dir.



Şekil 2. a) Piezo sensörlerin üç düğüm noktası arasına yerleşimi **b)** Sistemin serbest cisim diyagramı ve verilerin osiloskopa alınıp bilgisayara aktarılması **c)** Kirişin boyutlandırılması

2.2. Üretim parametreleri

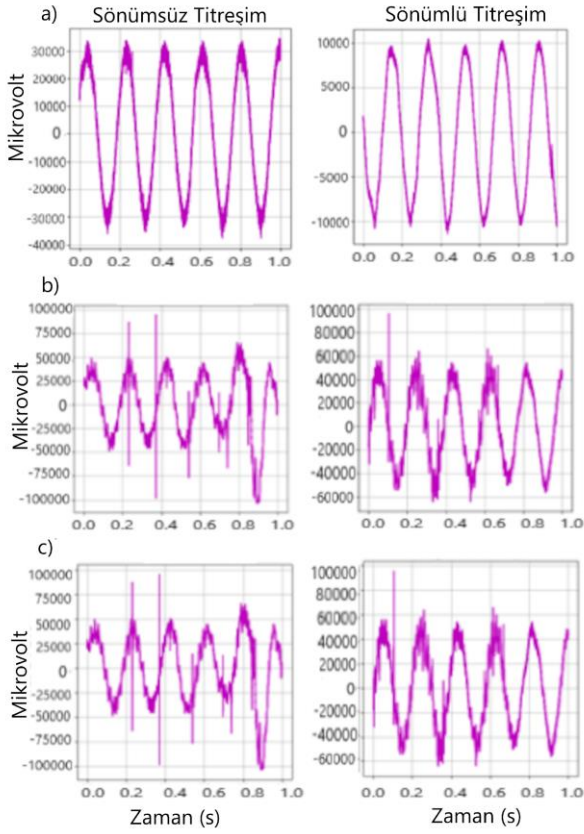
Tasarlanan model .stl formatına aktarılıp, Ultimaker CURA programında dilimlenmiş ve dilimlenen model GCODE dosyasına aktarılmıştır. Model, yazdırma sıcaklığı 210 °C ve tabla sıcaklığı 60 °C olarak 100 mm/s hızda Creality CR-10 Smart EYM yazıcı ile yazdırılmıştır. Akıllı kirişin oluşturulması için 15 mm çapında PZT malzemeden yapılmış piezo sensörler kullanılmıştır. Çalışma voltajı 2-5 V DC, toplam uzunluğu 37 mm olan titreşim motoru ile sistem tahrik edilmiştir. Bu çalışmada, motora 1,67 Hz (100 d/d) titreşim verilerek (Şekil 3) sistemin cevabı piezo sensör ile osiloskop cihazından Excel programına aktarılmış ve veriler alınmıştır.



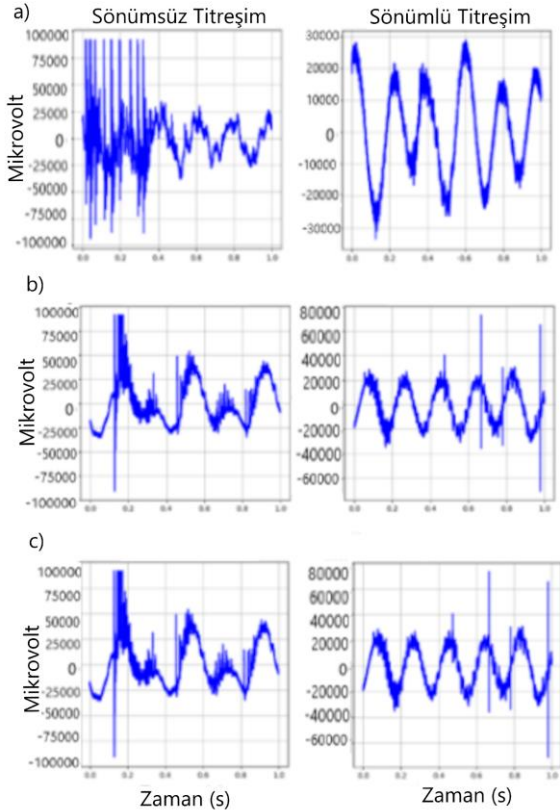
Şekil 3. a) PLA ve **b)** Çelik kiriş deneyleri

3. Bulgular

Sistemin sönümlü ve sönümsüz titreşim cevapları piezo sensörlerin yerleştirildikleri bölgeden ayrı ayrı veriler alınmıştır. Alınan veriler Python yazılımı ile çelik (Şekil 4) ve PLA (Şekil 5) kirişlerin zaman analizleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Çelik kiriş **a)** 1.bölge **b)** 2.bölge **c)** 3.bölge için sönümlü ve sönümsüz titreşim cevabına bağlı zaman analizleri.



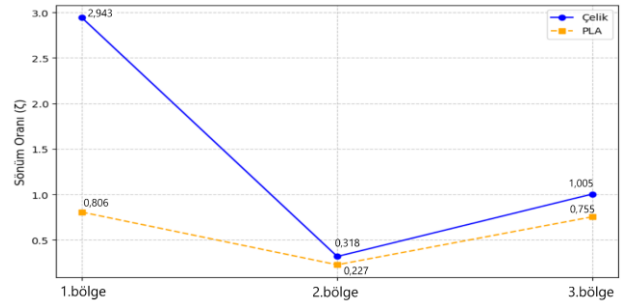
Şekil 5. PLA kiriş **a)** 1.bölge **b)** 2.bölge **c)** 3.bölge için sönümlü ve sönümsüz titreşim cevabına bağlı zaman analizleri

Kirişlerin sabit ve hareketli yükler altındaki serbest ve zorlanmış enine titreşimleri, mühendislik uygulamalarının birçok alanında önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, zorlanmış titreşim analizi kapsamında tahrik kuvveti, 1,67 Hz frekansında çalışan bir motor aracılığıyla uygulanmıştır. Motor, kiriş üzerinde doğrudan bir dönme hareketi veya titreşim üretebilecek periyodik bir kuvvet sağlamaktadır. Motorun çalışma sırasında ortaya çıkan dengesizlikleri, kiriş üzerinde periyodik bir kuvvet etkisi olarak kendini göstermiştir. Dengesiz kütlelerin neden olduğu kuvvet vektörü denklem 1 ile gösterilmiştir [43].

$$F = mR\omega^2 \quad (1)$$

Bu denklemdeki m dengesiz kütle, R geometrik merkezden dengesiz kütleye kadar olan yarıçap ve ω ise açısal hızdır. Bu durum, sistemin dinamik özelliklerini anlamak için zorlanmış titreşim koşullarının detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır.

Herhangi bir makinenin ya da sistemin titreşiminin kontrol edilmesi ve titreşim ayarlarının yapılabilmesi için doğal frekans ve sönümlenme oranlarını hesaplamak ya da kullanmak önemlidir [44]. Deneysel verilerden elde edilen sönümlü ve sönümsüz veriler Python yazılımı ile logaritmik artış oranı yöntemine göre sönüm oranları hesaplanmıştır (Şekil 6).



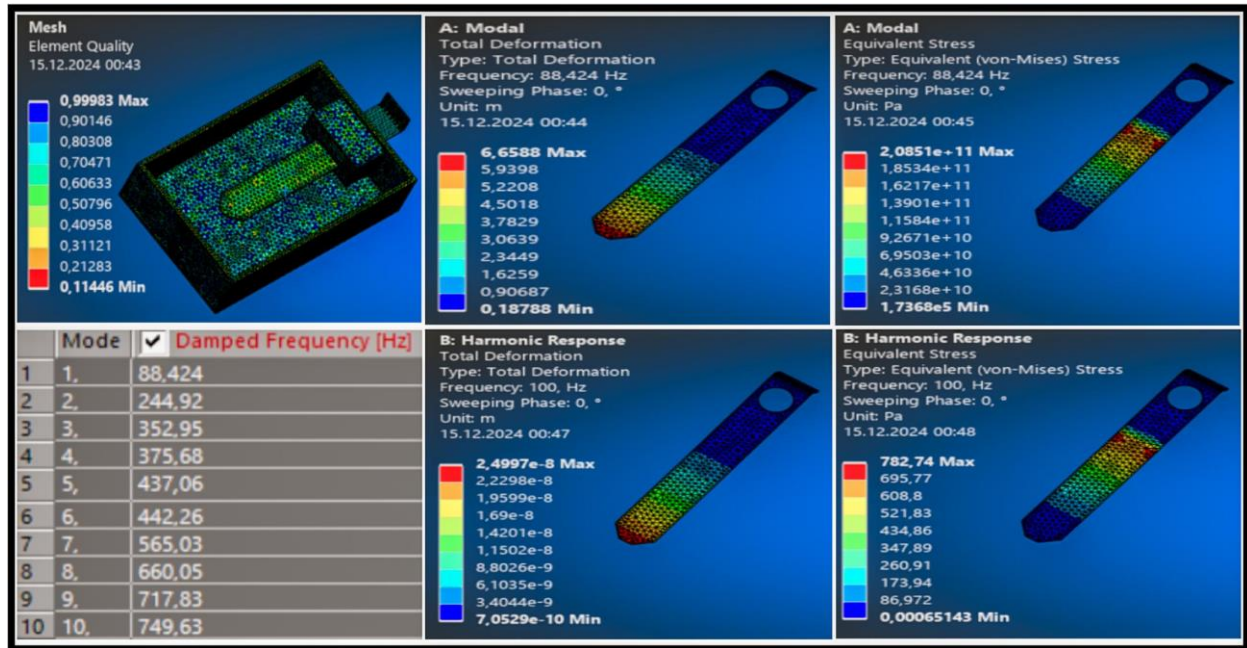
Şekil 6. Çelik ve PLA kirişlerin bölgelere göre deneysel sönüm oranları

Deneysel çalışmalardan sonra sistemin nümerik analizini yapmak için Fusion 360 programında oluşturulan sistem ANSYS programına aktarılmıştır. Projede ANSYS 15 öğrenci versiyonu kullanılmıştır. PLA ve çelik kirişin ayrı ayrı modal ve harmonik analizi yapılmıştır. Çelik kirişin elastisite modülü 208,2 GPa ve poisson oranı ise 0,30'dur [45]. PLA malzemenin elastisite modülü üretim parametrelerine, iç yapının doluluk oranına bağlı olarak değişim göstermektedir. Ticari olarak üretilen PLA'nın elastisite modülü genellikle 3200 MPa, poisson oranı ise 0,36'dır [46]. Piezo sensörün yoğunluğu 4500 kg/m³, elastik uyumluluk matrisi 13,90E10; 7,78E10; 7,43E10'dur [47]. Deneysel çalışmalar sonucunda çelik ve PLA kirişten oluşan her iki sistemin **deneysel olarak** ikinci bölgede kararlı olduğu belirlenmiş ve nümerik analizler bu bölgede

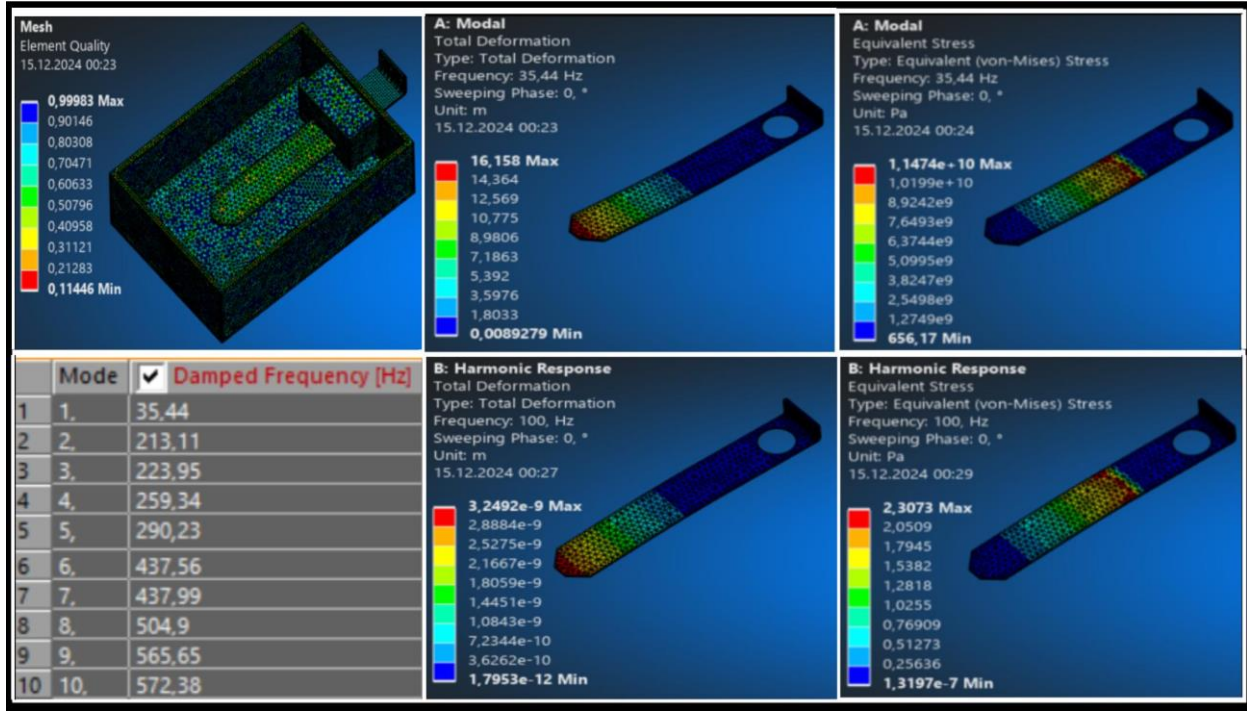
gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen modal analiz sonuçları, çelik için Şekil 7'de, PLA için ise Şekil 8'de sunulmuştur. ANSYS yazılımına aktarılan model üzerinde öncelikle meshleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Meshleme sırasında "element quality" kriteri kullanılmış ve eleman sırası olarak "quadratic" tercih edilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan geometri 6126 düğüm ve 2831 elemandan oluşmaktadır. Modal analizde, sınır koşulları tanımlanırken mesnet konumları modele uygun şekilde belirlenmiştir.

Harmonik analizde kirişe etki eden kuvveti bulabilmek için titreşim motoru kataloğundan

motorun tork değeri 0,022 Nm olarak tespit edilmiştir. Her iki kiriş için tork değeri, kiriş uzunlukları, elastise modülleri kullanılarak eğilme momenti hesaplanmış ve çelik ve PLA kirişlere etki eden kuvvetler sırasıyla 0,00248 N; 16,83 N olarak hesaplanmıştır. Motora verilen 100 d/d'lık hız 1,67 Hz olarak sisteme etki etmektedir. Bu yüzden zorlanmış titreşim için harmonik analizde açısal frekans 1,67 Hz olarak girilmiştir. Sınır şartları ve kuvvet değerleri ile harmonik analizde frekans cevabı elde edilmiştir. Munde vd. tarafından gerçekleştirilen araştırmada, PLA malzemesine ait doğal frekans değerleri birinci mod için 18,91 Hz, ikinci mod için 148,32 Hz ve üçüncü mod için 234,38 Hz olarak rapor edilmiştir [48].



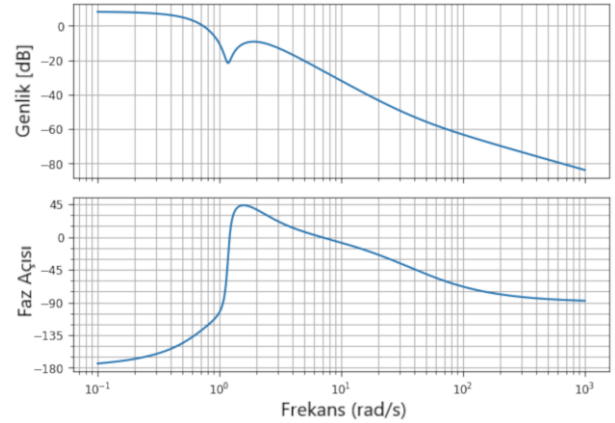
Şekil 7. Çelik kirişin ANSYS analiz sonuçları



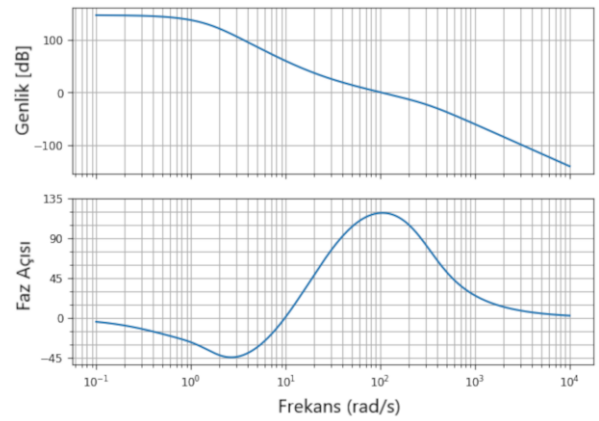
Şekil 8. PLA kiriş ANSYS analiz sonuçları

Cesnik vd. tarafından yapılan başka bir çalışmada ise PLA üretimindeki doluluk oranına bağlı parametrelere göre doğal frekansın değiştiği ve yaklaşık 250-650 Hz arasında olduğu tespit edilmiştir [49]. Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, çelik kirişin birinci moduna ait doğal frekans 88,424 Hz, ikinci moduna ait doğal frekans 244,92 Hz ve üçüncü moduna ait doğal frekans 352,95 Hz olarak tespit edilmiştir. PLA kirişin birinci moduna ait doğal frekans 35,44 Hz, ikinci moduna ait doğal frekans 213,11 Hz ve üçüncü moduna ait doğal frekans 223,95 Hz olarak tespit edilmiş olup, elde edilen sonuçlar literatürdeki bulgularla uyum göstermektedir.

Frekans cevabından Bode diyagramları çıkarılarak sistemin transfer fonksiyonu, sönüm oranı, kazancı, kesim frekansları, kararlı olup olmaması bulunabilmektedir [50], [51]. Bir sistemin giriş fonksiyonunun çıkış fonksiyonuna oranı olarak tanımlanan transfer fonksiyonu, sistemin frekans tepkisini vermektedir. Bu frekans tepkisini görselleştirmek için kullanılan grafiksel diyagrama ise Bode diyagramları denilmektedir [52]. Çalışmada, ANSYS programından elde edilen frekans cevabı sonuçları kullanılarak Python yazılımında çelik kirişli sistemin Bode diyagramları çizilmiş (Şekil 9) ve bu diyagramlar üzerinden transfer fonksiyonları elde edilmiştir.



Şekil 9. a) Çelik kirişin frekans tepkisinden elde edilen bode diyagramı



Şekil 10. PLA kirişin frekans tepkisinden elde edilen bode diyagramı

Çelik ve PLA kirişlere ait transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem 2 ve Denklem 3'te verilmiştir. Denklem 2'de görüldüğü üzere, çelik kirişli sistemin

transfer fonksiyonunun paydası 6. dereceden bir polinomdur; bu nedenle sistem, 6. dereceden bir dinamik sistemi temsil etmektedir. Benzer şekilde, PLA kirişli sistem ise 7. dereceden bir dinamik sistem olarak tanımlanmıştır.

$$TF_{\text{çelik}} = \frac{4,8e7s^5 - 1,82e9s^4 - 8,604e8s^3 - 1,361e9s^2 - 7,918e8s + 1,705e9}{7,56e8s^6 + 1,277e9s^5 + 8,633e8s^4 - 1,773e9s^3 + 8,072e8s^2 + 9,983e8s - 6,632e8} \quad (2)$$

$$TF_{PLA} = \frac{6,048e12s^7 + 3,629e14s^6 + 6,653e15s^5 + 3,629e16s^4 + 2,94e6s^3 + 6,09e8s^2 + 3,70e8s - 8,297e8s^3 - 1,892e9s^2 + 1,659e9s + 1,705e9}{6000s^7 + 2,94e6s^6 + 6,09e8s^5 + 3,70e8s^4 - 8,297e8s^3 - 1,892e9s^2 + 1,659e9s + 1,705e9} \quad (3)$$

Transfer fonksiyonundan sistemin kutupları ve sönüm oranları her iki kirişli sistem için de bulunmuştur. Çelik kirişli sisteme ait kutup matrisi $[-1,239 \pm 1,331j; -0,744; 0,539 \pm 0,575j; 0,552]$ 'dir. Kutupların kompleks düzlemdeki konumları sistemin kararlılığı ve dinamik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Gerçek kısmı negatif olan kutuplar kararlı dinamikleri işaret ederken, pozitif gerçek kısmı olan kutuplar kararsız dinamikleri göstermektedir. Büyük negatif gerçek kısmı olan kutuplar sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale geldiğini göstermektedir. Bununla birlikte, pozitif gerçek kısımlar veya düşük negatif değerler, sistemin kararlılık sınırına yakın olabileceğini ifade edebilir. Sistemlerin sayısal sönüm oranları da **frekans düzleminde modal analiz yöntemi** ile hesaplanmıştır. Sönüm oranları, sistemin dışarıdan gelen titreşimleri ne kadar hızlı sönümlendiğini belirleyen kritik bir parametredir. Çelik kirişli sistem için hesaplanan sönüm oranları $[0,681; 0,681; -0,683; -0,683]$ 'tür. PLA kiriş için bulunan kutup matrisi ise $[-244,692 \pm 203,287j; 1,188 \pm 0,486j; -1,163 \pm 1,099j; -0,666]$ 'dir. Sönüm oranları ise $[0,769; 0,769; -0,926; -0,926; 0,727; 0,727]$ 'dir. Pozitif sönüm oranları sistemin **sayısal kararlı** modlarını işaret ederken, negatif sönüm oranları bazı modların kararsız olabileceğine işaret etmektedir. Özellikle negatif sönüm oranlarının bulunması, sistemin bu modlarda dışsal kuvvetlere karşı **sayısal kararsız davranış** sergileyebileceğini göstermektedir.

Sistemlerin kararlılığını sağlamak veya artırmak için kullanılan yöntemler, sistemin fiziksel yapısına (mekanik, elektriksel, termal vb.) ve çalışma ortamına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak, kararlılığı artırmaya yönelik yöntemler arasında aktif ve pasif sönümleme teknikleri, kütle damperlerinin sisteme entegre edilmesi, kirişlerin boyut, kesit ve malzeme özelliklerinin optimize edilmesi, ileri besleme ve geri bildirim kontrol sistemlerinin uygulanması yer almaktadır [53]. Bunun yanı sıra, amortisör ve damper elemanlarının kullanımı, titreşim izolasyonu için bağlantı ve sabitleme noktalarının iyileştirilmesi, sistemin doğal frekanslarının rezonans bölgelerinden uzaklaştırılması ve enerji dağıtım yollarının optimize edilmesi gibi uygulamalar da yaygın olarak tercih edilmektedir [54]. Ayrıca, modal analiz, sayısal simülasyonlar ve deneysel doğrulama süreçleriyle

sistem dinamiklerinin ayrıntılı şekilde incelenmesi, kararlılık artırma stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde seçimi ve uygulanması, sistem performansını artırmak ve uzun vadeli işlevselliği sağlamak için kritik öneme sahiptir [55].

Yapılan bu çalışmada, her iki sistemi **sayısal kararlı** hale getirmek için sisteme geri bildirim kontrol sistemi (PID) Python yazılımı ile uygulanmıştır. Çelik kirişli sistem için geri besleme kazanç matrisi $K = [16,37; 149,35; 741,84; 2262,74; 4121,42; 3618,93]$ olarak bulunmuştur. Bu sistemin sönüm oranları ise $[0,93; 0,93; 0,55; 0,55; 0,76; 0,76]$ olarak hesaplanmıştır. Literatür taramasında PLA kirişin sönümleme oranı tarama açısı ve doldurma oranına göre değişmekte olup, genellikle 0,2-1 arasındadır [56], [57]. PLA kirişli sistem için ise geri besleme kazanç matrisi $K = [-473; -101378; -61270; 139403; 316889; -255304; -283773]$ olarak belirlenmiştir. Geri beslemeli PLA kirişli sistem için sönüm oranları ise $[1; 0,98; 0,98; 0,97; 0,97; 0,94; 0,94]$ olarak bulunmuştur ve literatürle uyumludur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, çelik ve PLA kirişlerden oluşan sistemlerin dinamik kararlılık analizi deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmiştir. İkinci bölgede her iki sistemin kararlı olduğu deneysel olarak belirlenmiş ve sayısal analizler bu bölgede gerçekleştirilmiştir. Çelik kirişli sistemin transfer fonksiyonu 6. dereceden bir dinamik sistem, PLA kirişli sisteminki ise 7. dereceden bir dinamik sistem olarak tanımlanmıştır. Transfer fonksiyonlarından elde edilen kutup matrisleri ve sönüm oranları, her iki sistemin dinamik özelliklerini ve kararlılığını belirlemiştir.

Çelik kirişli sistemde, negatif gerçek kısmı büyük olan kutuplar, sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale geldiğini göstermiştir. PLA kirişli sistemde ise bazı modların negatif sönüm oranlarına sahip olması, bu modlarda kararsız dinamikler sergileyebileceğini ortaya koymuştur. Her iki sistemin kararlılığını artırmak için geri bildirim kontrol yöntemi uygulanmış ve PID kontrol algoritması ile geri besleme kazanç matrisleri hesaplanmıştır. Bu yöntemle çelik kirişli sistemin sönüm oranları $[0,93; 0,93; 0,55; 0,55; 0,76; 0,76]$, PLA kirişli sistemin ise $[1; 0,98; 0,98; 0,97; 0,97; 0,94; 0,94]$ olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar, geri bildirim kontrolünün sistemlerin dinamik kararlılığını artırmada etkili bir yöntem olduğunu ve her iki sistemin titreşimlerini kontrol altına alabildiğini göstermiştir. Çalışma, malzeme ve sistem dinamiklerinin optimize edilmesi, titreşim kontrolü ve kararlılık artırmaya yönelik mühendislik uygulamalarına katkı sağlayabilecek bir referans niteliği taşımaktadır. Geri bildirim kontrol yöntemlerinin farklı yapı ve malzemelere sahip

sistemlerde uygulanabilirliği, gelecekteki çalışmalar için geniş bir araştırma alanı sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, FDK-2022-8789 proje numarası ile Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] M. P. (Michael P. Norton and D. G. (Denis G.) Karczub, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge University Press, 2003.
- [2] "S. Graham Kelly - Fundamentals of Mechanical Vibration-McGraw-Hill Science_Engineering_Math(2000)".
- [3] S. Saedi, E. Acar, H. Raji, S. E. Saghaian, and M. Mirsayar, "Energy damping in shape memory alloys: A review," Sep. 15, 2023, *Elsevier Ltd*.
- [4] M. N. Bajad, "Analytical approach for damping model," Jan. 01, 2023, *Institute for Ionics*.
- [5] M. Al Rifaie, H. Abdulhadi, and A. Mian, "Advances in mechanical metamaterials for vibration isolation: A review," Mar. 01, 2022, *SAGE Publications Inc*.
- [6] A. Raza, R. Rimašauskienė, V. Jūrėnas, and S. Mahato, "Experimental investigation of vibration amplitude control in additive manufactured PLA and PLA composite structures with MFC actuator," *Eng Struct*, vol. 294, Nov. 2023.
- [7] G. Song, P. Z. Qiao, and W. K. Binienda, "Active vibration damping of a composite beam using smart sensors and actuators," in *19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2001.
- [8] P. A. Jadhav and K. M. Bajoria, "Free and forced vibration control of piezoelectric FGM plate subjected to electro-mechanical loading," *Smart Mater Struct*, vol. 22, no. 6, Jun. 2013.
- [9] U. Shukla and K. Garg, "Journey of smart material from composite to shape memory alloy (SMA), characterization and their applications-A review," Jan. 01, 2023, *KeAi Communications Co*.
- [10] M. Al-Ayyad, H. A. Owida, R. De Fazio, B. Al-Naami, and P. Visconti, "Electromyography Monitoring Systems in Rehabilitation: A Review of Clinical Applications, Wearable Devices and Signal Acquisition Methodologies," Apr. 01, 2023, *MDPI*.
- [11] A. H. Umar, M. A. Othman, F. K. C. Harun, and Y. Yusof, "Dielectrics for Non-Contact ECG Bioelectrodes: A Review," Sep. 01, 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*.
- [12] B. Li, T. Cheng, and Z. Guo, "A review of EEG acquisition, processing and application," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, May 2021.
- [13] A. S. Poudrel, V. H. Nguyen, G. Haiat, and G. Rosi, "Optimization of a smart beam for monitoring a connected inaccessible mechanical system: Application to bone-implant coupling," *Mech Syst Signal Process*, vol. 192, Jun. 2023.
- [14] D. Chhabra, P. Chandna, and G. Bhushan, "Design and Analysis of Smart Structures for Active Vibration Control using Piezo-Crystals," 2011.
- [15] M. Ghodsi, M. Mohammadzahari, P. Soltani, and H. Ziaifar, "A new active anti-vibration system using a magnetostrictive bimetal actuator," *J Magn Magn Mater*, vol. 557, Sep. 2022.
- [16] S. Zhang, Y. He, L. Fan, and X. Chen, "Active vibration control of smart beam by μ -synthesis technology: modeling via finite element method based on FSDT," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022.
- [17] N. Jain, S. Nandu Ovhal, V. Patil, and K. Nani Kartik, "Smart materials – A state-of-the-art-review," *Mater Today Proc*, 2023.
- [18] C. Y. Lin and H. W. Jheng, "Active vibration suppression of a motor-driven piezoelectric smart structure using adaptive fuzzy sliding mode control and repetitive control," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 3, 2017.
- [19] G. Roy, B. Panigrahi, and G. Pohit, "Identification of crack by vibration analysis and restoration of dynamic response in beams using PZT sensor/actuator," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 38, no. 2, pp. 211–232, 2023.
- [20] B. Zhang, H. Li, S. Zhou, J. Liang, J. Gao, and D. Yurchenko, "Modeling and analysis of a three-degree-of-freedom piezoelectric vibration energy harvester for broadening bandwidth," *Mech Syst Signal Process*, vol. 176, Aug. 2022.
- [21] B. Singh and B. K. Nanda, "Dynamic analysis of damping in layered and welded beams," *Eng Struct*, vol. 48, pp. 10–20, Mar. 2013.
- [22] H. Boudaoud, E. M. Daya, S. Belouettar, L. Duigou, and M. Potier-Ferry, "Damping analysis of beams submitted to passive and active control," *Eng Struct*, vol. 31, no. 2, pp. 322–331, Feb. 2009.
- [23] "Ansys," 2024.
- [24] H. Karagülle, L. Malgaca, and H. F. Öktem, "Analysis of active vibration control in smart structures by ANSYS," *Smart Mater Struct*, vol. 13, no. 4, pp. 661–667, Aug. 2004.
- [25] A. Khalatkar, V. K. Gupta, and A. Agrawal, "Analytical, FEA, and Experimental Comparisons of Piezoelectric Energy Harvesting Using Engine

- Vibrations," *Smart Materials Research*, vol. 2014, pp. 1–8, Apr. 2014.
- [26] "Free vibration analysis of smart composite beam".
- [27] K. K. Vinayaga, A. Vasanthanathan, and P. Nagaraj, "Finite element modeling of smart piezoelectric beam using ANSYS®," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2018, pp. 7078–7085.
- [28] F. He, H. Ning, and M. Khan, "Effect of 3D Printing Process Parameters on Damping Characteristic of Cantilever Beams Fabricated Using Material Extrusion," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2023.
- [29] Y. S. Kushwaha, N. S. Hemanth, N. D. Badgayan, and S. K. Sahu, "Free vibration analysis of PLA based auxetic metamaterial structural composite using finite element analysis," *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 1063–1067, Jan. 2022.
- [30] E. N. Selçuk and M. Reşit, "BİYOMEKATRONİK BİR YAPI ELEMANI OLARAK KAFATASI FANTOMUNUN MÜHENDİSLİKTE KULLANIMI."
- [31] Y. H. Yu, T. Y. Yen, S. K. Hung, S. H. Chen, and K. Y. Wang, "A 3D-printed phantom for stereotactic body radiation therapy simulation," *Biomed Phys Eng Express*, vol. 10, no. 2, Mar. 2024.
- [32] G. B. Tseghai, B. Malengier, K. A. Fante, and L. Van Langenhove, "A long-lasting textile-based anatomically realistic head phantom for validation of eeg electrodes," *Sensors*, vol. 21, no. 14, Jul. 2021.
- [33] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polym Test*, vol. 69, pp. 157–166, Aug. 2018.
- [34] M. Trujillo, M. Curtin, M. Ley, B. E. Saunders, G. Throneberry, and A. Abdelkefi, "Influence of filament angle orientation on the dynamic characteristics of additively-manufactured beams," *Structures*, vol. 50, pp. 418–429, Apr. 2023.
- [35] S. Z. Gebrehiwot, L. Espinosa Leal, J. N. Eickhoff, and L. Rechenberg, "The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 6, no. 1, pp. 71–81, 2021.
- [36] M. Sethi, A. Banerjee, and B. Manna, "Vibration transmission through a cantilever beam in mass impacting metamaterial: An analytical investigation and experimentation," *Mech Syst Signal Process*, vol. 220, no. March, p. 111669, 2024.
- [37] S. R. Patro, A. Banerjee, and G. V. Ramana, "Vibration attenuation characteristics of finite locally resonant meta beam: Theory and experiments," *Eng Struct*, vol. 278, no. December 2022, p. 115506, 2023.
- [38] A. H. Orta, I. Kayabasi, and M. G. Senol, "Prediction of mechanical properties of cold rolled and continuous annealed steel grades via analytical model integrated neural networks," *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 47, no. 6, pp. 596–605, 2020.
- [39] G. N. Eremin, V. I. Parakhin, A. N. Shibanova, and A. E. Cheglov, "Prospects of Production and Application of Cold-Rolled Electrical Steel for Magnetic Cores of Rotary Electric Machines," *Steel in Translation*, vol. 51, no. 4, pp. 286–290, 2021.
- [40] S. M. Kusagur, G. Arunkumar, and T. C. Manjunath, "Modelling of smart intelligent materials with PZT & PVDF sensors/actuators to control the active vibrations of flexible aluminum mechanical cantilever beams using proportional integral derivative (PID) techniques," *Mater Today Proc*, vol. 37, no. Part 2, pp. 2075–2082, 2020.
- [41] P. Ghannadi, S. S. Kourehli, M. Noori, and W. A. Altabay, "Efficiency of grey wolf optimization algorithm for damage detection of skeletal structures via expanded mode shapes," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 13, pp. 2850–2865, 2020.
- [42] A. Ebrahimi-Tirtashi, S. Mohajerin, M. R. Zakerzadeh, and M. A. Nojoomian, "Vibration control of a piezoelectric cantilever smart beam by $\mathcal{L}_1$ adaptive control system," *Systems Science and Control Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 542–555, 2021.
- [43] L. P. Ponci, G. Creci, and J. C. Menezes, "Simplified procedure for vibration analysis and dynamic balancing in mechanical systems with beats frequency," *Measurement (Lond)*, vol. 174, no. October 2020, 2021.
- [44] M. Al Rifaie, H. Abdulhadi, and A. Mian, "Advances in mechanical metamaterials for vibration isolation: A review," Mar. 01, 2022, SAGE Publications Inc.
- [45] S. Takaki, T. MasuMura, and T. TsuchiyaMa, "Young's modulus of single crystalline iron and elastic stiffness," *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 106, no. 9, pp. 679–682, Sep. 2020.
- [46] A. Bagheri, I. Buj-Corral, M. Ferrer, M. M. Pastor, and F. Roure, "Determination of the elasticity modulus of 3D printed octet-truss structures for use in porous prosthesis implants," *Materials*, vol. 11, no. 12, Nov. 2018.
- [47] F. Li and G. Li, "Application of ANSYS APDL in the Design of Piezoelectric Transducer," 2015.

- [48] Y. Munde, A. S. Shinde, I. Siva, and P. Anearo, "Assessment of physical and vibration damping characteristics of sisal/PLA biodegradable composite," *Materials Physics and Mechanics*, vol. 51, no. 7, pp. 107–116, 2023.
- [49] M. Česnik, J. Slavič, and M. Boltežar, "Accelerated vibration-fatigue characterization for 3D-printed structures: Application to fused-filament-fabricated PLA samples," *Int J Fatigue*, vol. 171, 2023.
- [50] F. Golnaraghi and B. C. Kuo, "Ninth Edition."
- [51] Mehmet Önder EFE, *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Seçkin yayıncılık. 2024.
- [52] A. Atangana and A. Akgül, "Can transfer function and Bode diagram be obtained from Sumudu transform," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 4, pp. 1971–1984, Aug. 2020.
- [53] J. R. B. Jan Machowski, Zbigniew Lubosny, Janusz W. Bialek, *Power System Dynamics*. 2020. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=9X_PDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA19&dq=Methods+used+to+ensure+or+increase+the+stability+of+systems&ots=zP8ZJ0NTuA&sig=3wtzc2WwEK0DYEXeMS8IEuRBDnY&redir_esc=y#v=onepage&q=Methods+used+to+ensure+or+increase+the+stability
- [54] G. H. Yoon, H. Choi, and H. So, "Development and optimization of a resonance-based mechanical dynamic absorber structure for multiple frequencies," *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, vol. 40, no. 2, pp. 880–897, 2021.
- [55] J.-S. Wu, *Analytical and Numerical Methods for Vibration Analyses*. 2013. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=rSlwAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT7&dq=system+dynamics+numerical+analysis+for+vibration,&ots=Iz1gEjuQF0&sig=sGWksuYLDijUMFmH3Bg4WcIKHVY&redir_esc=y#v=onepage&q=system+dynamics+numerical+analysis+for+vibration%2C&f=false
- [56] G. Krivic and J. Slavič, "Simultaneous non-contact identification of the elastic modulus, damping and coefficient of thermal expansion in 3D-printed structures," *Polym Test*, vol. 125, 2023,
- [57] F. Medel, J. Abad, and V. Esteban, "Stiffness and damping behavior of 3D printed specimens," *Polym Test*, vol. 109, no. February, p. 107529, 2022.

Vision Transformer-Based Blood Group Classification on Slide Images

Tansel Uyar*¹ 

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

(Alınış / Received: 03.03.2025, Kabul / Accepted: 15.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Blood Group, Image
Processing, Classification,
Vision Transformer

Abstract: Blood is an essential fluid in the human body, enabling the transport of oxygen and nutrients. In cases of accidents, persistent hematological illnesses, or surgical procedures, blood transfusions are imperative for the restoration of lost blood volume. Therefore, it is imperative to ascertain the patient's blood type prior to any blood transfusion. In contemporary applications of blood group determination, the utilization of test serums (Anti-A, Anti-B, Anti-D) that facilitates the precipitation of antigens within the bloodstream has become a prevailing practice. Blood groups are determined by detecting the presence of antigens according to the precipitation of antigens. The observation of precipitation on slides is conducted by the laboratory specialist. However, this observation process can be arduous and time-consuming, requiring sustained attention for extended periods. Consequently, machine vision has emerged as a prevalent tool in contemporary automated approaches, mitigating the expert load required for these processes. Machine vision is a field that is constantly evolving, and one of the most current methods employed is the use of vision transformers. The objective of the present study was to achieve high-accuracy classification of blood groups by employing vision transformers for the purpose of discrimination. The study examined a classification application and its results using a vision transformer for machine vision, a technique particularly suited to automation systems in laboratory settings. The findings of experimental studies have indicated the notable efficacy of vision transformers in the classification of blood groups. In antigen detection, an average accuracy of 98.08% for stochastic gradient descent moment optimizer and 98.74% for adaptive moment estimation optimizer was obtained. In the detection of Rh protein, an average accuracy of 89.84% for stochastic gradient descent moment optimizer and 97.16% for adaptive moment estimation optimizer was obtained. Furthermore, experimental findings have indicated that the Adaptive Moment Estimation optimizer when employed in conjunction with vision transformers attains better classification performance.

Lam Görüntülerinde Görü Dönüştürücü Tabanlı Kan Grubu Sınıflandırması

Anahtar Kelimeler

Kan Grubu, Görüntü İşleme,
Sınıflandırma, Görü
Dönüştürücü

Öz: Kan, insan vücudunda oksijen ve besin taşınmasını sağlayan temel bir sıvıdır. Kazalar, kalıcı hematolojik hastalıklar veya cerrahi prosedürler durumunda, kaybedilen kan hacminin geri kazanılması için kan transfüzyonları zorunludur. Bu nedenle, herhangi bir kan transfüzyonundan önce hastanın kan grubunun belirlenmesi zorunludur. Kan grubu tespitinin güncel uygulamalarında, kan dolaşımındaki antijenlerin çökmesini kolaylaştıran test serumlarının (Anti-A, Anti-B, Anti-D) kullanımı yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Kan grupları, antijenlerin çökmesine göre antijenlerin varlığının tespit edilmesiyle belirlenir. Slaytlardaki çökmenin gözlemlenmesi laboratuvar uzmanı tarafından gerçekleştirilir. Ancak, bu gözlem süreci zorlu ve zaman alıcı olabilir ve uzun süreler boyunca sürekli dikkat gerektirebilir. Özetle, makine görüşü güncel otomatikleştirilmiş yaklaşımlarda yaygın bir araç olarak ortaya çıkmış ve bu süreçler için uzman yükünü azaltmıştır. Makine görüşü sürekli gelişen bir alan olmakla birlikte kullanılan en güncel yöntemlerden biri de görü dönüştürücüleridir.

Sunulan çalışmanın amacı, kan gruplarının ayrımı amacıyla görü dönüştürücülerini kullanarak kan gruplarının yüksek doğrulukta sınıflandırılmasını elde etmektir. Çalışmada, özellikle laboratuvar ortamlarındaki otomasyon sistemleri için uygulanabilecek bir teknik olan makine görüşü yaklaşımında görü dönüştürücü yönteminin kullanımıyla gerçekleştirilen bir sınıflandırma uygulaması ve sonuçları incelenmiştir. DeneySEL çalışmaların bulguları, görü dönüştürücülerinin kan gruplarının sınıflandırılmasında dikkate değer bir başarıya sahip olduğunu göstermiştir. Antijen tespitinde stokastik gradyan iniş moment eniyileyici için ortalama %98,08 ve uyarlamalı moment tahmini eniyileyici için ortalama %98,74 oranında bir doğruluk elde edilmiştir. Rh proteinin tespitinde ise stokastik gradyan iniş moment eniyileyici için ortalama %89,84 ve uyarlamalı moment tahmini eniyileyici için ortalama %97,16 oranında bir doğruluk elde edilmiştir. Öte yandan, deneySEL bulgular, Uyarlamalı Moment Tahmini eniyileyicinin görü dönüştürücüleriyle birlikte kullanıldığında daha iyi sınıflandırma performansı elde ettiğini göstermiştir.

1. Introduction

Blood is a vital fluid in the human body, facilitating the movement of oxygen and essential nutrients via the heart along circulatory pathways. It comprises erythrocytes, leukocytes, plasma, and thrombocytes [1]. In the event of an accident, chronic hematological disorder or surgical operation, the body requires replenishment of lost blood through transfusion from a donor. Prior to conducting a blood transfusion, it is essential to perform a comprehensive array of compatibility assessments, referred to as pretransfusion tests [2,3]. One such compatibility assessment is the blood group evaluation. The determination of blood group can be fundamentally characterized as the identification of specific antigens present on red blood cells [4]. According to the aforementioned definition, the blood group system is a classification system predicated on the presence or absence of antigens in human blood. The ABO blood group system, initially described by Karl Landsteiner in 1900, underwent a renaming in 1907 by Dr. Ludwik Hirszfeld and Dr. Emil Von Dungern, who classified it as the A, B, AB, and O blood group system [5]. A significant study on the determination of blood groups was conducted by Landsteiner and Wiener in 1940, which is widely regarded as a foundational research in the field [6]. In this study, researchers found that antiserum created by injecting blood samples from the Macaca rhesus monkey into rabbits caused aggregations in the blood of 85% of white Americans [6]. The newly discovered factor was designated "Rh" by the authors, deriving its name from the Rhesus monkey. Individuals carrying the Rh factor in their red blood cells were categorized as positive (+) for this factor, while those lacking the factor were designated as Rh negative (-) [7]. The standard procedure for determining blood group involves the administration of tests for A, B, and D (Rh) antigens. However, tests

for antigens other than those mentioned are only conducted in exceptional circumstances [4]. The utilization of test kits is essential in the detection of A, B, and D (Rh) antigens. These kits contain serum fluids that facilitate the precipitation of the specific antigens. Depending on the precipitation or non-precipitation status of these three antigens, eight blood group combinations are formed. Following the application of the test kit, the sedimentation conditions are examined visually, and the blood group is determined.

While these visual inspections are typically conducted manually by laboratory experts, the use of automated methods in automated systems is also gaining popularity [8-13]. The existing literature includes approaches such as image processing, machine learning, and deep learning in the studies carried out for automated determination of blood group. In the context of image processing, methodologies employed in related studies include pixel counting with edge detection subsequent to thresholding [14-19], morphological operations with thresholding [20], and image matching technique [21]. In the study of Ayan et al., after implementing adaptive thresholding, edge detection and morphological operations were sequentially executed [14]. It was reported that 99% accuracy was obtained from the test images of the Gel Test Method. In the study of Atıcı et al., after implementing global thresholding, morphological operations and edge detection operations were applied, respectively, and pixel numbers were used as features [15]. As a result of the classification of the test images, 84.61% accuracy was achieved. Similar approaches have been applied in other studies [16-21]. With the exception of one study, no information regarding the testing processes was shared in the other studies [16-20]. According to the findings of the study conducted by Odeh et al., the proposed method demonstrated a 99.6% accuracy rate [21]. In the

context of machine learning research, classification studies have been conducted employing various classifiers, including Support Vector Machine (SVM), Decision Tree (DT), Linear Discriminant Analysis (LDA), Logistic Regression (LR), and K-Nearest Neighbor (KNN), Artificial Neural Network (ANN) in conjunction with features such as entropy, mean, standard deviation, contrast, energy, correlation, and homogeneity, subsequent to segmentation [22-25]. In the study by Rosales et al., features were generated with the gray-level co-occurrence matrix (GLCM), which is utilized in texture analysis and training processes were carried out [22]. Variants of SVM, DT, KNN LDA and LR machine learning methods were used as classifiers. A classification approach is proposed based on the presence of sedimentation in segmented image patches with binary classification. It has been reported that the presence of sedimentation was detected with 97% accuracy using Coarse DT. In the study by Dannana et al., training was performed with an SVM classifier using mean, standard deviation, entropy, variance and kurtosis features after segmentation [23]. The study reported an accuracy value of 92.37% for the 8-class classification. In the study conducted by Mahmood, it was reported that 99.7% accuracy rate was achieved with the ANN classifier [24]. In the study of Ferraz et al., the presence of sedimentation was classified using SVM from individual features obtained for different types of ROI image patches [25]. It was reported in the study that F1-Score values ranging from 52.63% to 100% were obtained. Several studies have been conducted employing the deep learning approach, which represents one of the most advanced methodologies in blood group classification. In the study by Balaji et al., the classification performance of the convolutional neural network (CNN) structure proposed by the study group was compared with that of the AlexNet and LeNet networks [26]. In the study, it was reported that 46.07% training accuracy was achieved with AlexNet, 97.79% with LeNet, and 96.69% with the proposed model. In the study conducted by Titus et al., the classification process was performed by detecting sedimentation and non-sedimentation cases with the CNN-based segmentation network suggested by the study group [27]. In the study, it was reported that the average sensitivity value was 86.29% and the average specificity value was 83.98%. In a further study undertaken by Aboubaker, the classification performances of the CNN structure proposed by the researcher were compared with those of ResNet, AlexNet and VGG-16 networks to investigate the potential correlation between fingerprints and blood

groups [28]. In a separate study, Shen et al. examined the classification performance of gel test method images using the improved AlexNet network [29]. In the study, it was reported that the test accuracy value of the gel test method images was obtained as 96.9%.

In recent years, one of the most current approaches that can compete with CNN-based methods is that of vision transformers (ViT). ViTs are one of the most frequently preferred models in the field of natural language processing used in processing texts, and ViTs emerged by combining the self-attention mechanism with patch-based architecture and applying it to images [30,31]. A gap in literature was identified by the absence of studies examining the performance of vision transformers in blood group classification of slide images. Therefore, in the present study, the classification performance of vision transformers was investigated using a dataset of slide images.

2. Material and Method

In the material and method section, a concise overview of the methods employed, a comprehensive description of the analyzed data, and the precise specifications of the experimental parameters of the analysis are provided under the respective headings.

2.1. Vision transformers

ViT represents a deep learning model that assigns distinct weights to each component of the image input data, incorporating an attention mechanism [32]. The ViT model, as depicted in Figure 1, involves the transformation of the input image (x ; $x \in R^{H \times W \times C}$) into a series of smaller image pieces, each with dimensions smaller than the original image. Each reconstructed image part (p) is projected onto the z_0 vector using a learned embedding matrix (E) with the equation (1).

$$z_0 = [x_{class}; x_p^1 E; x_p^2 E; \dots; x_p^N E] + E_{pos} \quad (1)$$

Here E is the element of $R^{(P^2 \times C) \times D}$, E_{pos} is the element of $R^{(N+1) \times D}$, and x_p is the element of $R^{N \times (P^2 \times C)}$. N represents the number of extracted image parts and C represents the number of channels. x_{class} represents the mark added to the image parts and used for classification. Transformer encoder consists of L identical layers. Each layer consists of multi-head self-attention (MSA), multi-layer perceptron (MLP), layer normalization (LN) and residual connection. When the input sequence z_0 is

given as input to the encoder layer, the entire process applied to obtain the output map z_l with the same length was summarized by equations (2) and (3). l represents the relevant transformer encoder layer number.

$$\hat{z}_l = MSA(LN(z_{l-1})) + z_{l-1} \quad (2)$$

$$z_l = MLP(LN(\hat{z}_l)) + \hat{z}_l \quad (3)$$

Here it is expressed as $l = 1 \dots L$. The output of each transformer encoder layer is applied as input to the subsequent encoder layer. The final layer of the MLP placed at the output of the L -identical encoder layer is employed in conjunction with the SoftMax classifier to facilitate the classification of the learned image representations.

Given a sequence $X \in R^{n \times d}$ as input, the self-attention mechanism predicts the relationship of one element to another. X represents the input vector. In basic terms, a self-attention layer updates each

component in the array by combining the whole information from all input elements. The interaction obtained from the inputs is realized by defining three learnable weight matrices to transform the matrices called query (W^Q), key (W^K), and value (W^V) obtained from the input vectors. The input array X is initially traced to these weight matrices through the following equations, $Q = XW^Q$, $K = XW^K$, $V = XW^V$. The output of the self-attention layer is calculated by equation (4).

$$Self_{Attention}(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (4)$$

In the present study, pre-trained (ImageNet 2012) a vision transformer model (ViT-Base16) was utilized, which was fed with an input image of $384 \times 384 \times 3$ dimensions for the input layer, consisted of 11 transformer encoder layers, and was trained with the fine-tuning method. The base-sized model has 86.8 million trainable parameters with a patch size of 16.

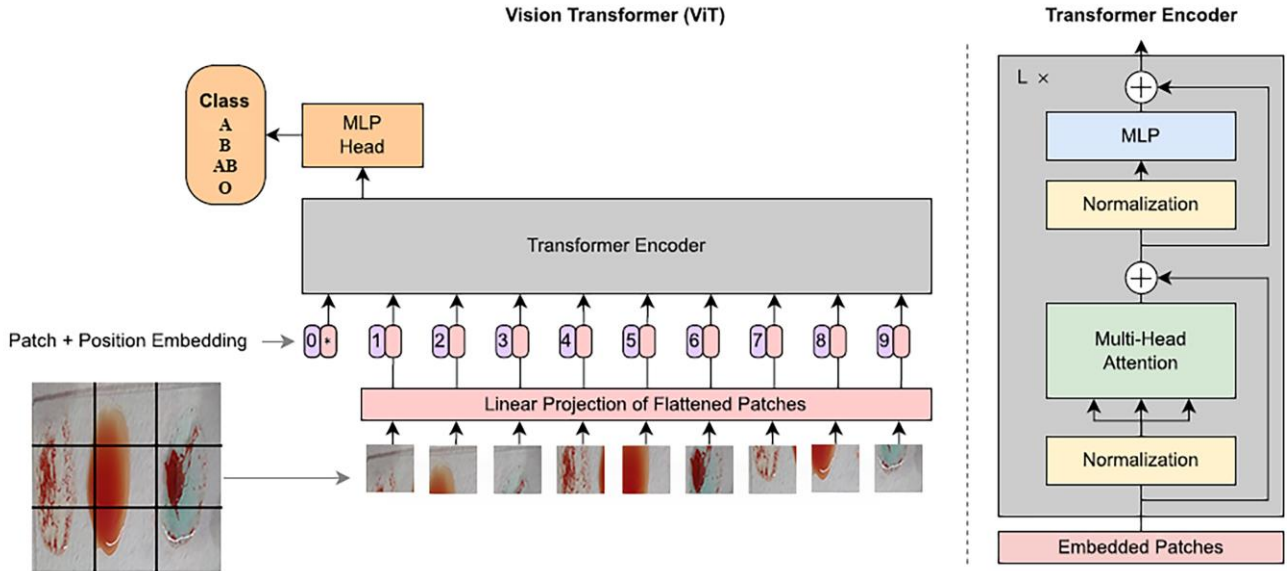


Figure 1. Structural architecture of classifying an image using vectorial input and transformer encoders with attention mechanisms

2.2. Data preparation and data augmentation

The present study utilized an open-source dataset [33]. The dataset contains slide images where the sedimentation status can be examined as a result of the application of anti-A, anti-B, and anti-D serum to the blood samples taken. The image numbers of blood groups A, B, AB, and O in the dataset were summarized in Table 1.

The data augmentation method was implemented to enhance the utilization of the data contained within

Table 1. Image distribution of dataset used in blood group classification

Blood Group	Rh (+)	Rh (-)	TOTAL
A	264	504	768
B	445	373	818
AB	366	392	758
O	382	391	773
TOTAL	1457	1660	3117

the dataset and to mitigate the model's tendency to memorize (overfitting) during the training process. An

overview of the transform features employed for data augmentation, along with the parameter values associated with these features, was provided in Table 2. While the translation and shearing parameters were chosen at the value that produced the least noise in the image (by calculating the PSNR), the rotation parameter was selected from values frequently applied and recommended in applications [34].

Table 2. Transform parameters of data augmentation method

Transform	Parameter Range
Rotation	$(-45)^\circ - (45)^\circ$
Translation of X Axis	$(-3) \text{ pixel} - (3) \text{ pixel}$
Translation of Y Axis	$(-3) \text{ pixel} - (3) \text{ pixel}$
Shearing of X Axis	$(-3) \text{ pixel} - (3) \text{ pixel}$
Shearing of Y Axis	$(-3) \text{ pixel} - (3) \text{ pixel}$

2.3. Proposed method and training parameters

The training process of the detailed vision transformer model was carried out in two stages. In the initial phase of the training, a 4-class (A, B, AB, O) training was conducted solely for the purpose of distinguishing the sedimentation status of A and B antigens, without taking into account the sedimentation status of the Rh protein. In the subsequent phase of the training, images of blood groups were utilized individually to

classify the sedimentation status of Rh proteins. At this stage, four independent binary classification training procedures were executed for four distinct blood groups. The algorithm of the proposed method in the present study was summarized in Figure 2. The presented approach yielded models that can be used in a structure capable of performing gradual classification (Appendix A).

The fine-tuning method was implemented by training specifically the fully connected layer of the vision transformer model. To mitigate the risk of overfitting during the training process, a 10-fold cross-validation method was employed. Two distinct optimizers, Adaptive Moment Estimation (ADAM) and Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM), were employed during the training process. The learning rate was set to 0.0001, and the mini-batch size was chosen as 8. Cross-entropy was used for calculating loss function. The training process was executed for a total of 10 epochs, and the weights from the epoch that exhibited the best validation loss value were selected as the final weights.

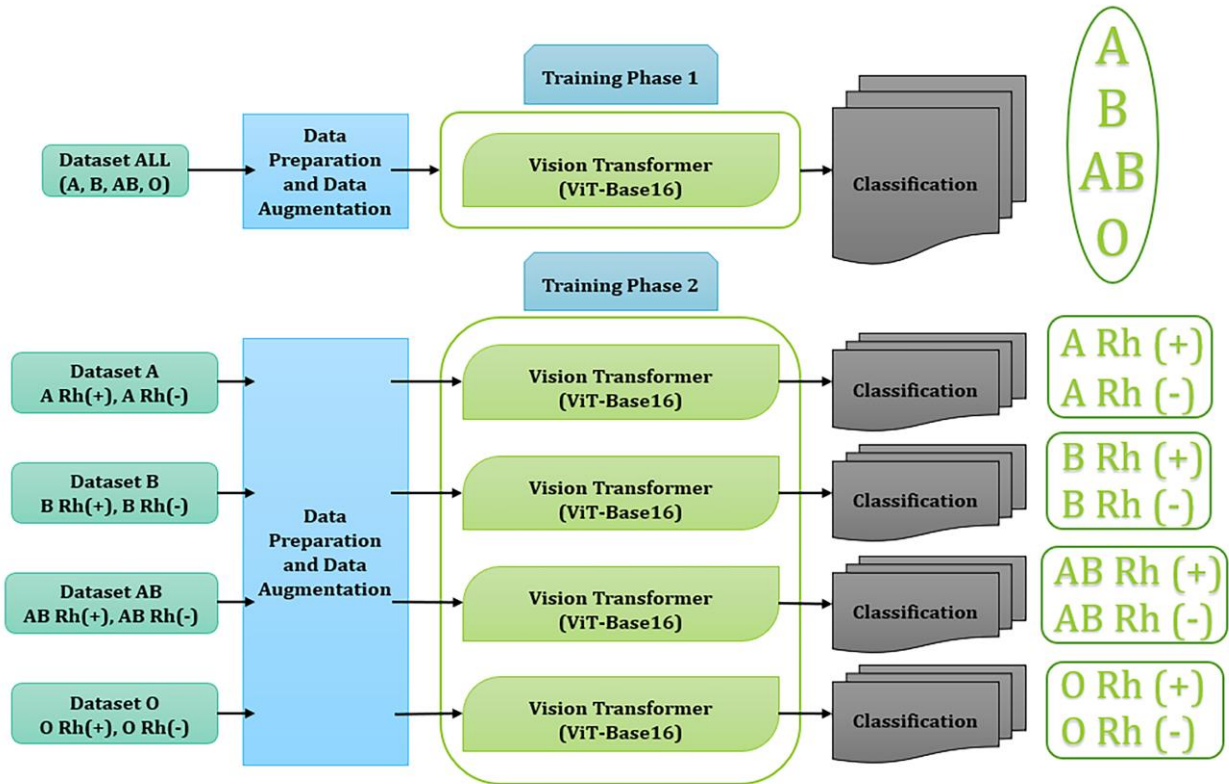


Figure 2. The algorithm of the proposed method in the present study

2.4. Performance metrics

The assessment of the classification outcomes was performed using various metrics. Metrics including

accuracy, recall, precision, and F1-score computed for each class and in total. The classification performance of the model was expressed by the mean and standard deviation ($\bar{X} \pm SD$) of the test data obtained as a result of the cross-validation method used for training. The mathematical formulations of these performance measures are provided below:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (5)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (7)$$

$$F1-score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (8)$$

True positive (TP) items are those for which the model correctly identifies a positive classification, and which are, in fact, positive. False positive (FP) items are those for which the model incorrectly identifies a positive classification, and which are, in fact, negative. True negative (TN) items are those for which the model correctly identifies a negative classification, and which are, in fact, negative. False negative (FN) items are those for which the model incorrectly identifies a negative classification, and which are, in fact, positive.

3. Results

As detailed in the materials and methods section, the four-class classification results obtained using ADAM and SGDM optimizers in the first stage training process were summarized in Table 3. Upon examination of the results, it was determined that both optimizers were capable of attaining elevated discrimination outcomes. It is evident that both optimizers demonstrate an average accuracy that exceeds 98%, with a negligible disparity of less than 1% between their respective means. Upon examination of the results according to class, it becomes evident that the average accuracy values

exceed 97%. However, since there was no prioritization of classes, an examination of the F1-score values of the classes reveals that the ADAM optimizer was the most successful. While the F1-Score values obtained with the ADAM optimizer were above 96% when standard deviations are considered, these values were determined as 92% for SGDM. For this reason, ADAM optimizer comes to the fore in blood group classification based on antigen sedimentation.

In the subsequent phase of the study, ViT models were trained to classify the sedimentation status of Rh proteins for images of classified blood groups. Subsequently, the capacity of these models to detect the Rh protein in each blood group was examined. The Rh protein classification success of the models in the second stage of the study was summarized in Table 4. In this step, while the ADAM optimizer produced the most successful performance results, the performance results of the SGDM optimizer did not reach the level of the results in the previous step. An examination of the average accuracy values obtained from binary classifications reveals that the ADAM optimizer achieved an accuracy range of 95% to 99%, while the SGDM optimizer attained an accuracy range of 80% to 95%. Upon examination of the F1-Score values in the context of the imbalanced distributions across certain classes (group of A and B) within the data set, the outcomes align with those of the accuracy values. Upon examination of both the mean accuracies and the mean F1-score values, it is evident that the discrimination success for the two optimizers was AB, O, B, and A, starting from the most successful, respectively. In addition, when the averages of the F1-Score results of binary classifications were calculated, an average value of 90.04% was obtained for the SGDM optimizer, while an average value of 97.10% was obtained for the ADAM optimizer. Upon consideration of the results obtained, it was determined that the vision transformer models which were trained using the ADAM optimizer were the most successful model.

Table 3. Performance results of four class classification

Optimizer	Blood Group	Accuracy	Recall	Precision	F1-Score
ADAM	A	0,9868 $\pm$ 0,0074	0,9791 $\pm$ 0,0153	0,9683 $\pm$ 0,0246	0,9735 $\pm$ 0,0149
	AB	0,9887 $\pm$ 0,0085	0,9683 $\pm$ 0,0226	0,9854 $\pm$ 0,0209	0,9766 $\pm$ 0,0176
	B	0,9852 $\pm$ 0,0075	0,9815 $\pm$ 0,0226	0,9637 $\pm$ 0,0272	0,9721 $\pm$ 0,0141
	O	0,9891 $\pm$ 0,0069	0,9703 $\pm$ 0,0277	0,9859 $\pm$ 0,0160	0,9777 $\pm$ 0,0145
	Overall	0,9874 $\pm$ 0,0054	0,9748 $\pm$ 0,0109	0,9758 $\pm$ 0,0102	0,9753 $\pm$ 0,0105
SGDM	A	0,9817 $\pm$ 0,0161	0,9648 $\pm$ 0,0287	0,9623 $\pm$ 0,0425	0,9632 $\pm$ 0,0315
	AB	0,9871 $\pm$ 0,0106	0,9472 $\pm$ 0,0438	1 $\pm$ 0	0,9724 $\pm$ 0,0242
	B	0,9765 $\pm$ 0,0167	0,9668 $\pm$ 0,0564	0,9453 $\pm$ 0,0240	0,9551 $\pm$ 0,0340
	O	0,9781 $\pm$ 0,0166	0,9676 $\pm$ 0,0392	0,9486 $\pm$ 0,0509	0,9568 $\pm$ 0,0312
	Overall	0,9808 $\pm$ 0,0087	0,9616 $\pm$ 0,0172	0,9640 $\pm$ 0,0156	0,9628 $\pm$ 0,0164

Table 4. Performance results of Rh protein classification

Optimizer	Performance Metric	A Rh	AB Rh	B Rh	O Rh
ADAM	Accuracy	0,9623 $\pm$ 0,0530	0,9907 $\pm$ 0,0164	0,9584 $\pm$ 0,0321	0,9753 $\pm$ 0,0248
	Recall	0,9542 $\pm$ 0,0659	0,9906 $\pm$ 0,0165	0,9600 $\pm$ 0,0302	0,9755 $\pm$ 0,0246
	Precision	0,9617 $\pm$ 0,0543	0,9909 $\pm$ 0,0164	0,9595 $\pm$ 0,0306	0,9763 $\pm$ 0,0229
	F1-Score	0,9579 $\pm$ 0,0599	0,9907 $\pm$ 0,0164	0,9597 $\pm$ 0,0304	0,9759 $\pm$ 0,0238
SGDM	Accuracy	0,8006 $\pm$ 0,1375	0,9591 $\pm$ 0,0373	0,8973 $\pm$ 0,0565	0,9366 $\pm$ 0,0487
	Recall	0,7960 $\pm$ 0,1164	0,9597 $\pm$ 0,0367	0,8980 $\pm$ 0,0535	0,9366 $\pm$ 0,0489
	Precision	0,8104 $\pm$ 0,1124	0,9607 $\pm$ 0,0350	0,9020 $\pm$ 0,0496	0,9411 $\pm$ 0,0418
	F1-Score	0,8027 $\pm$ 0,1129	0,9602 $\pm$ 0,0358	0,9000 $\pm$ 0,0514	0,9388 $\pm$ 0,0452

4. Discussion and Conclusion

The study's main objective was to ascertain blood groups with a high level of accuracy, contingent on their sedimentation status after implementing anti-A, anti-B, and anti-D serum on test slides. To achieve this determination, the vision transformer approach was selected as the preferred method. ViTs are among the state-of-the-art applications in literature. The classification success of the ViTs in the relevant images was evaluated. Unlike other studies in the literature, this evaluation was performed with an open-source data set. Most studies indicate that the datasets in question were collected with the specific intention of being utilized in the aforementioned studies. Conversely, a study indicated that the dataset was uploaded to the data repository (Kaggle), yet it remained inaccessible [26]. Therefore, a direct comparison of the performance outcomes of the methodology employed in this study with those of other studies was not feasible. Conversely, due to the incomplete characterization of the dataset employed in certain studies, performance outcomes were compared based on overall values. Studies using image processing techniques not directly related to the method used in this study, reported test accuracies between 84.61% and 99.6%. Although promising results have been presented, it is noteworthy that the number and diversity of images reported to be used for testing are low in these studies [14-20]. It has been reported that machine learning studies have achieved a high rate of success in classification [22-25].

Nevertheless, the employment of image processing techniques, a prevalent component of these studies, may result in scenarios necessitating human involvement. Consequently, deep learning methods, which are automated approaches to producing features while minimizing human involvement, have become more prominent [26-29]. Very successful results have also been obtained in studies carried out with the deep learning approach. Despite the absence of data regarding the number of classes that were evaluated in the study conducted by Balaji et al., the classification performance of the proposed model was reported to be 96.69% [26]. In Amballa's study, an overall classification success rate of 98.50% was reported, achieved through a method that combined machine learning and deep learning [35]. Due to the absence of specified details regarding the dataset and the number of classes studied, direct comparisons between classes were not possible [26,35]. However, if the evaluation was based on overall values, it can be concluded that the ViT model trained for four classes using the ADAM optimizer was one of the most successful classifiers among these studies.

A thorough examination of the study's findings reveals that the ADAM optimizer emerges as the most effective optimizer among the two. While there was no substantial superiority in terms of optimizers in the results obtained for the four-class classification, it can be posited that the ADAM optimizer was more adept at determining the Rh protein of blood groups. It has been documented that the generalization capability of

the ADAM optimizer, which is less influenced by the initial conditions and requires less fine-tuning, is surpassed by that of SGDM [36]. However, the findings of the present study demonstrated an opposing conclusion. One of the reasons for this situation is that it has been reported that the ADAM optimizer may be a better option if hyperparameter optimization was performed [37]. Therefore, it is thought that the hyperparameters selected in the study cause the ADAM optimizer to produce better results. On the other hand, another reason can be associated with the number and distribution of data in the dataset. While the data numbers employed for the four-class classification demonstrate a balanced distribution across classes, the underperformance of the Rh classification in A and B blood groups for SGDM can be attributed to the imbalanced data numbers. On the other hand, the results indicate that the ADAM optimizer was less affected by this situation, optimizes faster, and performs better in tests. Another finding of the obtained results is that the efficacy of the training process is directly proportional to the quantity of data utilized for training in ViT models. This observation aligns with the findings reported in other studies in the literature [32,38]. A detailed examination of recall metrics revealed a direct correlation between the true positive rate and the number of data points classified within specific classes.

In the presented study, the success of vision transformers in blood group classification as well as the role of optimizers in this situation were investigated. In antigen detection, an average accuracy of 98.08% for SGDM optimizer and 98.74% for ADAM optimizer was obtained. In the detection of Rh protein, an average accuracy of 89.84% for SGDM optimizer and 97.16% for ADAM optimizer was obtained. The results obtained are quite promising. In the contemporary era, artificial intelligence approaches designed for machine vision, in conjunction with automated systems, have become a standard component of technological applications. A notable aspect of the presented work was the evaluation of the potential of vision transformers for decision-making in an automated system. In the future perspective, hyperparameter optimization with more data is suggested to improve the results of the presented study.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

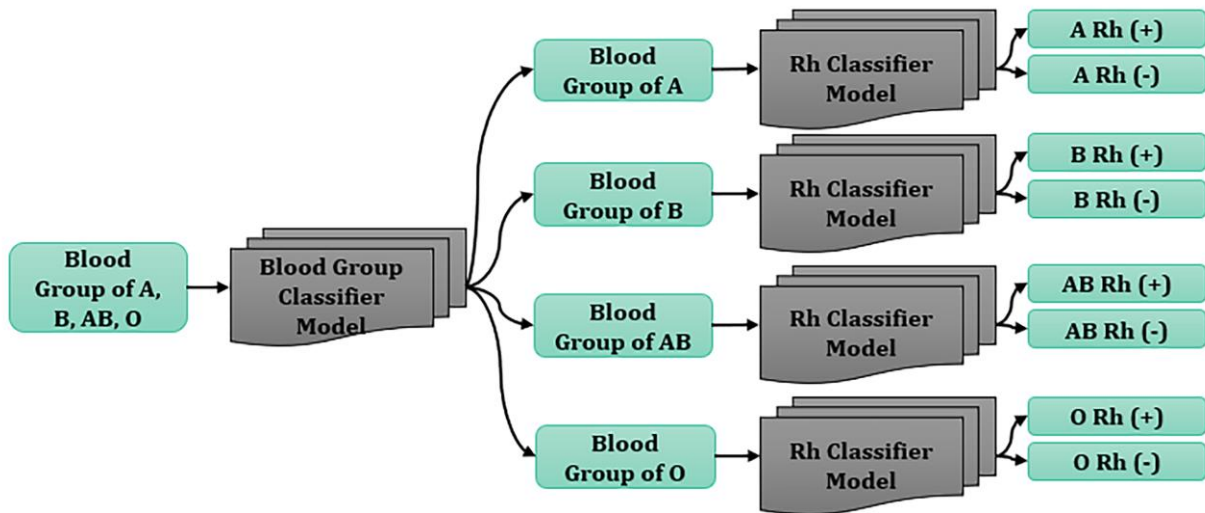
- [1] Skull, A. 2022. Circulation - anatomy, physiology and pathophysiology. ss 1-86. McGloin, S., Skull, A. ed. 2022. Principles of Acute Care Nursing, SAGE Publications, UK, 280s.
- [2] Roback, J. D., Grossman, B. J., Harris, T., Hillyer C. D. 2011. Technical Manual. 17th edition. American Association of Blood Banks (AABB). U.S.A., 1078s.
- [3] Harmening, D. M. 2012. Modern Blood Banking & Transfusion Practices. 6th edition. F.A. Davis Company. U.S.A., 672s.
- [4] Malomgre, W., Neumeister, B. 2009. Recent and future trends in blood group typing. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 393, 1443-1451.
- [5] Okroi, M., McCarthy, L. 2010. The original blood group pioneers: the Hirszfels. Transfusion Medicine Reviews, 24(3), 244-246.
- [6] Landsteiner, K., Wiener, A. S. 1940. An Agglutinable Factor in Human Blood Recognized by Immune Sera for Rhesus Blood. Experimental Biology and Medicine, 43(1), 223-223.
- [7] Şentuna, C. 1982. Rh Gen Frekansları Yönünden Türkiye'nin Yeri. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 30, 153-179.
- [8] Ferraz, A., Carvalho, V., Machado, J. 2017. Determination of human blood type using image processing techniques. Measurement, 97, 165-173.
- [9] Shaban, S. A., Elsheweikh, D. L. 2022. Blood Group Classification System Based on Image Processing Techniques. Intelligent Automation & Soft Computing, 31(2), 817-834.
- [10] Mankar, J., Neve, S., Parkhe, M., Kumawat, P., Kale, N. R. 2021. Automated Blood Group Detection System Using Image Processing. International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 7(3), 3237-3244.
- [11] Malhotra, A., Chethana, N., Nagapranitha, D. R., Anand, S., Shruthi, B. 2021. Automated Blood Group Determination Using Image Processing Techniques with Integration of Raspberry Pi. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 8(6), 954-965.
- [12] Jayakumar, P., Padmanabhan, S., Suthendran, K., Kumar, Y. N., Sujith, M. 2020. Identification and

- Analysis of Blood Group with Digital Microscope Using Image Processing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 923, 012013.
- [13] Ferraz, A., Soares, F., Carvalho, V. 2013. A Prototype for Blood Typing Based on Image Processing. SENSORDEVICES 2013: The Fourth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, 25-31 August, Barcelona, 139-144.
- [14] Ayan, E., Yıldırım, E. K. 2016. Real Time Blood Type Determination by Gel Test Method on an Embedded System. International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 4, 412-415.
- [15] Atıcı, H., Koçer, H. E., Kader, S. 2020. Dijital Görüntüler Kullanılarak Kan Grubunun Görüntü İşleme Tabanlı Tespiti. BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 649-659.
- [16] Dong, Y., Chen, N., Fu, W., Liu, M., Zhou, Z., Chen, S. 2017. ABO Blood Group Detection Based on Image Processing Technology. 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing, 2-4 June, Chengdu, China, 655-659.
- [17] Dhande, A., Bhoir, P., Gade, V. 2018. Identifying the blood group using Image Processing. International Research Journal of Engineering and Technology, 5(3), 2639-2642.
- [18] Ravindran, G., Titus, T. J., Pravin, M., Pandiyan, P. 2017. Determination and Classification of Blood Types using Image Processing Techniques. International Journal of Computer Applications, 157(1), 12-16.
- [19] Chandra, K. B. S., Madgula, V. B., Raghavaraju, D. 2023. Prototype for Blood Typing Based on Image Processing. Advanced Engineering Science, 55(4), 1-11.
- [20] Rishitha, G. S., Jerusha, D. S., Shehanaz, S. 2022. Blood Detection Using Image Processing. International Journal of Creative Research Thoughts, 10(5), 365-369.
- [21] Odeh, N., Toma, A., Mohammed, F., Dama, Y., Oshaibi, F., Shaar, M. 2021. An Efficient System for Automatic Blood Type Determination Based on Image Matching Techniques. Applied Sciences, 11, 5225-5252.
- [22] Rosales, M. A., de Luna, R. G. 2022. Computer-Based Blood Type Identification Using Image Processing and Machine Learning Algorithm. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 26(5), 698-705.
- [23] Dannana, S., Prasad, D. Y. V. 2022. Blood group detection using ML classifier. Journal of Health Sciences, 6(S1), 4395-4408.
- [24] Mahmood, M. F. 2024. Recognition And Categorization of Blood Groups by Machine Learning and Image Processing Method. Innovative Biosystems and Bioengineering, 8(2), 53-68.
- [25] Ferraz, A., Brito, J. H., Carvalho, V., Machado, J. 2017. Blood type classification using computer vision and machine learning. Neural Computing and Applications, 28, 2029-2040.
- [26] Balaji, B., Jeyasakthi, R., Julius Fusic, S., Rishwana, M., Swathilakshmi, P. R. K., Reshma, K. K. 2021. A novel approach of classifying ABO blood group image dataset using deep learning algorithm. International Conference on Computational Performance Evaluation, 1-3 December, Meghalaya, India, 393-398.
- [27] Titus, A., Devi, K. M., Divya, G., Nimmagadda, P., Shankar, S. V. 2023. A Systematic Procedure to Identify Human Blood Groups by using Image Processing Assisted Learning Principle. International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems, 14-15 December, Chennai, India, 1-6.
- [28] Aboubaker, C. D. 2023. Blood Group Prediction Using Deep Learning. Kasdi Mebah University, Computer Science Department, Master Thesis, 70s, Algeria.
- [29] Shen, R., Wen, J., Zhu, P. 2023. Blood Group Interpretation Algorithm Based on Improved AlexNet. Electronics, 12, 2608-2622.
- [30] Devlin, J., Chang, M., Lee, K., Toutanova, K. 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, 1, 4171-4186.
- [31] Vaswani, A., Ramachandran, P., Srinivas, A., Parmar, N., Hechtman, B., Shlens, J. 2021. Scaling local self-attention for parameter efficient visual backbones. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 20-25 June, Nashville, U.S.A., 12894-12904.
- [32] Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., Houlsby, N. 2020. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. International Conference on Learning Representations. International Conference on Learning Representations, 26 April – 1 May, Virtual, 1-22.
- [33] Minor Project 5th Semester. 2024. Blood Group Detection Dataset. <http://universe.roboflow.com/minor-project-5th-semester/blood-group-detection-4yvdx> (Erişim Tarihi: 01.03.2025).

- [34] Shorten, A., Khoshgoftaar T. M. 2019. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. Journal of Big Data, 6(60), 1-48.
- [35] Amballa, D. P. 2022. Automated Blood Group Identification using Machine Learning and Deep Learning: A Novel Approach for Laboratory Settings. International Journal of Science and Research, 11(10), 1390-1393.
- [36] Wilson, A. C., Roelofs, R., Stern, M., Srebro, N., Recht, B. 2017. The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning. 31st Conference on Neural Information Processing Systems, 4-9 December, U.S.A., 1-11.
- [37] Choi, D., Shallue, C. J., Nado, Z., Lee, J., Maddison, C. J., Dahl, G. E. 2019. On empirical comparisons of optimizers for deep learning. arXiv, 1-27.
- [38] Neyshabur, B. 2020. Towards Learning Convolutions from Scratch. 34th Conference on Neural Information Processing Systems, 6-12 December, 1-11.

Appendices

Appendix A. Gradual classification via trained models



Nanohidroksiapatit Katkılı PMMA, PS ve PVA Nanokompozit Membranların Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Tuğba SARDOHAN KÖSEOĞLU^{*1}, Emine GÖNEN²

^{1,2} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye.

(Alınış / Received: 03.01.2025, Kabul / Accepted: 23.05.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Polimerik nanokompozit,
Karakterizasyon,
Membran,
Nanohidroksiapatit.

Öz: Bu çalışmada, membran teknolojisi ile biyomalzeme amaçlı kullanılabilecek yeni tür polimerik nanokompozit membranların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, ilk olarak yaş kimyasal yöntemi ile nano boyutlarda hidroksiapatit (nHA) sentezi yapılmıştır. İkinci aşamada ise, farklı yüzdelik oranlarda polimetil metakrilat (PMMA), polisülfon (PS) ve polivinil alkol (PVA) polimerleri ve farklı yüzdelik oranlarda (kütlece %1-7) nHA karıştırılarak faz inversiyon yöntemi ile nanokompozit membranlar hazırlanmıştır. Membranların hazırlanmasında çapraz bağlayıcı olarak polivinilpirolidon (PVP) kullanılmıştır. Polimerik nanokompozit membranların morfolojik yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) cihazları kullanılarak, malzemelerin kristalografik özelliklerinin ve içerdikleri fazların belirlenmesi X-ışını kırınım (XRD) cihazı kullanılarak yapıldı. Ayrıca, SEM-EDS ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan membranların içeriğindeki hidroksiapatitin, kemik bileşimine benzerliği nedeniyle hazırlanan polimerik nanokompozit membranlara gerekli testler yapıldıktan sonra ortopedi alanında çok çeşitli uygulamalarda kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Preparation and Characterization of Nanohydroxyapatite Doped PMMA, PS and PVA Nanocomposite Membranes

Keywords

Polymeric Nanocomposite,
Characterization,
Membrane,
Nanohydroxyapatite.

Abstract: This study aims to develop new types of polymeric nanocomposite membranes that can be used for biomaterial purposes with membrane technology. In study, nano-sized hydroxyapatite (nHA) synthesis was performed first by wet chemical method. In the second stage, nanocomposite membranes were prepared by the phase inversion method mixing different percentages of polymethyl methacrylate (PMMA), polysulfone (PS) and polyvinyl alcohol (PVA) polymers and different percentages of nHA (1-7% by mass). Polyvinylpyrrolidone (PVP) was used as a crosslinker in the preparation of membranes. The morphological structures of polymeric nanocomposite membranes were determined using scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM) devices, the crystallographic properties of the materials and the phases they contain were determined using X-ray diffraction (XRD). Additionally, structure analyzes were carried out by SEM-EDS and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). It is evaluated that the hydroxyapatite in the prepared membranes can be used in a wide variety of applications in orthopedics after the necessary tests are performed on the prepared polymeric nanocomposite membranes due to their similarity to bone composition.

1. Giriş

Membran, maddeleri seçici olarak ayırmak için bariyer görevi gören bir malzemedir. Membrana

dayalı teknolojiler düşük maliyet, uygun dayanıklılık, yüksek seçici geçirgenlik ve işletim kolaylığı nedeniyle son zamanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Membranların performansını etkileyen geçirgenlik,

*Sorumlu yazar: tugbakoseoglu@isparta.edu.tr

seçicilik gibi parametrelerin önemi son yıllarda daha iyi anlaşılmaktadır. Membranlarda gözenek yoğunluğunun artması geçirgenliği arttırmaktadır. Membranların direnci ise kendi kalınlığıyla orantılıdır. Seçicilik, bir membranın karışım bileşenleri arasında ayırım yapmasını sağlayarak bir fazın diğerinden ayrıldığı yöntemdir. Membranın seçiciliği ise büyük çaplı gözenek boyutu dağılımı ile bozulmaktadır [1].

Biyomalzeme alanında kullanılmak üzere yeni tür polimerik nanokompozitler hazırlamak için faz inversiyon metodu da kullanılmaktadır. Faz inversiyonunda membranları oluşturmak için kullanılan dört temel teknik vardır: (i) buhar fazından çökeltme, (ii) kontrollü buharlaşma ile çökeltme, (iii) termal olarak indüklenmiş faz ayırma ve (iv) daldırma çökeltmedir. Polimerik membranların hazırlanmasında dört teknik içerisinde en yaygın kullanılanı daldırma ile çöktürme yöntemidir. Membranlar çeşitli organik polimerlerden ve seramik gibi inorganik maddelerden üretilmektedir. Günümüzde ticari membranların çoğu polimerlerden yapılmaktadır. Membranların performans özellikleri membran üretim malzemesi ve yapısal özellikleri değiştirilerek kontrol edilebilmektedir [2].

Bu çalışmada, nanohidroksiapatit (nHA) katkılı polimetil metakrilat (PMMA), polisülfon (PS) ve polivinil alkol (PVA) içeren polimerik nanokompozit membranlar hazırlanmış ve karakterizasyon deneyleri yapılmıştır. PMMA, doğrusal yapıda bir zincir polimerdir ve hidrofobiktir. Oda sıcaklığında camsı yapıda bulunur. Lucite ve Plexiglass ticari isimleriyle tanınır. Işık geçirgenliği, sertliği ve kararlılığı nedeniyle göz içi lensler, protez göz ve sert kontakt lenslerde yaygın olarak kullanılmaktadır. PMMA, mükemmel optik özelliklere, yeterli mukavemete ve boyutsal stabiliteye sahip amorf ve termoplastik bir malzemedir. Uygun mekanik özelliklerinden dolayı birçok pratik uygulamada inorganik camın yerini almış durumdadır [3]. PVA, poli(vinil asetat)'ın (PVAc) hidroliz edilmesi ile elde edilen C-C bağları ile oluşmuş beyazımsı sert bir polimerdir [4]. PVA, hidrokarbon çözücüler karşısında dayanıklı olmasına karşın zincirinde bulunan hidrofilik -OH grubundan dolayı su ve sulu çözeltilerde rahatlıkla çözünebilmektedir [5]. PVA kontakt lens, yara örtüsü, yapay organ, implantlar ve ilaç uygulamaları gibi birçok biyomedikal uygulamada kullanım alanı bulunmaktadır. PS, yüksek camsı geçiş sıcaklıkları, termal stabilite ve kimyasal olarak inert bir termoplastiktir. Polisülfonun bir malzeme olarak mekanik stabilitesi çevrilen zincir sertliği, nispeten esnek olmayan ve hareketsiz fenil ve SO₂ gruplarından kaynaklanmaktadır. Eter bağları, PS'un esnek ve sert olmasına rağmen güçlü olmasını sağlar. Bu özelliklerinden dolayı PS, malzeme bilimi, biyoloji, kimya ve polimer bilimi alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Polisülfonlar, elektrodializ ve polimer elektrolit membran elektrolizi gibi elektromembran proseslerinde iyon değişim membranları olarak da kullanılmaktadır.

Hidroksiapatit, kemiğin temel inorganik bileşeni ve iskeletin yeniden onarılabilmesi için uygun bir implant maddesidir. Hidroksiapatit çok iyi biyouyumluluk ve biyoaktiflikleri ile kaplama maddesi olarak birçok tıbbi uygulamada kullanılmaktadır. Fosfat mineral grubuna ait olan apatitlerin, genel formülü $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ şeklindedir. HA ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), fluoroapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), kloroapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) en yaygın bilinen apatit mineralleridir genelde hekzagonal kristal yapıdadır [6].

Biyouyumluluk, bir biyomalzemenin canlı vücudu ile uyumu anlamına gelmektedir. Kalsiyum fosfat tuzlarının grubuna ait olan hidroksiapatit; mükemmel biyouyumluluğa sahiptir. Hidroksiapatit, oksijenle tepkimeye girmediğinden yanma gerçekleşmez. Doğada elmasan sonra bilinen en sert moleküldür ve sadece elmasla aşındırılabilir. Esnekliğinin az olmasından dolayı neredeyse tamamen kırılındır. Tatsız, kokusuz yapıda olup organik çözücü içerisinde çözünmez. Ayrıca asit çözücüler dışında inorganik çözücüler içinde de çözünme gerçekleşmez.

Hidroksiapatit, biyouyumluluk seviyesinin ve kemik iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı, biyomedikal malzeme olarak geniş kullanım alanını bulunmaktadır. Fiziksel ve kimyasal yapısı, yüksek yüzey etkileşimi özellikleri ve biyouyumluluğu ile ilaç taşıyıcılar ve ilaç dağıtım sistemlerinde kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Hidroksiapatitler aynı zamanda kontrollü ilaç salınımında adsorban olarak görev yapar. [7].

Hidroksiapatitler, kullanım amaçlarına göre fiziksel ve kimyasal yapılarında farklılıklar meydana getirilerek üretilmektedir. Örneğin, implant malzemelerde mekanik dayanım en önemli özelliktir. Bu sebeple, üretilen kalsiyum fosfat seramikleri arasında bulunan hidroksiapatitin gücü, gerçek kemik dokusuna yakın olmalıdır. Aynı zamanda statik ve dinamik yüklere karşı yüksek yorulma direnci göstermeli ve özellikle canlı organizmalarda aşındırıcı etkilere karşı dayanıklılık ve yüksek kırılma direnci göstermelidir.

Bu çalışmada da hidroksiapatitlerin üstün özelliklerini daha da geliştirmek adına bir modifikasyon hedeflenmiştir. Çalışmamızda, membran hazırlanmasında kullanılmak üzere ilk olarak nanohidroksiapatit (nHA) sentezlenmiştir. Polimer olarak belirlenen oranlarda PMMA, PS ve PVA polimerleri, çapraz bağlayıcı olarak ise PVP kullanılmıştır. Hazırlanan nHA katkılı polimerik nanokompozit membranların ve yalın polimerik membranların hazırlanması yüzey morfolojisi ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için SEM, SEM-EDS, AFM, FTIR ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Kullanılan kimyasal maddeler

Deneylerde kullanılan tüm kimyasal maddeler Merck, Carlo Erba ve Fluka firmalarından temin edilmiş olup analitik saflıktadır.

2.2 Kullanılan cihazlar

Hazırlanan polimerik membranların yüzey karakterizasyonu için SEM analizi gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri FEI Qunta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile farklı büyütme oranlarında elde edilmiştir. Polimerik membranların yapısını oluşturan elementlerin hassas analizi için SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Bu analizler için aynı SEM cihazı kullanılmıştır.

Polimerik membranların yüzey topografisi özelliklerini anlaşılması adına AFM ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler EZ-AFM Nanomagnetics marka atomik kuvvet mikroskobu (AFM) cihazı ile yapılmıştır.

Membranların yapısal özelliklerinin ve kimyasal kompozisyonlarının aydınlatılması adına XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Bruker D8 Advance Twin-Twin model X-ışını kırınım kristalografi cihazı (XRD) ile yapılmıştır.

Membranların yapısal bağ özelliklerinin belirlenmesi adına FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler FT/IR-4700 type A model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre cihazı (FTIR) ile yapılmıştır.

2.3 Nano boyutlu hidroksiapatit sentezi

nHA kristallerinin sentezlenmesinde yaş kimyasal yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem literatüre göre hazırlanmış olup başlangıç malzemeleri olarak iki farklı kimyasal kullanılmıştır [8]. Bu malzemeler kalsiyum nitrat tetrahidrat ve di-amonyum hidrojen fosfattır. nHA sentezi için başlangıç malzemelerinin oranı literatürde verilen değerlere göre (Ca/P) 1.67 olacak şekilde belirlenmiştir [8].

23.66 g kalsiyum nitrat tetrahidrat 100 mL suda çözölmüştür. Aynı şekilde 7.93 g di-amonyum hidrojen fosfat 100 mL suda çözölmüştür. Hazırlanan kalsiyum nitrat tetrahidrat ve di-amonyum hidrojen fosfat çözeltileri ultrasonik banyoda 15 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin pH değeri amonyak çözeltisi ile $pH \geq 10$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan kalsiyum nitrat tetrahidrat çözeltisi (20 mL) içerisine, di-amonyum hidrojen fosfat çözeltisi (20 mL) sürekli karıştırılarak damla damla ilave edilmiştir. Oluşan nHA kristallerinin çökmesi için 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Reaksiyon sonucu oluşan kalıntıların temizlenmesi adına santrifüj cihazında 4100 rpm'de 5 dakika olacak şekilde 6 kere yıkanmıştır. Elde edilen nanopartiküller süzöldükten sonra 24 saat oda sıcaklığında kurutularak toz haline getirilmiştir.

2.4 Membranların hazırlanması

Polimerik nanokompozit membranların hazırlanması iki aşamada faz inversiyon metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.4.1 Yalın polimerik membranların hazırlanması

PMMA polimerik membranın hazırlanması

Aşama 1: PMMA polimeri, kloroform çözeltisi içerisinde, 30 °C sıcaklıkta, manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelinceye kadar 1000 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 1 saat sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika oda sıcaklığında ultrasonik banyoda tutularak içinde bulunan kabarcıklar giderilmiştir.

Aşama 2: PVP çapraz bağlayıcı, DMF çözeltisi içerisinde, 30 °C sıcaklıkta manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelinceye kadar 1000 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 30 dakika sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika ultrasonik banyoda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir.

Aşama 3: Aşama 1 ve 2'de elde edilen iki çözelti yavaş yavaş homojen hale gelinceye kadar, 30 °C sıcaklıkta yine manyetik karıştırıcı yardımıyla 800 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 30 dakika sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir.

Aşama 4: Çözelti 15 dakika oda sıcaklığında ultrasonik su banyosunda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir. Şeffaf ve homojen bir görünümü bulunan polimerik çözelti temiz, kuru cam bir plaka üzerine dökölerek eşit kalınlıkta yayılması sağlanmış ve cam plaka üzerinde 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. 24 saatin ardından kuruyan membranda bulanık bir film görüntüsü elde edilmiştir. Oluşan membran film tabakası içi saf su dolu kapalı bir kabın içerisine bırakılarak katılaşması sağlanmıştır ve içerisinde saf su olan kapalı bir kap içerisinde buzdolabında muhafaza edilmiştir.

PS polimerik membranın hazırlanması

Aşama 1: 4 g PS polimeri ile 15 mL NMP, 45 °C sıcaklıkta, manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelene kadar 1000 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 2,5 saat sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika ultrasonik banyoda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir.

Aşama 2: 1 g PVP çapraz bağlayıcı 7 mL DMF çözeltisi içerisinde, 30 °C sıcaklıkta, manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelene kadar 1000 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 30 dakika sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika ultrasonik

banyoda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir.

Aşama 3: Aşama 1 ve 2’de elde edilen iki çözelti yavaş yavaş homojen hale gelinceye kadar, 45 °C sıcaklıkta, yine manyetik karıştırıcı yardımıyla 800 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 2 saat sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika ultrasonik su banyosunda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir. Buradan sonra PMMA membran hazırlanmasında kullanılan 4. Aşama aynı şekilde uygulanmıştır.

PVA polimerik membranın hazırlanması

Aşama 1: 4 g PVA ile 15 mL NMP, 40 °C sıcaklıkta, manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelene kadar 1000 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 2 saat sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika boyunca ultrasonik banyoda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir.

Aşama 2: 1 g PVP çapraz bağlayıcı 7 mL DMF çözeltisi içerisinde, 30 °C sıcaklıkta, manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelene kadar 1000 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 30 dakika sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika boyunca ultrasonik banyoda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir.

Aşama 3: Aşama 1 ve 2’de elde edilen iki çözelti yavaş yavaş homojen hale gelinceye kadar, 40 °C sıcaklıkta,

Çizelge 1. nHA katkılı membranların hazırlanması işleminde kullanılan PMMA ve diğer bileşenlerin oranları

Çözelti İçeriği	nHA Yüzde Oranı (%)	nHA miktarı (g)	Homojen Çözünme Süresi
PMMA (4 g) + Kloroform (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 1	0.05	2 saat 30 dakika
PMMA (4 g) + Kloroform (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 3	0.15	3 saat 15 dakika
PMMA (4 g) + Kloroform (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 5	0.25	3 saat 45 dakika
PMMA (4 g) + Kloroform (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 7	0.35	4 saat

Çizelge 2. nHA katkılı membranların hazırlanması işleminde kullanılan PS ve diğer bileşenlerin oranları

Çözelti İçeriği	nHA Yüzde Oranı (%)	nHA miktarı (g)	Homojen Çözünme Süresi
PS (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 1	0.05	1 saat 17 dakika
PS (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 3	0.15	1 saat 30 dakika
PS (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 5	0.25	2 saat 15 dakika
PS (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 7	0.35	3 saat

yine manyetik karıştırıcı yardımıyla 800 rpm hızda karıştırılmıştır. Yaklaşık 2 saat sonra homojen bir görünüm elde edilmiştir. Çözelti 15 dakika boyunca ultrasonik banyoda bekletilerek içinde bulunan hava kabarcıkları giderilmiştir. Buradan sonra PMMA membran hazırlanmasında kullanılan 4. Aşama aynı şekilde uygulanmıştır.

2.4.2 nHA katkılı polimerik membranların hazırlanması

Bir önceki bölümde belirtildiği şekilde her üç polimer için çözeltiler aynı sıcaklık ve koşullarda ayrı ayrı hazırlanmıştır. PMMA polimeri ile hazırlanmış homojen çözeltiler içerisinde Çizelge 1’de belirtilen yüzde oranlarında nHA eklenmiştir. PS polimeri ile hazırlanmış homojen çözeltiler içerisinde Çizelge 2’de belirtilen yüzde oranlarında nHA eklenmiştir. PVA polimeri ile hazırlanmış homojen çözeltiler içerisinde Çizelge 3’te belirtilen yüzde oranlarında nHA eklenmiş ve 45 °C sıcaklıkta, yine manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Çözelti 15 dakika ultrasonik banyoda bekletilerek içinde bulunan gözenekler ve kabarcıklar giderilmiştir. Homojen ve biraz bulanık görünümü bulunan çözelti temiz cam bir plaka üzerine dökülerek eşit kalınlıkta yayılması sağlanarak 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Oluşan membran film tabakası içi saf su dolu kapalı bir kabın içerisinde bırakılarak katılaşması sağlanmıştır ve içerisinde saf su olan kapalı bir kap içerisinde buzdolabında muhafaza edilmiştir.

Çizelge 3. nHA katkılı membranların hazırlanması işleminde kullanılan PVA ve diğer bileşenlerin oranları

Çözelti İçeriği	nHA Yüzde Oranı (%)	nHA miktarı (g)	Homojen Çözünme Süresi
PVA (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 1	0.05	50 dakika
PVA (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 3	0.15	1 saat 15 dakika
PVA (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 5	0.25	1 saat 45 dakika
PVA (4 g) + NMP (15 mL) PVP (1 g) + DMF (7 mL)	% 7	0.35	2 saat 5 dakika

2.4.3 Polimerik membranların kalınlıkları

Membran kalınlığı dijital mikrometre ile membranın farklı yerlerinden (kenar ve orta bölgeler) ölçülmüştür. Ölçümlerin ortalaması alınarak membran kalınlığı (mm) olarak belirlenmiştir. Hazırlanan polimerik membranların kalınlıkları Çizelge 4'te verilmiştir.

Membranların kalınlıkları incelendiğinde yalın PMMA ve yalın PVA membranlarına nHA ilave edildiğinde membranların kalınlıklarında artış meydana geldiği

gözlemlenmiştir. Yalın PS membranına nHA eklendiğinde ise nHA ilaveli membranların kalınlığında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler kıyaslandığında PMMA ve PVA ile hazırlanan membranların gözeneklerinin daha az olmasından dolayı nHA eklenmesiyle membranların kalınlığında artma olmuştur. PS ile hazırlanan membranın gözenekleri ise daha fazla olduğundan öncelikle nHA ile gözenekler dolmuş ve kalınlıkta artış olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4. Hazırlanan polimerik nanokompozit membranların kalınlıkları

Membran	Membran Kalınlığı (mm)	Membran	Membran Kalınlığı (mm)	Membran	Membran Kalınlığı (mm)
Yalın PMMA	0.3	Yalın PS	0.6	Yalın PVA	0.2
% 1 nHA katkılı PMMA	0.4	% 1 nHA katkılı PS	0.5	% 1 nHA katkılı PVA	0.3
% 3 nHA katkılı PMMA	0.4	% 3 nHA katkılı PS	0.5	% 3 nHA katkılı PVA	0.3
% 5 nHA katkılı PMMA	0.4	% 5 nHA katkılı PS	0.4	% 5 nHA katkılı PVA	0.3
% 7 nHA katkılı PMMA	0.4	% 7 nHA katkılı PS	0.5	% 7 nHA katkılı PVA	0.3

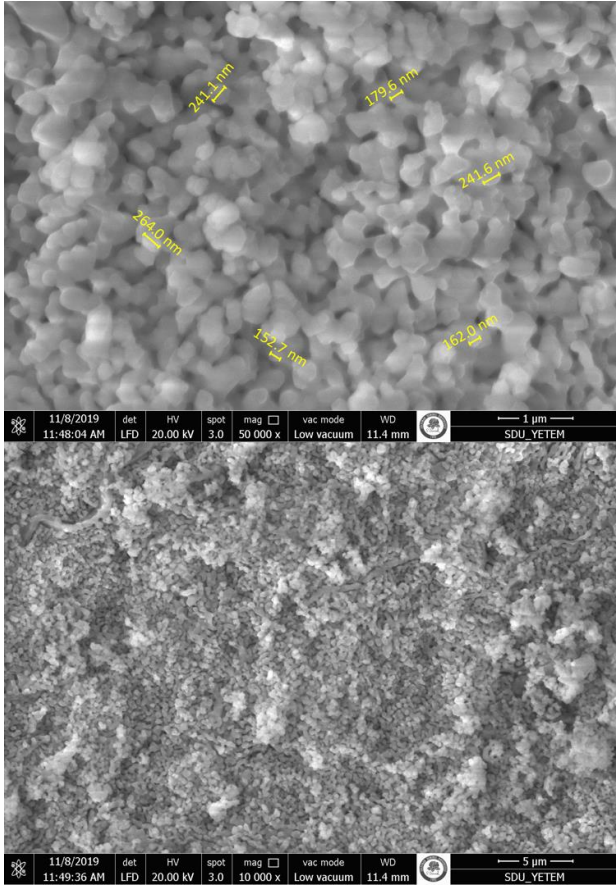
3. Bulgular

3.1 SEM analiz sonuçları

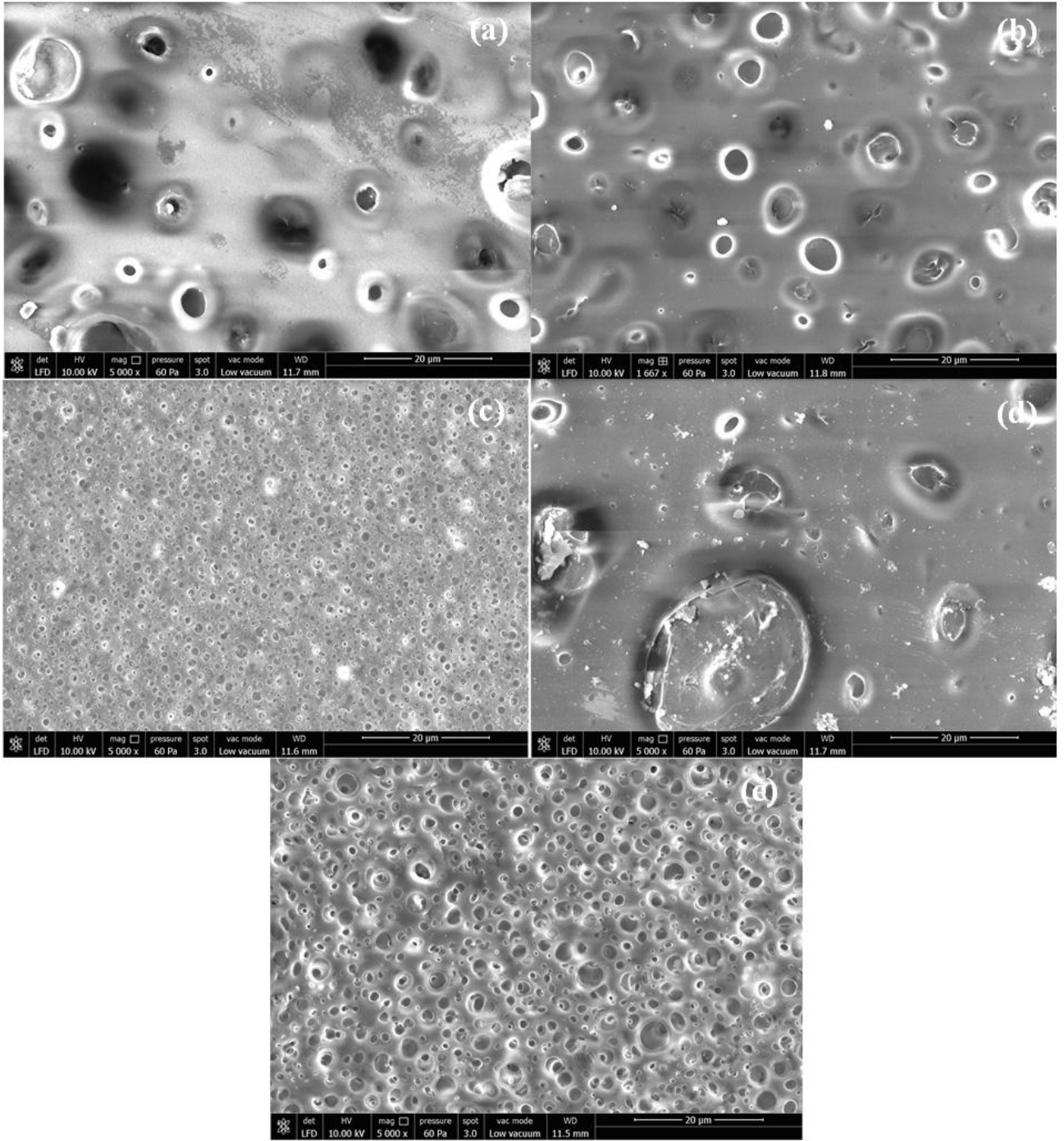
Yaş yöntemi ile sentezlenen nHA'nın SEM analizi Şekil 1'de verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde hidroksiapatitin nano boyutlarda sentezlenmiş olduğu görülmektedir.

Şekil 2-7'de nHA katkılı ve katkısız PMMA, PS ve PVA membranlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekillerdeki görüntüler 5000 kat ve 3000 kat büyütülmüş görüntülerdir. SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzey karakterizasyonlarının farklı olduğu görülmüştür. PMMA ile hazırlanan membranların yüzeylerinin daha gözenekli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, % nHA içeriğinin değişmesi ile gözenek boyutu ve yoğunluğunun değiştiği görülmüştür. PS ile hazırlanan membranlar incelendiğinde yalın PS membranın gözenekli yapıda

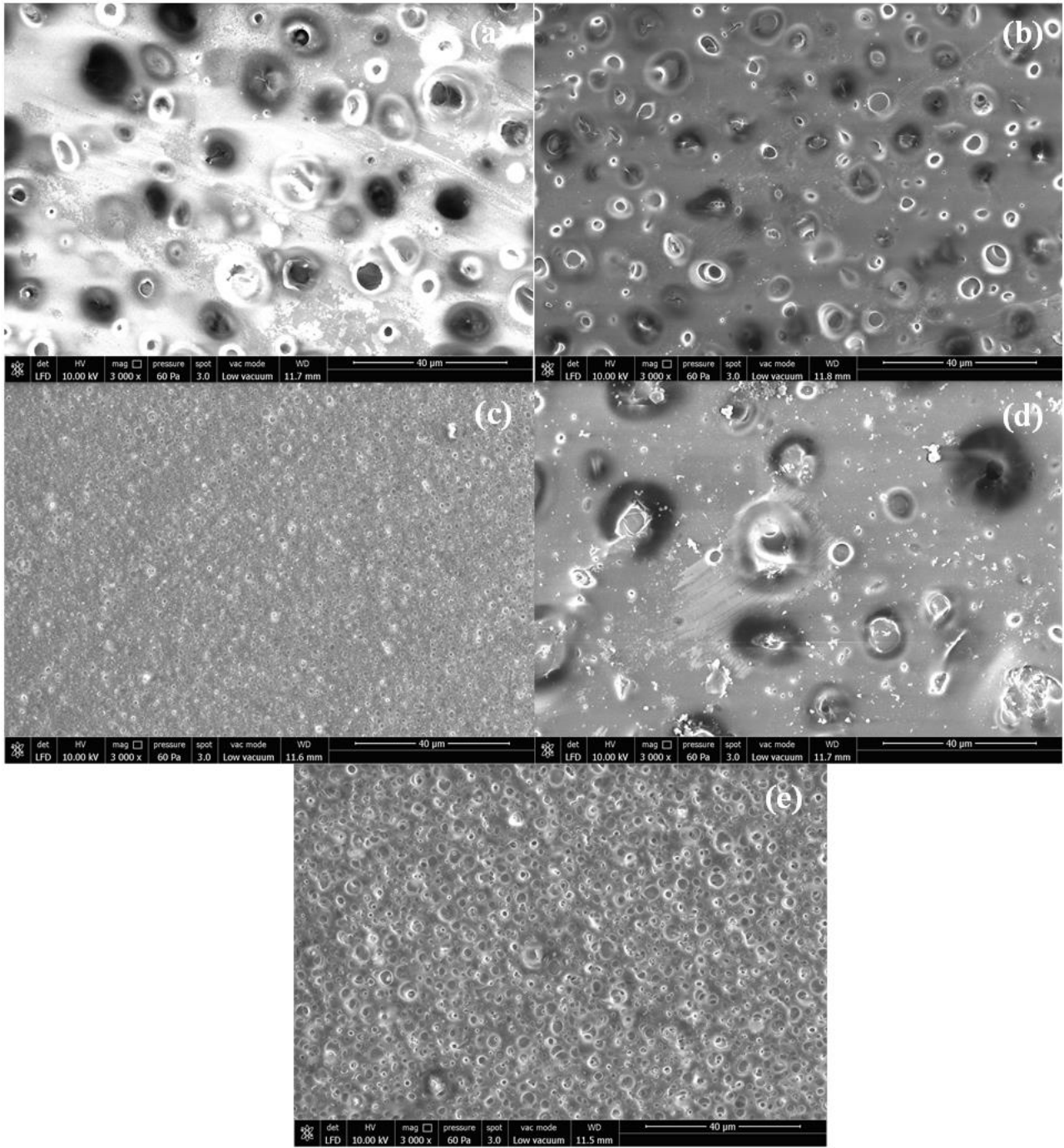
olduğu, ancak %nHA katkılı PS membranların PMMA ile hazırlanan membranlara göre daha az gözenek yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. PS ile hazırlanan membranlarda % nHA içeriğinin artması ile yüzeyin daha gözeneksiz bir yapıya sahip olduğu da görülmüştür. PVA içerikli membranların SEM görüntüleri incelendiğinde ise yine daha gözeneksiz bir yapıya sahip oldukları ve en fazla gözenekli yapının ise % 7 nHA içerikli membranda olduğu söylenebilir.



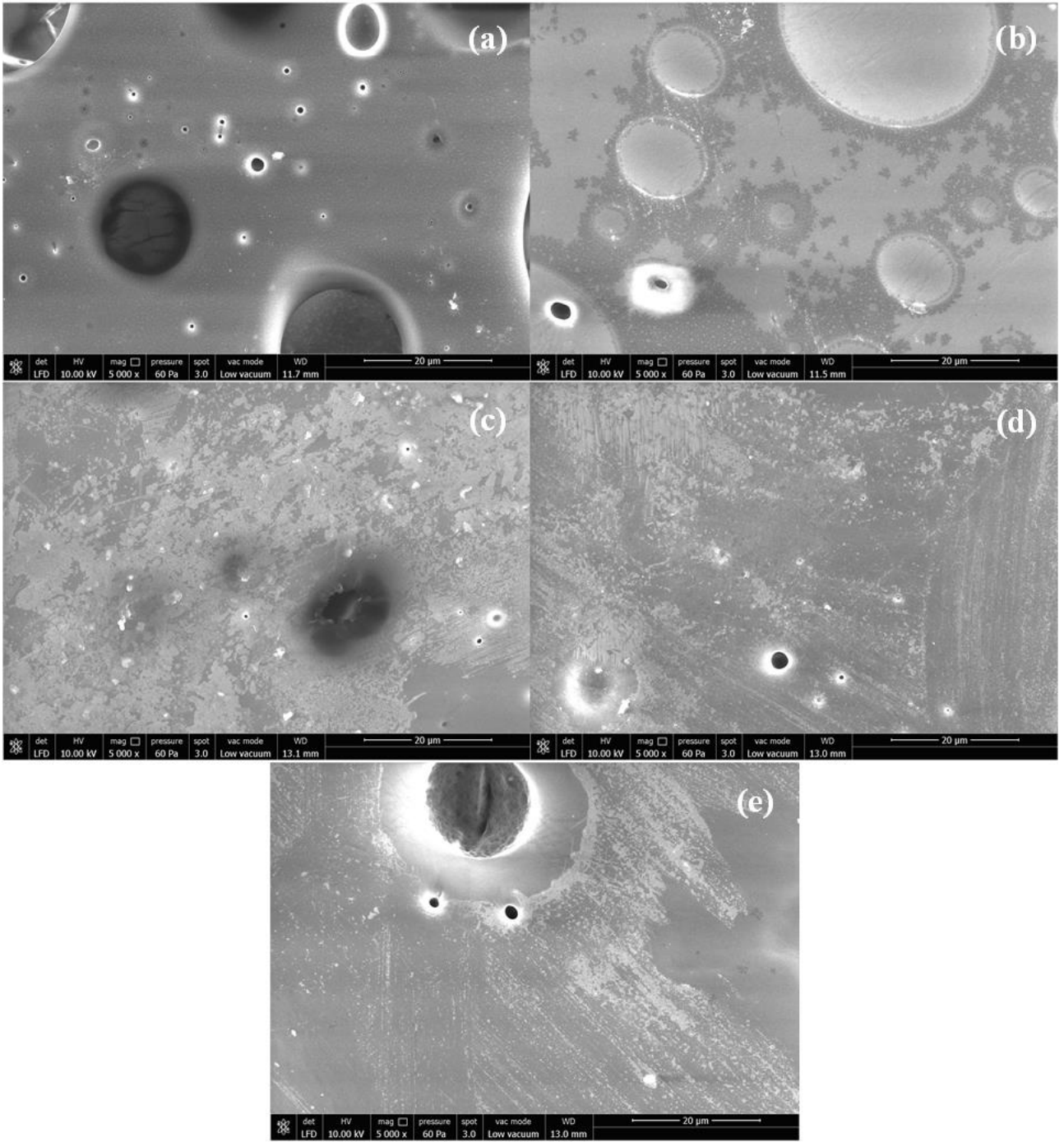
Şekil 1. Sentezlenen nHA SEM görüntüsü



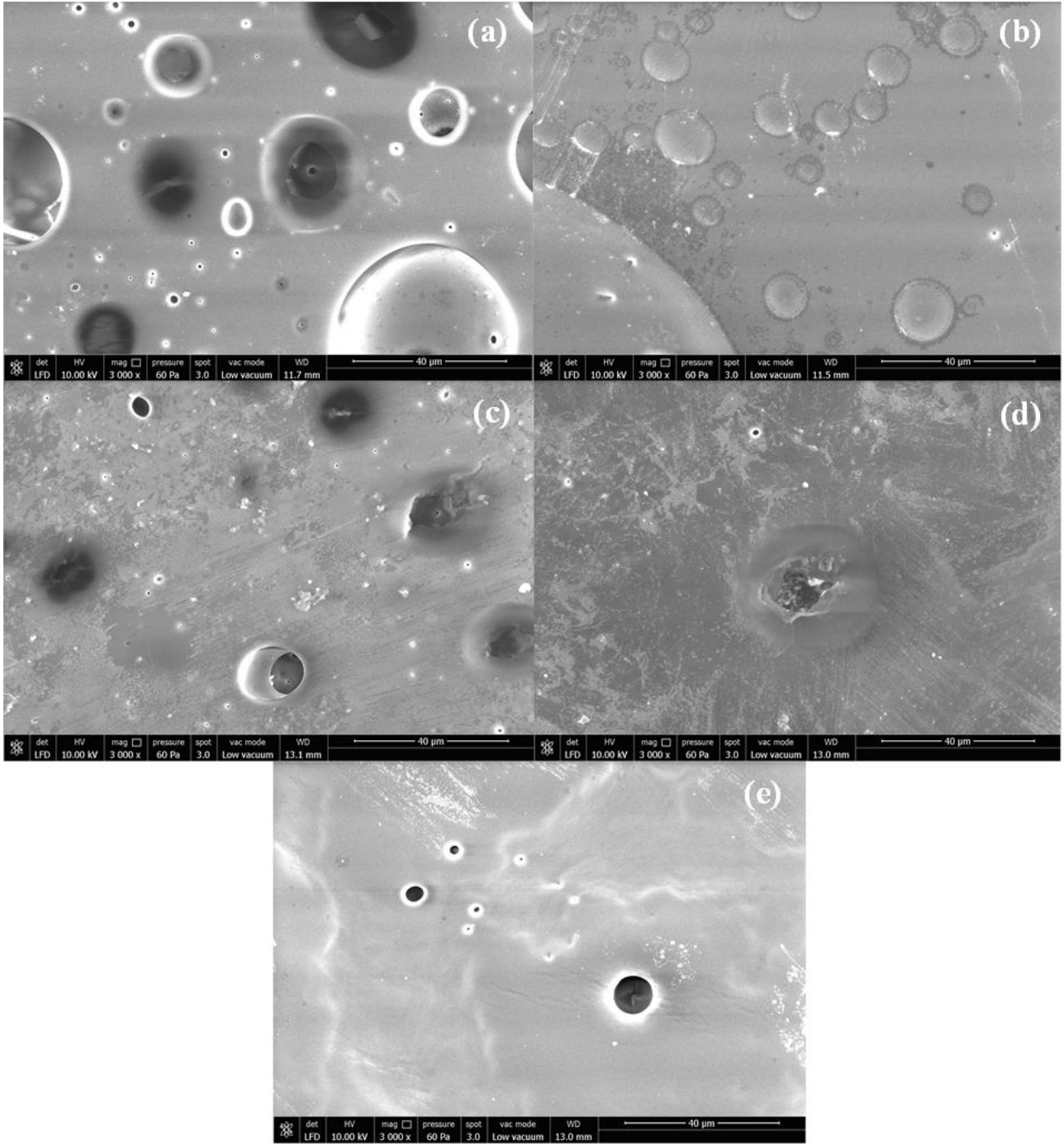
Şekil 2. PMMA membranların SEM görüntüsü (Büyütme: 5000), (a) Yalın PMMA, (b) % 1 nHA içeren PMMA, (c) % 3 nHA içeren PMMA, (d) % 5 nHA içeren PMMA, (e) % 7 nHA içeren PMMA



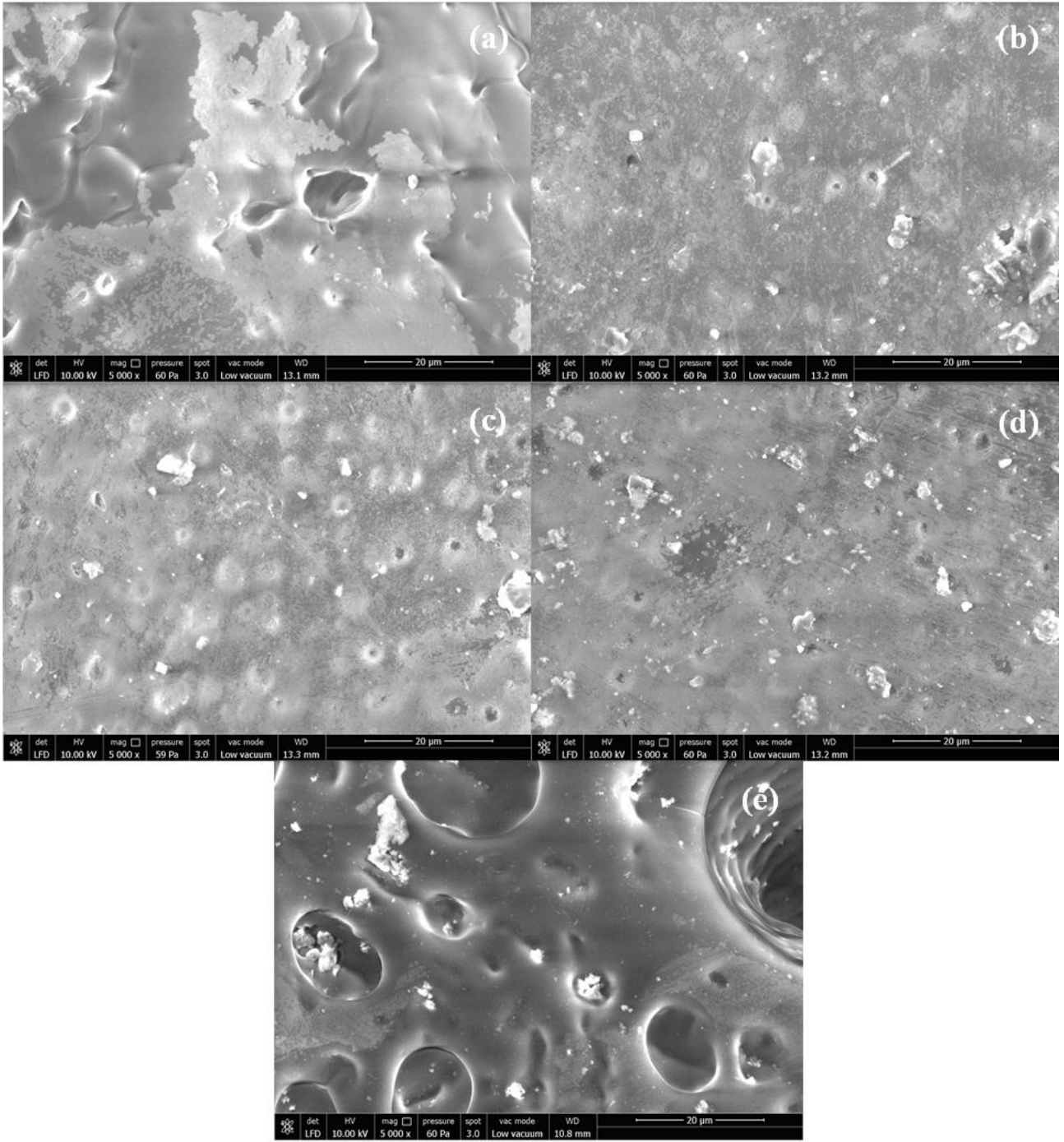
Şekil 3. PMMA membranların SEM görüntüsü (Büyütme: 3000), (a) Yalın PMMA, (b) % 1 nHA içeren PMMA, (c) % 3 nHA içeren PMMA, (d) % 5 nHA içeren PMMA, (e) % 7 nHA içeren PMMA



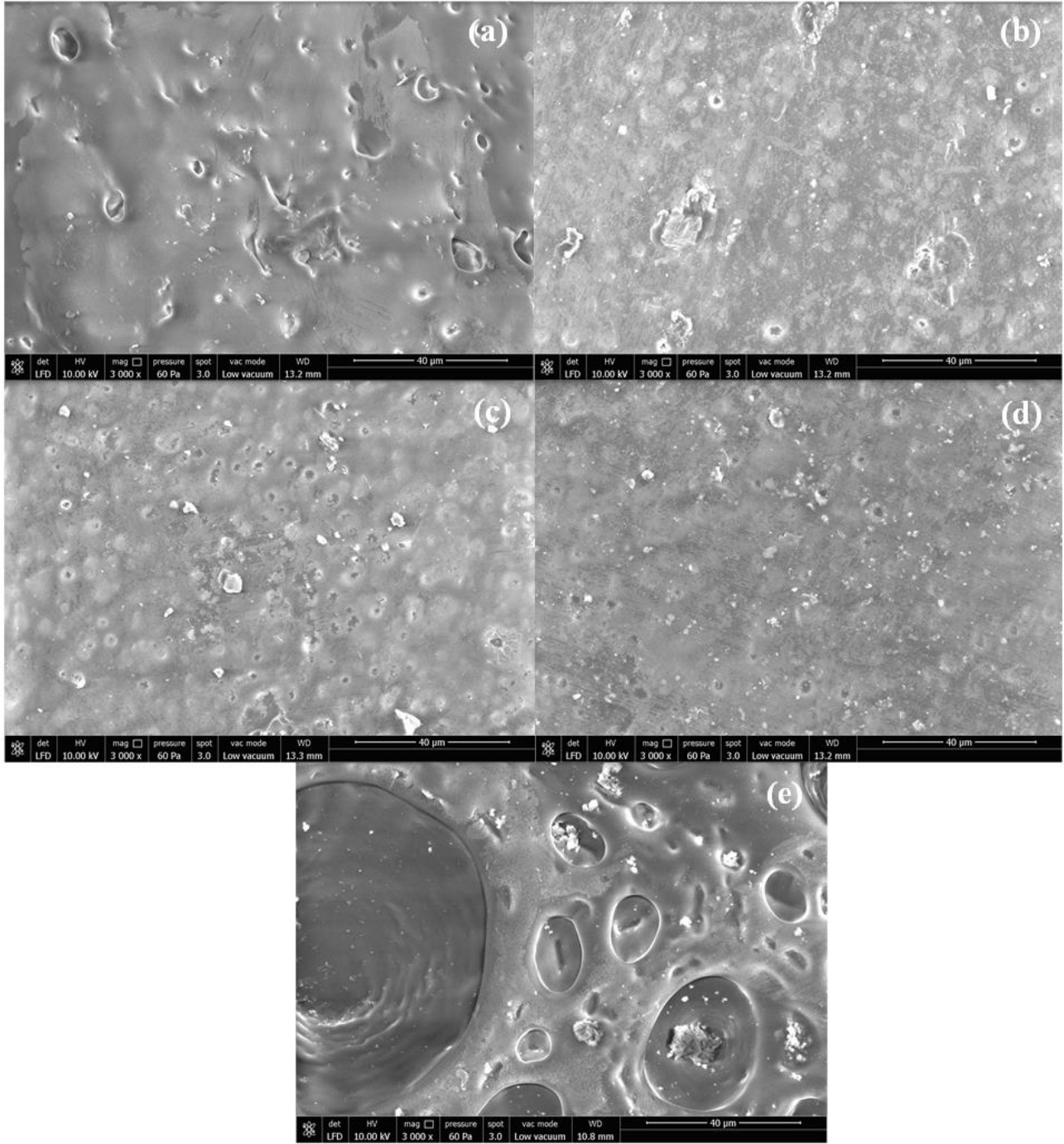
Şekil 4. PS membranların SEM görüntüsü (Büyütme: 5000), (a) Yalın PS, (b) % 1 nHA içeren PS, (c) % 3 nHA içeren PS, (d) % 5 nHA içeren PS, (e) % 7 nHA içeren PS



Şekil 5. PS membranların SEM görüntüsü (Büyütme: 3000), (a) Yalın PS, (b) % 1 nHA içeren PS, (c) % 3 nHA içeren PS, (d) % 5 nHA içeren PS, (e) % 7 nHA içeren PS



Şekil 6. PVA membranların SEM görüntüsü (Büyütme: 5000), (a) Yalın PVA, (b) % 1 nHA içeren PVA, (c) % 3 nHA içeren PVA, (d) % 5 nHA içeren PVA, (e) % 7 nHA içeren PVA



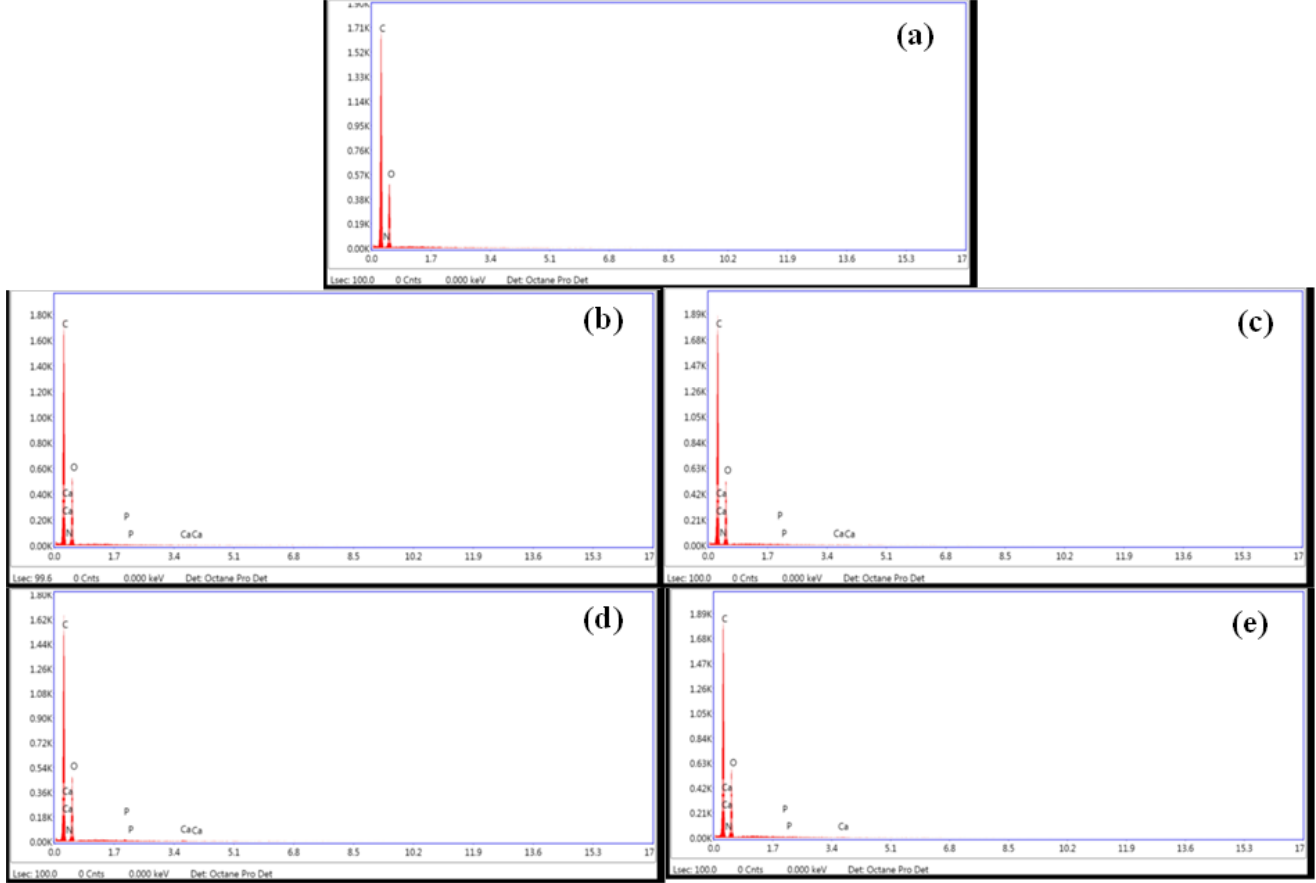
Şekil 7. PVA membranların SEM görüntüsü (Büyütme: 3000), (a) Yalın PVA, (b) % 1 nHA içeren PVA, (c) % 3 nHA içeren PVA, (d) % 5 nHA içeren PVA, (e) % 7 nHA içeren PVA

3.2 Membranların SEM-EDS analiz sonuçları

3.2.1. PMMA membranların SEM-EDS analiz sonuçları

PMMA membranının hazırlanmasında kullanılan bileşenlerden PMMA ve PVP polimerlerinin molekül yapısı Şekil 8'de verilmiştir. PMMA'nın molekül formülü $[\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{CO}_2\text{CH}_3)]_n$, PVP'nin molekül formülü ise $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$ şeklindedir. PMMA bileşiğinin molekül

yapısına baktığımızda C, O ve H atomlarından, PVP'nin ise C, H, N ve O atomlarından meydana geldiği görülmektedir. Her iki polimer ile hazırlanan yalın PMMA membranının SEM-EDS analizi sonucunda C, N, O atomlarının olduğu görülmektedir (Şekil 8, Çizelge 5). PMMA membranına % 1, 3, 5, 7 oranında nHA eklendiğindeki SEM-EDS analizleri incelendiğinde ise P, Ca atomlarının dahil olduğu görülmektedir. Elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları doğrultusunda yapı doğrulanmaktadır.



Şekil 8. PMMA membranların SEM-EDS grafikleri, (a) Yalın PMMA, (b) % 1 nHA içeren PMMA, (c) % 3 nHA içeren PMMA, (d) % 5 nHA içeren PMMA, (e) % 7 nHA içeren PMMA

Çizelge 5. PMMA membranların atom miktarları

Element	Yalın PMMA		%1 nHA içeren PMMA		%3 nHA içeren PMMA		%5 nHA içeren PMMA		%7 nHA içeren PMMA	
	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik
C	64.99	70.95	65.79	71.88	66.34	72.42	66.34	72.82	66.44	72.59
N	3.01	2.82	1.43	1.34	1.76	1.64	0.27	0.25	0.73	0.68
O	32.01	26.23	32.56	26.71	31.43	25.76	32.11	26.46	32.40	26.58
P	-	-	0.06	0.02	0.22	0.09	0.42	0.18	0.14	0.06
Ca	-	-	0.17	0.06	0.25	0.08	0.85	0.28	0.29	0.10

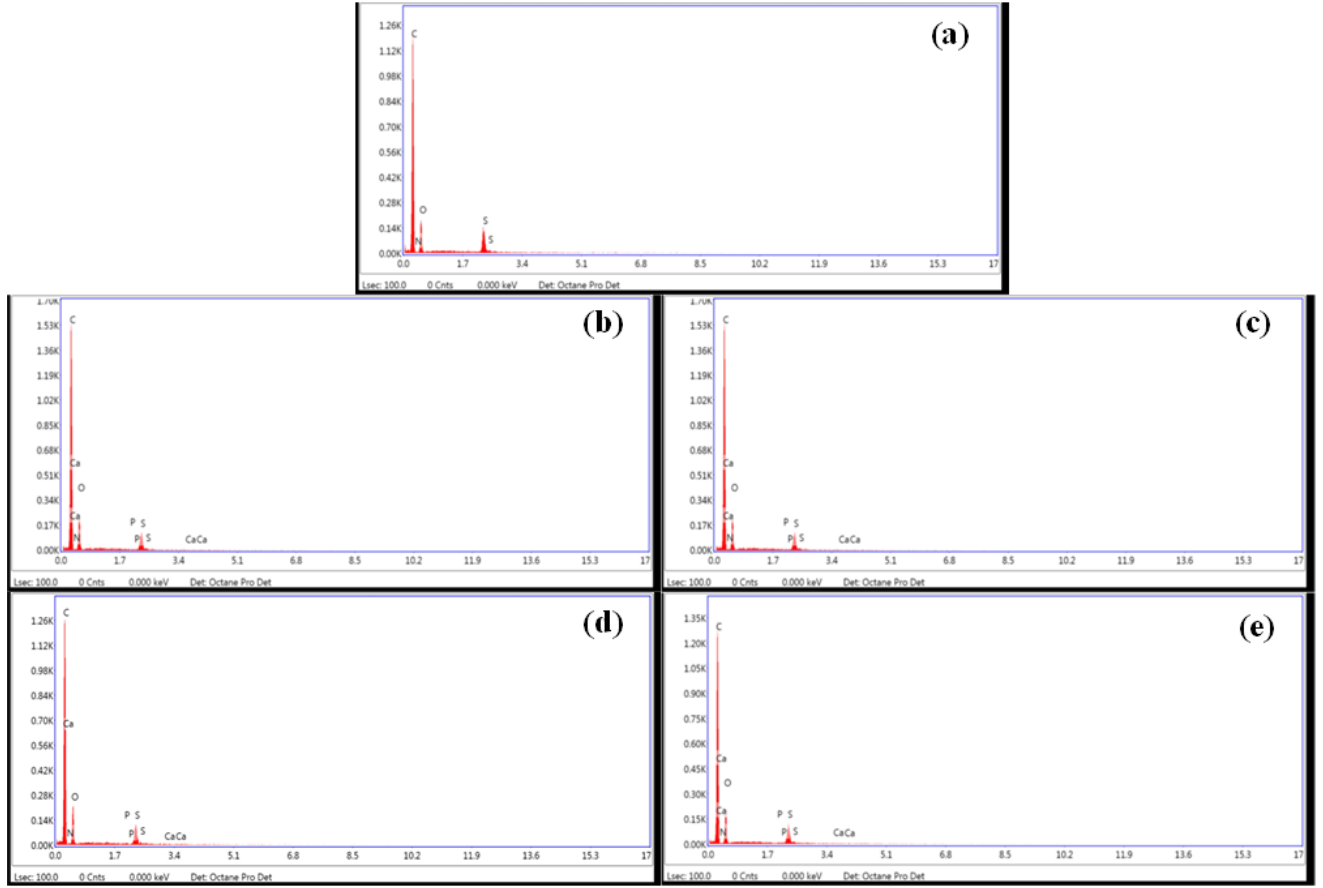
3.2.2. PS membranların SEM-EDS analiz sonuçları

PS'un molekül formülü $[\text{C}_6\text{H}_4-4-\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4-4-\text{OC}_6\text{H}_4-4-\text{SO}_2\text{C}_6\text{H}_4-4-\text{O}]_n$ şeklindedir. PS bileşiğinin formülüne baktığımızda C, O, S ve H atomlarından, PVP'nin ise C, H, N ve O atomlarından meydana geldiği görülmektedir. Her iki polimer ile hazırlanan yalın PS

membranının SEM-EDS analizi sonucunda yapıda C, N, O, S atomlarının olduğu görülmektedir (Şekil 9, Çizelge

6). PS membranına % 1, 3, 5, 7 oranında nHA eklendiğindeki SEM-EDS sonuçlarından yapıda P, Ca atomlarının dahil olduğu görülmektedir. Elde edilen

SEM-EDS analiz sonuçları doğrultusunda yapı doğrulanmaktadır.



Şekil 9. PS membranların SEM-EDS grafikleri, (a) Yalın PS, (b) % 1 nHA içeren PS, (c) % 3 nHA içeren PS, (d) % 5 nHA içeren PS, (e) % 7 nHA içeren PS

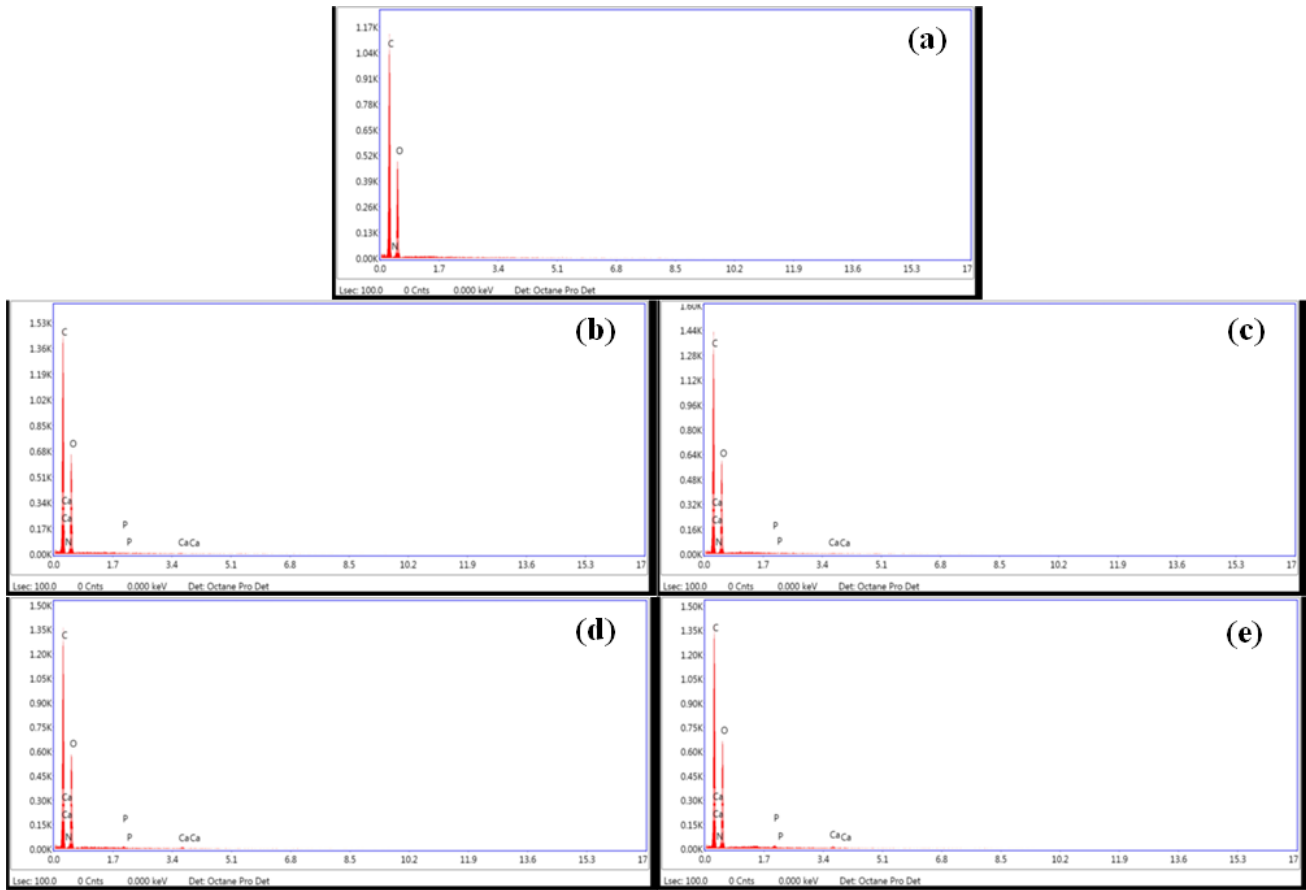
Çizelge 6. PS membranların atom miktarları

Element	Yalın PS		%1 nHA içeren PS		%3 nHA içeren PS		%5 nHA içeren PS		%7 nHA içeren PS	
	%	Atomik	%	Atomik	%	Atomik	%	Atomik	%	Atomik
C	75.14	82.77	75.56	82.69	74.38	82.21	74.50	81.79	76.33	83.68
N	1.91	1.80	1.79	1.68	1.53	1.45	2.45	2.30	0.79	0.74
O	14.37	11.89	15.47	12.71	15.45	12.82	14.71	12.57	15.04	12.38
S	8.58	3.54	6.72	2.76	7.70	3.19	7.25	2.98	7.54	3.10
P	-	-	0.15	0.06	0.25	0.11	0.24	0.10	0.06	0.03
Ca	-	-	0.32	0.10	0.70	0.23	0.85	0.26	0.24	0.08

3.2.3. PVA membranların SEM-EDS analiz sonuçları

PVA'nın molekül formülü $[-CH_2CHOH-]_n$ şeklindedir. PVA bileşiğinin formülüne bakıldığında C, O ve H atomlarından, PVP'nin ise C, H, N ve O atomlarından meydana geldiği görülmektedir. Yalın PVA membran

SEM-EDS analizi sonucu, yapıda C, N, O atomlarının olduğu görülmektedir (Şekil 10, Çizelge 7). PVA membranına % 1, 3, 5, 7 oranında nHA eklendiğindeki SEM-EDS analizleri yapıya P, Ca atomlarının dahil olduğunu göstermektedir. Elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları doğrultusunda yapı doğrulanmaktadır.



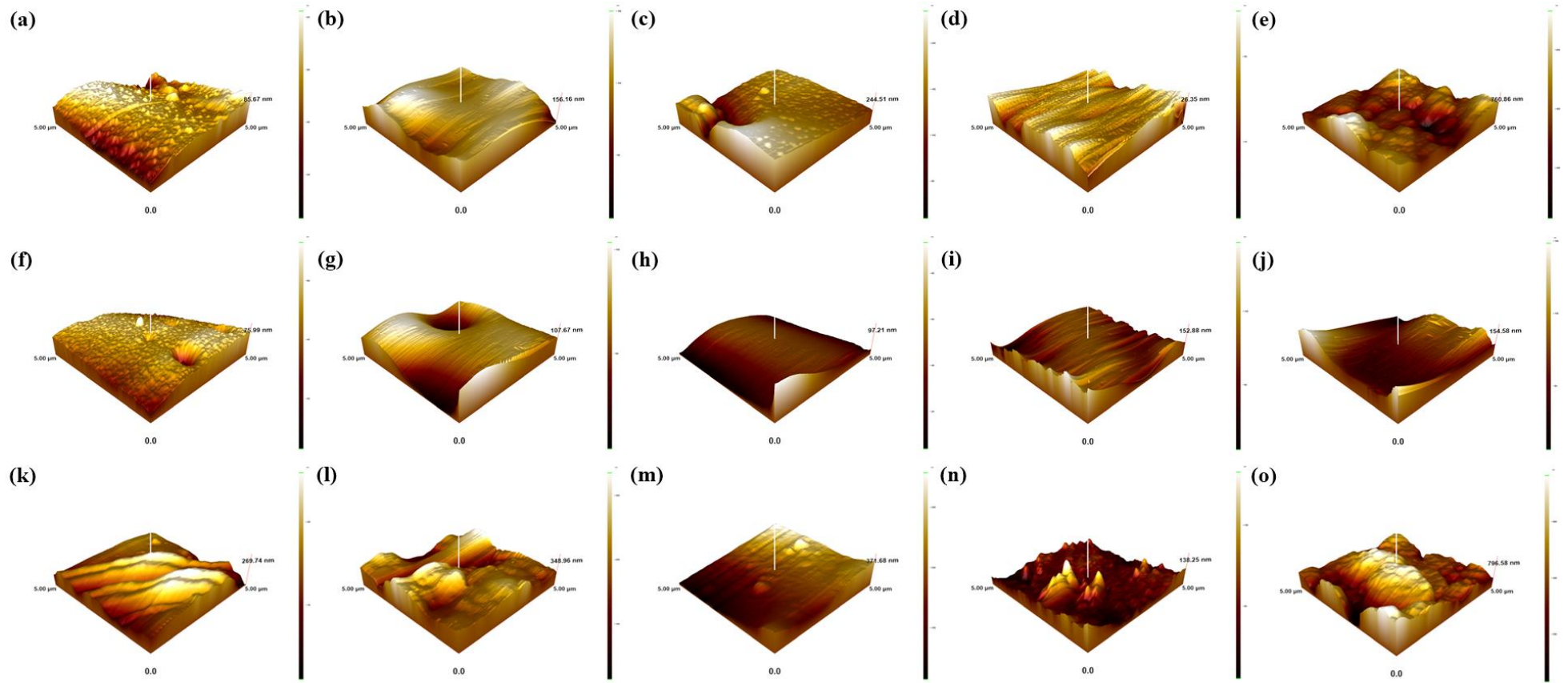
Şekil 10. PVA membranların SEM-EDS grafikleri, (a) Yalın PVA, (b) % 1 nHA içeren PVA, (c) % 3 nHA içeren PVA, (d) % 5 nHA içeren PVA, (e) % 7 nHA içeren PVA

Çizelge 7. PS membranların atom miktarları

Element	Yalın PVA		%1 nHA içeren PVA		%3 nHA içeren PVA		%5 nHA içeren PVA		%7 nHA içeren PVA	
	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik	% Ağırlık	% Atomik
C	59.75	66.22	59.60	66.34	60.51	67.17	59.20	66.36	57.26	64.85
N	2.43	2.31	1.05	1.00	0.79	0.75	0.49	0.47	0.53	0.51
O	37.82	31.47	38.88	32.49	38.32	31.94	38.73	32.59	39.58	33.66
P	-	-	0.13	0.06	0.11	0.05	0.48	0.21	0.88	0.39
Ca	-	-	0.34	0.11	0.27	0.09	1.09	0.37	1.75	0.59

3.3. AFM analiz sonuçları

Yalın PMMA, PS, PVA, n-HA katkılı (% 1, 3, 5, 7) PMMA, PS ve PVA polimerik nanokompozit membranlara ait AFM görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. Ayrıca, hazırlanan membranların Roughness değerleri Çizelge 8'de yer almaktadır. Bütün AFM görüntüleri incelendiğinde farklı polimerlerle hazırlanmış ve farklı nHA içerikli membranlarda yüzey karakterizasyonunun farklı olduğu görülmektedir. Mevcut kullanım amacı dahilinde farklı yüzey topografisinin önemli bir etkisi olacağı beklenmemektedir. Ancak, ilerideki çalışmalarda yüzey modifikasyonu gerekebilecek durumlar için, elde edilen AFM sonuçları karşılaştırma bağlamında önemli olacaktır.



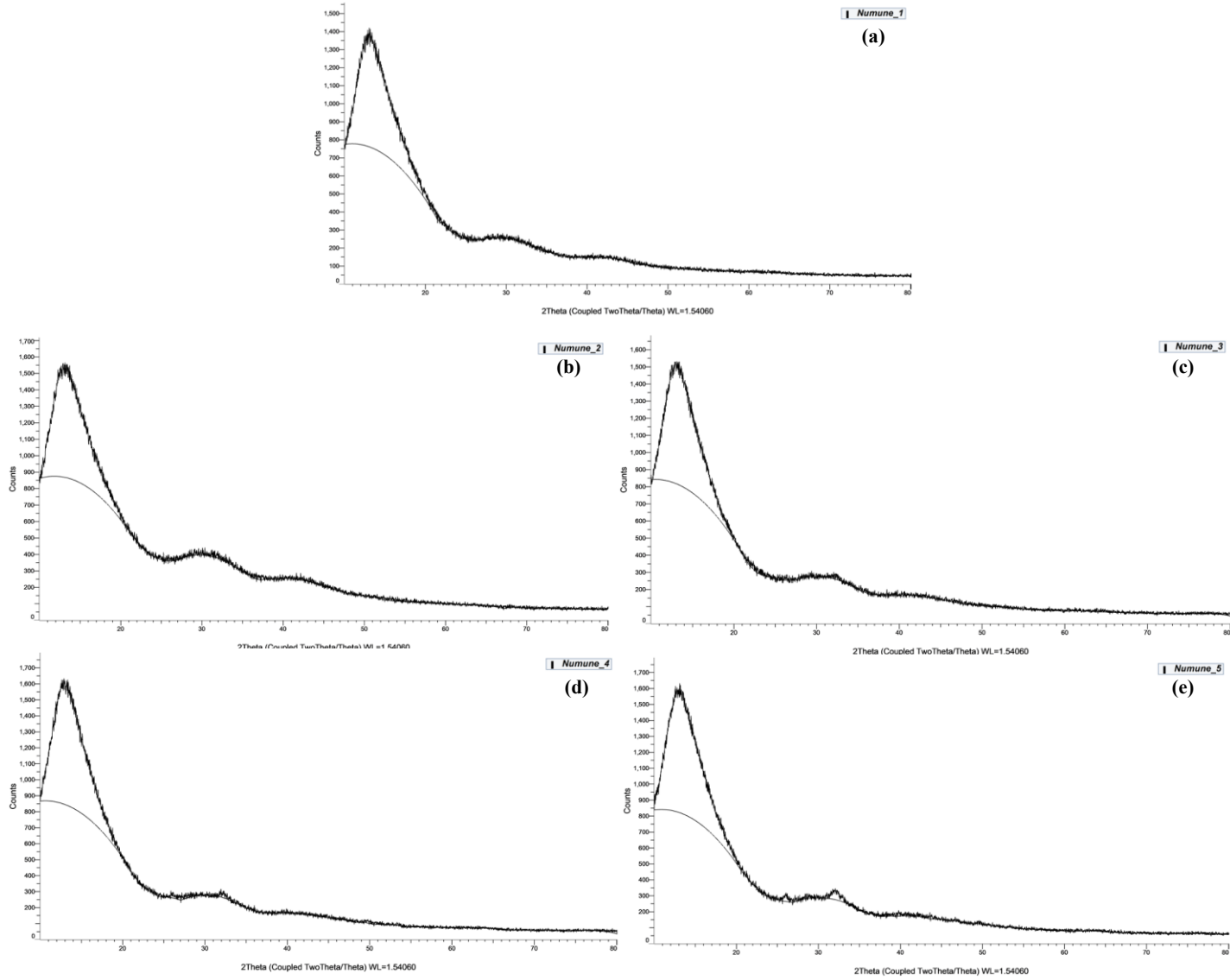
Şekil 11. Membranların AFM görüntüleri, (a) Yalın PMMA, (b) % 1 nHA içeren PMMA, (c) % 3 nHA içeren PMMA, (d) % 5 nHA içeren PMMA, (e) % 7 nHA içeren PMMA, (f) Yalın PS, (g) % 1 nHA içeren PS, (h) % 3 nHA içeren PS, (i) % 5 nHA içeren PS, (j) % 7 nHA içeren PS, (k) Yalın PVA, (l) % 1 nHA içeren PVA, (m) % 3 nHA içeren PVA, (n) % 5 nHA içeren PVA, (o) % 7 nHA içeren PVA.

Çizelge 8. Membranların Roughness değerleri

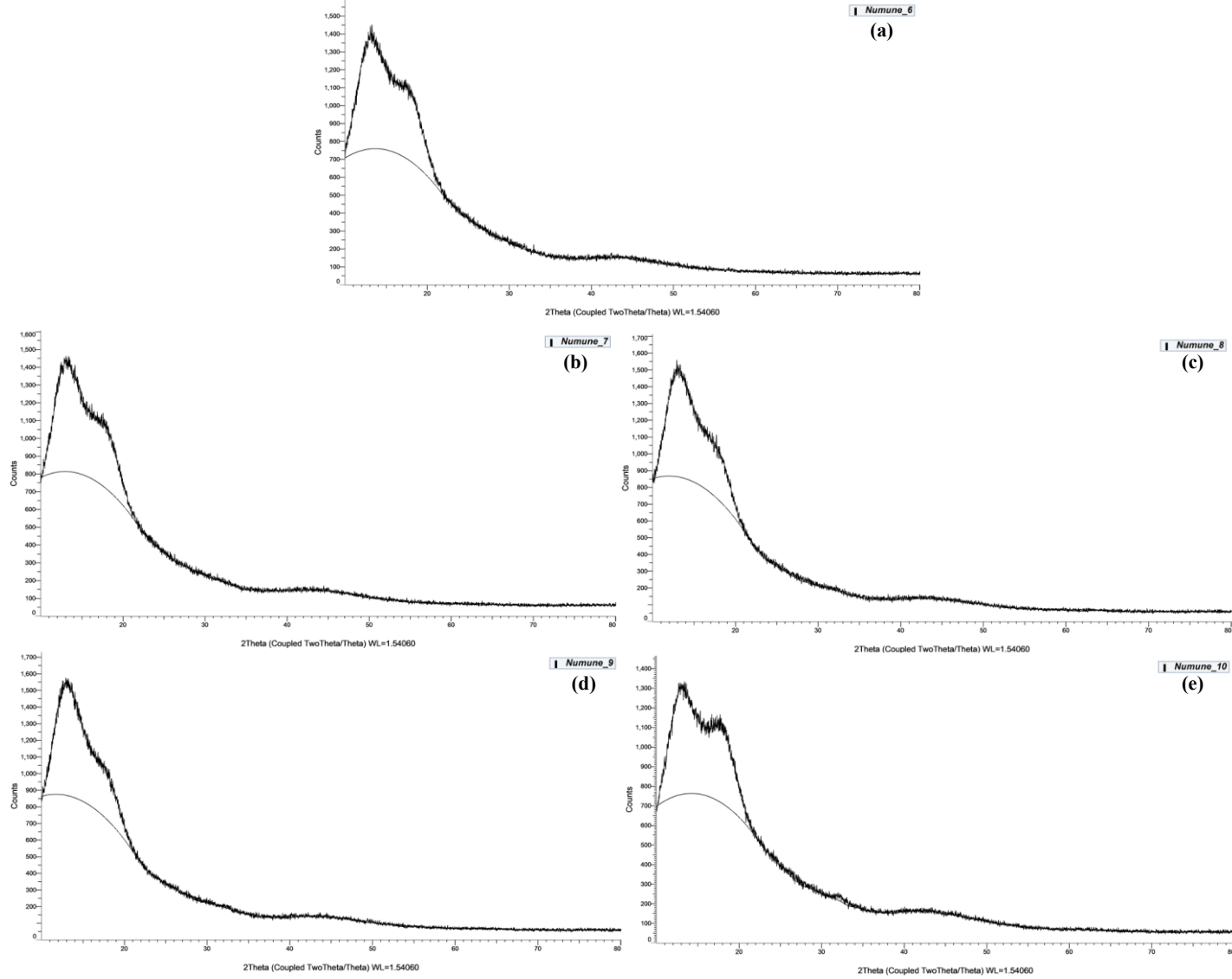
Membran	Roughness (Ra)
Yalın PMMA membranı	10.56 nm
%1 nHA katkılı PMMA membranı	12.9 nm
%3 nHA katkılı PMMA membranı	25.90 nm
%5 nHA katkılı PMMA membranı	1.70 nm
%7 nHA katkılı PMMA membranı	86.04 nm
Yalın PS membranı	7.81 nm
%1 nHA katkılı PS membranı	16.72 nm
%3 nHA katkılı PS membranı	11.53 nm
%5 nHA katkılı PS membranı	13.64 nm
%7 nHA katkılı PS membranı	19.88 nm
Yalın PVA membranı	32.26 nm
%1 nHA katkılı PVA membranı	40.32 nm
%3 nHA katkılı PVA membranı	63.81 nm
%5 nHA katkılı PVA membranı	11.85 nm
%7 nHA katkılı PVA membranı	115.41 nm

3.4 Membranların XRD analiz sonuçları

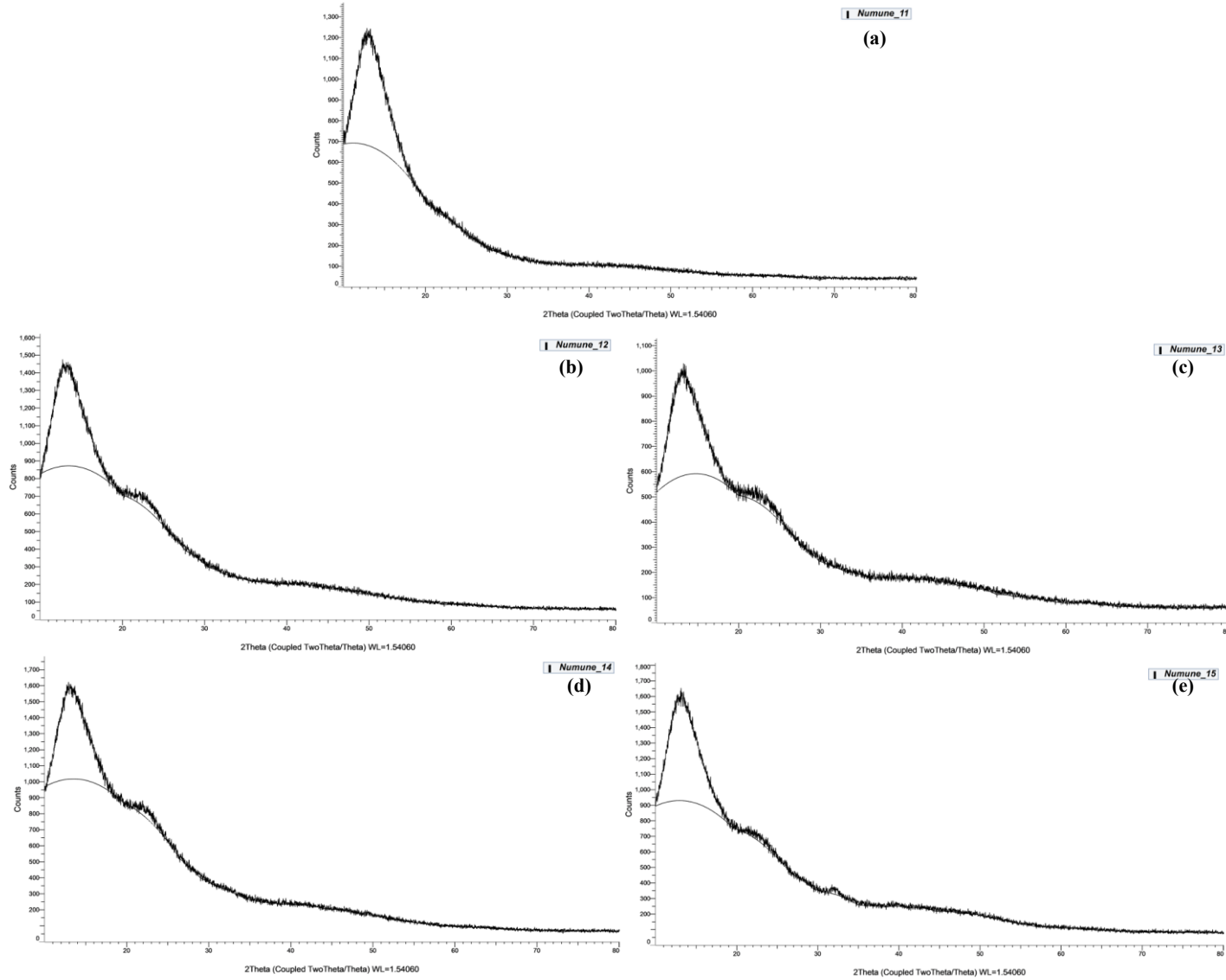
XRD analizi, polimerin kristal yapısını, fazını ve gerilimini veya gerilmesini göstermek için kullanılmaktadır. Yalın ve n-HA katkılı (% 1, 3, 5, 7) PMMA, PS ve PVA polimerik nanokompozit membranlara ait XRD ölçümleri yapılmış ve elde edilen XRD grafikleri Şekil 12-14'de verilmiştir. Çizelge 9'da da membranların XRD grafiklerinden elde edilen temas açısı değerleri görülmektedir.



Şekil 12. PMMA membranların XRD grafikleri, (a) Yalın PMMA, (b) % 1 nHA içeren PMMA, (c) % 3 nHA içeren PMMA, (d) % 5 nHA içeren PMMA, (e) % 7 nHA içeren PMMA



Şekil 13. PS membranların XRD grafikleri, (a) Yalın PS, (b) % 1 nHA içeren PS, (c) % 3 nHA içeren PS, (d) % 5 nHA içeren PS, (e) % 7 nHA içeren PS



Şekil 14. PVA membranların XRD grafikleri, (a) Yalın PVA, (b) % 1 nHA içeren PVA, (c) % 3 nHA içeren PVA, (d) % 5 nHA içeren PVA, (e) % 7 nHA içeren PVA

Çizelge 9. Membranların XRD grafiklerinde temas açısı değerleri

Numune	Temas Açısı (2 θ)	Numune	Temas Açısı (2 θ)	Numune	Temas Açısı (2 θ)
Yalın PMMA	13.05° 30.52°	Yalın PS	13.26° 41.04°	Yalın PVA	12.88°
% 1 nHA katkılı PMMA	13.35° 30.14°	% 1 nHA katkılı PS	13.06° 19.12° 43.21°	% 1 nHA katkılı PVA	12.77° 22.15°
% 3 nHA katkılı PMMA	13.10° 34.01°	% 3 nHA katkılı PS	12.91° 18.05° 42.24°	% 3 nHA katkılı PVA	13.38° 21.97°
% 5 nHA katkılı PMMA	12.9° 34.26°	% 5 nHA katkılı PS	13.22° 18.32° 41.14°	% 5 nHA katkılı PVA	13.06° 21.97°
% 7 nHA katkılı PMMA	13.08° 26.22° 32.35°	% 7 nHA katkılı PS	13.38° 18.21° 32.19° 42.23°	% 7 nHA katkılı PVA	13.14° 21.82° 32.04°

Literatürde, PMMA polimeri farklı oranlarda amorf ve kristal bölge içeren bir polimer malzeme olarak kategorize edilmektedir. Ayrıca, XRD paterni, $2\theta = 9.16^\circ$ ve 19.12° 'de dikkate değer yüksek yoğunluklu Bragg kırınım tepe noktaları gösterdiği belirtilmiştir. Bu piklerin, PMMA'nın karakteristik XRD pikleri olduğu yapılan literatür taraması sonucu elde edilmiştir [9]. Çalışmamızda, yalın PMMA nanokompozit membranı (PMMA/PVP) için 2θ açısında 13.05° 'lik büyük bir tepe noktası ve 30.52° 'de ise sönük bir tepe noktası sergilediği görülmüştür. 13.05° 'lik keskin tepe noktası kristal yapıyı, 30.52° 'de görülen sönük yayvan tepe noktası ise amorf yapıyı vurgulamaktadır. Sonuçların literatürdeki sonuçlar ile farklı olmasının sebebinin çözelti içeriğinde bulunan çapraz bağlayıcı PVP'den kaynaklandığı düşünülmektedir.

PMMA içeren membranlara % nHA (%1, 3 ve 5) ilavesi ile 2θ 'da 14° 'de keskin bir pik, 26° - 32° arasında nispeten düşük yoğunlukta piklerin meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca %7 nHA içeren PMMA membranda ise 13.08° , 26.22° ve 32.32° 'de keskin piklerin olduğu görülmüştür. Pik şiddetlerinin farklı nHA yüzdelğinde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum elde edilen membranların kristal ve amorf özelliklerinin farklılaşmasından kaynaklanmaktadır.

PS polimerinin, 2θ açısında 17.69° de geniş bir tepe noktası gösterdiği ve malzemenin de amorf bir yapı sergilediği yapılan literatür taraması sonucu elde edilmiştir [10]. Çalışmamızda, yalın PS nanokompozit membranı (PS/PVP) için 2θ açısında 13.26° 'lik büyük bir tepe noktası, 19.12° 'lik yayvan pik ve 41° - 47° arasında ise sönük bir tepe noktası görülmüştür. 13.26° 'lik keskin tepe noktası kristal yapıyı, 19.12° 'lik yayvan pik ve 41° - 47° arasında görülen sönük yayvan tepe noktası ise amorf yapıyı temsil etmektedir. Bu yarı kristalli yapının literatürdeki sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüş olup, derece farklılığının ise çapraz bağlayıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

% nHA içeren PS membranların sonuçlarına bakıldığında yalın PS membran için elde edilen benzer piklerin görüldüğü sonucuna varılmıştır. 19.12° 'de elde edilen yayvan pikin % 3 ve % 5 nHA içeren membranlarda bir miktar sönümlendiği, % 7 nHA içeren membranda ise yalın membrana göre daha keskinleştiği görülmüştür. Bu durumun membranlardaki kristal ve amorf yapının farklılaşmasından kaynaklandığı söylenebilir.

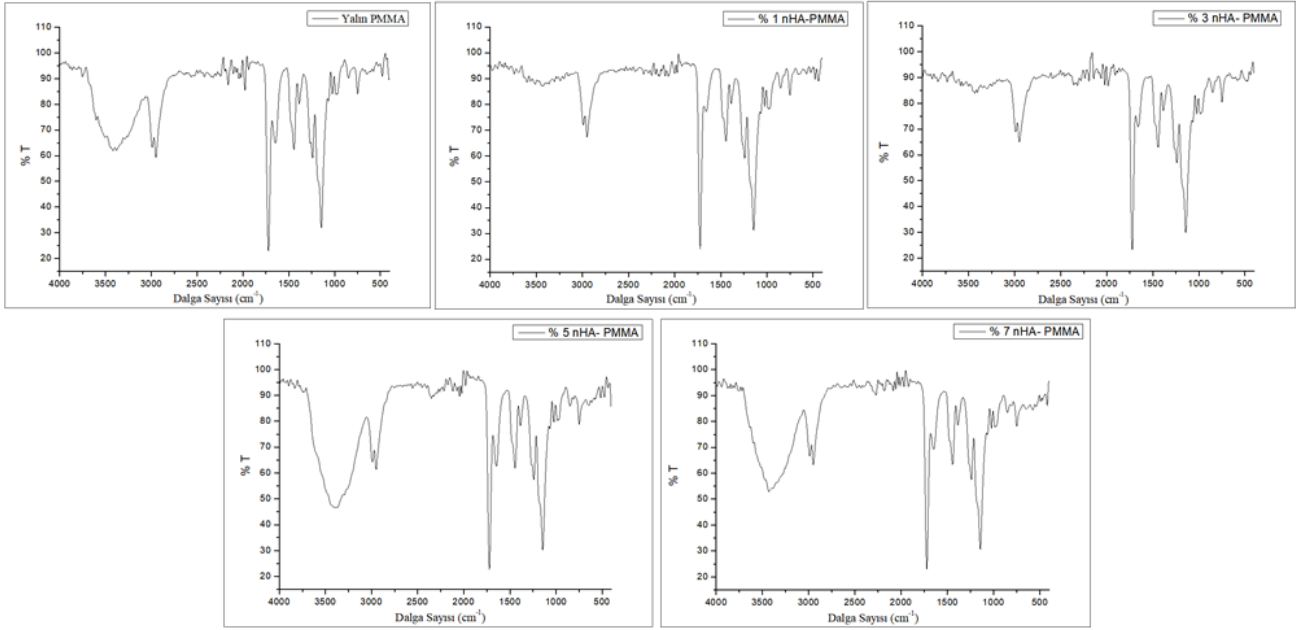
Yalın PVA polimerinin, 2θ açısında 19 - 20° 'lik büyük bir tepe noktası ve 39 - 40° 'lik küçük bir tepe noktası ile yarı kristalli bir yapı sergilediği yapılan literatür taraması sonucu görülmüştür [11]. Çalışmamızda, yalın PVA nanokompozit membranı (PVA/PVP) için 2θ 'da 12.88° 'de büyük bir tepe noktası ve 41° - 47° arasında da sönük bir pik elde edilmiştir. 12.88° 'lik keskin tepe noktası kristal yapıyı, 41° - 47° arasında görülen sönük yayvan tepe noktası ise amorf yapıyı vurgulamaktadır. Yapının yarı kristalli bir yapı sergilediği görülmüştür. Elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüş, derece farklılığının ise çapraz bağlayıcıdan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

PVA içeren membranlara % nHA ilavesi ile 2θ 'da 13.38° 'de keskin bir pik ve 20° - 25° arasında nispeten düşük yoğunlukta bir pik gözlenmiştir. Pik şiddetlerinin farklı nHA yüzdelğinde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sebebinin membran hazırlanmasında polimerin molekül zincirinde oluşan etkileşimlerden ve değişimlerden kaynaklandığı düşünülmekte olup elde edilen membranların kristal ve amorf yapılarından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca %7 nHA içeren PVA membranda diğer piklere ek olarak 31° - 33° arasında sönük bir pik de görülmektedir.

3.5. Membranların FT-IR analiz sonuçları

FT-IR analizi ile malzemenin molekül içi bağlarını, molekül yapısını ve molekül içi fonksiyonel gruplarını tayin etmek mümkündür. FTIR ölçümleri 4000 - 400 cm^{-1} aralığında gerçekleştirilmiştir. Membranların FTIR spektrumları Şekil 15-17'de verilmiştir.

PMMA polimerinin FTIR spektrumuna bakıldığında 1240 cm^{-1} 'de şiddetli bir gerilme titreşim bandı görülmüştür (Şekil 15). Bu bant C-O-C gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 779 cm^{-1} 'deki bant α -metil grubunda yer alan C-H gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Molekülün parmak izi bölgesinde meydana gelen 984 cm^{-1} ve 848 cm^{-1} 'deki bantlar da PMMA'nın karakteristik gerilme titreşimlerine aittir. 1444 cm^{-1} 'deki bant sebebi ise $-\text{CH}_3$ grubundaki C-H bağlarının eğilme titreşimidir. 1722 cm^{-1} 'deki bant C=O bağlarının gerilme titreşimine aittir. 2991 cm^{-1} ve 2950 cm^{-1} 'deki bantlar sırasıyla $-\text{CH}_3$ ve $-\text{CH}_2$ gruplarındaki C-H bağlarının gerilme titreşimleridir. 1386 cm^{-1} 'deki orta şiddetli bant PVP'nin yapısında bulunan C-N bağlarından kaynaklanmaktadır. FTIR analizi sonucu elde edilen piklerin PMMA'nın karakteristik pikleri olduğu doğrulanmıştır [12].



Şekil 15. PMMA membranların FTIR görüntüleri

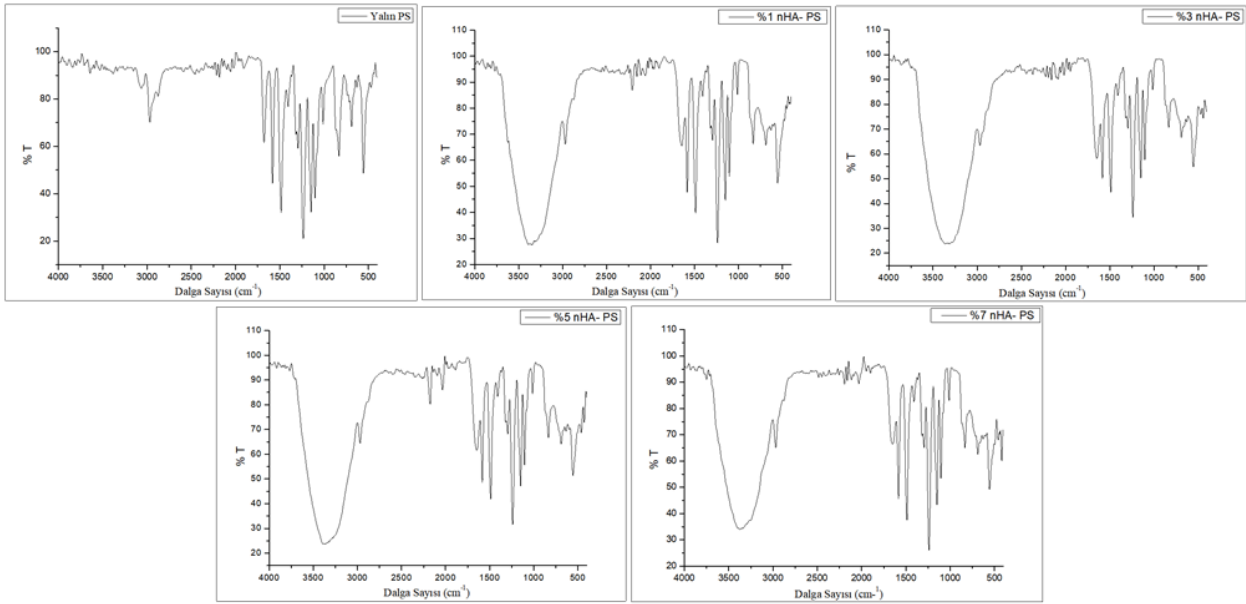
Şekil 15'te, %1 nHA içeren PMMA membranının FTIR spektrumuna bakıldığında, 779 cm^{-1} 'deki bant α -metil grubunda yer alan C-H gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. 1024 cm^{-1} 'deki bant yapıya girmiş olan nHA'ten kaynaklanan P-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1443 cm^{-1} 'deki bant sebebi ise $-\text{CH}_3$ grubundaki C-H bağlarının eğilme titreşimidir. 1723 cm^{-1} 'deki şiddetli bant C=O bağlarının gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2991 cm^{-1} ve 2949 cm^{-1} 'deki orta şiddetli bantlar sırasıyla $-\text{CH}_3$ ve $-\text{CH}_2$ gruplarındaki C-H bağlarının gerilme titreşimlerine aittir. 1386 cm^{-1} 'deki orta şiddetli bant PVP'nin yapısında bulunan C-N bağlarından kaynaklanmaktadır. %3 nHA içeren PMMA membranının FTIR spektrumunda 779 cm^{-1} 'deki bant α -metil grubunda yer alan C-H gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. 1024 cm^{-1} 'deki bant yapıya girmiş olan nHA'ten kaynaklanan P-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1442 cm^{-1} 'deki bant sebebi ise $-\text{CH}_3$ grubundaki C-H bağlarının eğilme titreşimidir. 1724 cm^{-1} 'deki bandın C=O bağlarının gerilme titreşimine ait olabileceği değerlendirilmektedir. 2989 cm^{-1} ve 2948 cm^{-1} 'deki bantlar sırasıyla $-\text{CH}_3$ ve $-\text{CH}_2$ gruplarındaki C-H bağlarının gerilme titreşimlerine aittir. 1386 cm^{-1} 'deki orta şiddetli bant PVP'nin yapısında bulunan C-N bağlarından kaynaklanmaktadır. %5 nHA içeren PMMA membranının FTIR spektrumunda, 748 cm^{-1} 'deki bant α -metil grubunda yer alan C-H gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. 1024 cm^{-1} 'deki bant yapıya girmiş olan nHA'ten kaynaklanan P-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1443 cm^{-1} 'deki bant sebebi ise $-\text{CH}_3$ grubundaki C-H bağlarının eğilme titreşimidir. 1723 cm^{-1} 'deki bandın C=O bağlarının gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2991 cm^{-1} ve 2950 cm^{-1} 'deki bantlar sırasıyla $-\text{CH}_3$ ve $-\text{CH}_2$ gruplarındaki C-H bağlarının gerilme titreşimlerine aittir. 3400 cm^{-1} 'de meydana gelen şiddetli bant,

membranın yapısına % oranında katılan nHA'in fonksiyonel grubu olan O-H'tan kaynaklanmaktadır. Bu durum yapımızda nHA varlığını doğrulamaktadır. %7 nHA içeren PMMA membranının FTIR spektrumunda, 748 cm^{-1} 'deki bant α -metil grubunda yer alan C-H gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. 1024 cm^{-1} 'deki bant yapıya girmiş olan nHA'ten kaynaklanan P-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1443 cm^{-1} 'deki bant sebebi ise $-\text{CH}_3$ grubundaki C-H bağlarının eğilme titreşimidir. 1722 cm^{-1} 'deki bandın C=O bağlarının gerilme titreşimine ait olabileceği değerlendirilmektedir. 2990 cm^{-1} ve 2949 cm^{-1} 'deki bantlar sırasıyla $-\text{CH}_3$ ve $-\text{CH}_2$ gruplarındaki C-H bağlarının gerilme titreşimlerine aittir. Genel olarak baktığımızda, 3429 cm^{-1} 'de meydana gelen şiddetli bant, membranın yapısına eklenen nHA'in fonksiyonel grubu olan O-H'tan kaynaklanmaktadır. %1 ve %3'te nHA ilavesinde O-H bandındaki şiddet çok fazla değişmezken %5 ve %7 oranında nHA ilaveli membranlarda O-H grubundan kaynaklanan 3400 cm^{-1} civarında görülen bandın daha da şiddetlendiği belirlenmiştir. Bu durum yapımızda nHA varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca yalın PMMA membranında olmayan 530 cm^{-1} civarındaki zayıf bant yapıya nHA eklenmesi ile ortaya çıkmıştır. Eklenen nHA yüzdesinin artmasıyla beraber bu bandın da şiddetlendiği belirlenmiştir.

Yalın PS membranının FTIR spektrumuna bakıldığında, 1450 cm^{-1} - 1600 cm^{-1} aralığında bulunan 1582 cm^{-1} ve 1485 cm^{-1} titreşimleri C=C gerilme titreşim bandını görülmektedir (Şekil 16). Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubunun 1406 cm^{-1} de eğilme bandı bulunmaktadır. 1236 cm^{-1} , 1147 cm^{-1} ve 1103 cm^{-1} 'deki bantlar C-N bağlarının gerilme titreşimine aittir. 833 cm^{-1} - 690 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-H aromatik halkasına ait titreşimdir. %1 nHA katkılı

polimerik PS membranının FTIR spektrumunda ise, 1583 cm^{-1} ve 1487 cm^{-1} titreşimleri C=C gerilme titreşim bandını ifade etmektedir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 1408 cm^{-1} 'de eğilme bandı bulunmaktadır. 1230 cm^{-1} , 1149 cm^{-1} ve 1105 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine aittir. 3346 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'in bağlandığının önemli bir göstergesidir. 749 cm^{-1} - 647 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-C aromatik halkasına aittir. 833 cm^{-1} - 688 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-H aromatik halkasına ait titreşimdir. %3 nHA katkılı polimerik PS membranının FTIR spektrumunda, 1583 cm^{-1} ve 1487 cm^{-1} titreşimleri C=C gerilme titreşim bandını ifade etmektedir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 1408 cm^{-1} 'de eğilme bandı bulunmaktadır. 1230 cm^{-1} , 1149 cm^{-1} ve 1104 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine aittir. 3366 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'in bağlandığının önemli bir göstergesidir. 749 cm^{-1} - 647 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-C aromatik halkasına aittir. 833 cm^{-1} - 689 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-H aromatik halkasına ait titreşimdir. %5 nHA katkılı polimerik PS membranının FTIR spektrumunda, 1583 cm^{-1} ve 1487 cm^{-1} titreşimleri C=C gerilme titreşim bandını ifade

etmektedir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 1408 cm^{-1} 'de eğilme bandı bulunmaktadır. 1230 cm^{-1} , 1149 cm^{-1} ve 1104 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine aittir. 3365 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'in bağlandığının önemli bir göstergesidir. 749 cm^{-1} - 647 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-C aromatik halkasına aittir. 833 cm^{-1} - 689 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-H aromatik halkasına ait titreşimdir. %7 nHA içeren PS membranlarının FTIR spektrumunda ise, 1584 cm^{-1} ve 1487 cm^{-1} titreşimleri C=C gerilme titreşim bandını ifade etmektedir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 1408 cm^{-1} 'de eğilme bandı bulunmaktadır. 1230 cm^{-1} , 1149 cm^{-1} ve 1105 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine aittir. 3372 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'in bağlandığının önemli bir göstergesidir. 749 cm^{-1} - 647 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-C aromatik halkasına aittir. 833 cm^{-1} - 689 cm^{-1} arasındaki düzlem dışı eğilme C-H aromatik halkasına ait titreşimdir. Ayrıca yalın PS membranında olmayan 520 cm^{-1} civarındaki zayıf bandın yapıya nHA eklenmesi ile ortaya çıkmıştır. Eklenen nHA yüzdesinin artmasıyla beraber bu bandın da şiddetlendiği belirlenmiştir.



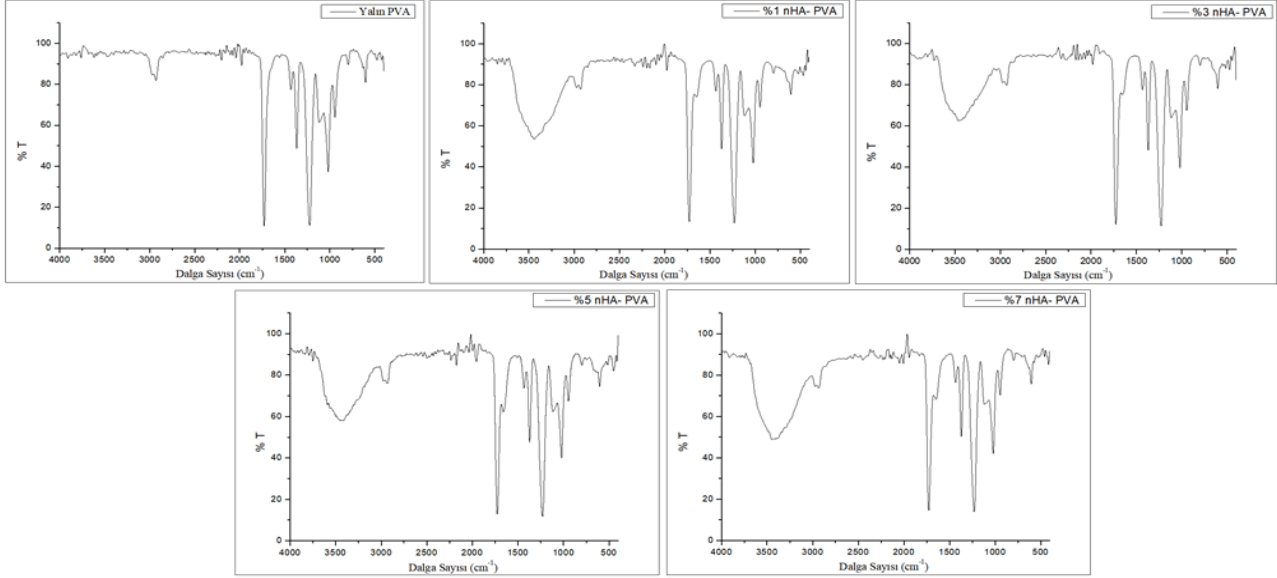
Şekil 16. PS membranların FTIR görüntüleri

Yalın PVA membranının FTIR spektrumunda, 1225 cm^{-1} , 1117 cm^{-1} ve 1019 cm^{-1} 'deki bantlar C-N bağlarının gerilme titreşimine aittir (Şekil 17). 1728 cm^{-1} 'de görülen şiddetli bant C=O gerilme titreşimine aittir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 2969 cm^{-1} ve 2928 cm^{-1} 'de gerilme titreşimleri bandı bulunmaktadır. %1 nHA içeren polimerik PVA membranının FTIR spektrumunda, 1228 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} ve 1020 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine ait olabileceği değerlendirilmektedir. 1727 cm^{-1} 'de görülen şiddetli bant C=O gerilme titreşimine aittir.

Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 2971 cm^{-1} ve grubu 2928 cm^{-1} 'de gerilme titreşimleri bandı bulunmaktadır. 3443 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'in bağlandığının önemli bir göstergesidir. %3 nHA içeren polimerik PVA membranının FTIR spektrumunda, 1228 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} ve 1020 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine ait olabileceği değerlendirilmektedir. 1726 cm^{-1} 'de görülen şiddetli bant C=O gerilme titreşimine aittir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 2974 cm^{-1} ve grubu 2931 cm^{-1} 'de gerilme

titreşimleri bandı bulunmaktadır. 3448 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'nın bağlandığının önemli bir göstergesidir. %5 nHA içeren polimerik PVA membranın FTIR spektrumunda ise, 1228 cm^{-1} , 1114 cm^{-1} ve 1021 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine ait olabileceği değerlendirilmektedir. 1726 cm^{-1} 'de görülen şiddetli bant C=O gerilme titreşimine aittir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 2974 cm^{-1} ve grubu 2932 cm^{-1} 'de gerilme titreşimleri bandı bulunmaktadır. 3434 cm^{-1} görülen

geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'nın bağlandığının önemli bir göstergesidir. %7 nHA içeren PVA membranlarının FTIR spektrumunda, 1229 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} ve 1021 cm^{-1} 'deki bantların C-N bağlarının gerilme titreşimine ait olabileceği değerlendirilmektedir. 1726 cm^{-1} 'de görülen şiddetli bant C=O gerilme titreşimine aittir. Alifatik bir bileşik olan PVP'nin yapısında bulunan C-H fonksiyonel grubu 2937 cm^{-1} titreşim bandı bulunmaktadır. 3447 cm^{-1} görülen geniş O-H gerilme titreşimi yapıya nHA'nın bağlandığının önemli bir göstergesidir.



Şekil 17. PVA membranların FTIR görüntüleri

4. Sonuç

Bu çalışmada, membran teknolojisi kullanarak biyolojik uygulaması olan farklı polimerlerin (PMMA, PS, PVA) kemik yerine kullanılabilecek özelliğe sahip olan nHA ile bir araya getirilmesiyle polimerik nanokompozit membranlar hazırlanmıştır. Membranların hazırlanması faz inversiyon metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ortopedi alanında sıklıkla kullanılan PMMA, PS, PVA polimerlerinin uygun çözücünde kontrollü bir sıcaklıkta, homojen bir şekilde çözünmesi sağlanmıştır. Çapraz bağlayıcı olan PVP, DMF içinde belirli bir sıcaklıkta homojen oluncaya kadar karıştırılmış ve çözünmesi sağlanmıştır. Her iki homojen çözelti yavaş yavaş birleştirilerek karıştırılmıştır. Çözeltiye hazırlanan nHA' ten belirli miktarlarda (kütlece %1, %3, %5, %7) eklenmiştir. Hazırlanan polimerik nanokompozit membranların karakterizasyon işlemleri FTIR, SEM, SEM-EDS, XRD ve AFM analizleri kullanılarak yapılmıştır. SEM analizinde nHA içeren membranlar ile yalın polimerik membranların SEM görüntüleri arasında morfolojik farklılıkların olduğu ve yüzey karakterizasyonlarının değişiklikler gösterdiği tespit edilmiştir. PMMA ile hazırlanan membranların yüzeylerinin daha gözenekli olduğu görülmüştür. Ayrıca, % nHA içeriğinin değişmesi ile gözenek boyutu ve yoğunluğunun değiştiği görülmektedir. PS ile

hazırlanan membranlar incelendiğinde PMMA ile hazırlanan membranlara göre daha az gözenek yapısına sahip olduğu bulunmuştur. % nHA içeriğinin artması ile yüzeyin daha gözeneksiz bir yapıya sahip olduğu da görülmektedir. PVA içerikli membranların SEM görüntüleri incelendiğinde ise yine daha gözeneksiz bir yapıya sahip oldukları ve en fazla gözenekli yapının ise %7 nHA içerikli membranda olduğu bulunmuştur.

Membranların SEM-EDS grafikleri ile elementel analizleri yapılmıştır. PMMA, PS ve PVA membranların hazırlanmasında kullanılan kimyasallar düşünüldüğünde membranların formasyon yapıları SEM-EDS grafikleri ve elementel analiz sonuçları ile doğrulanmıştır. Membrana nHA eklenmesi ile yapıya Ca ve P elementlerinin de dahil olduğu görülmüştür.

AFM analizi, yalın PMMA, PS, PVA ve n-HAp katkı kütlece (%1, %3, %5, %7) PMMA, PS, PVA polimerik nanokompozit membranlar için yapılmıştır. Bütün AFM görüntüleri incelendiğinde farklı polimerlerle hazırlanmış ve farklı nHA içerikli membranlarda yüzey karakterizasyonunun tüm membranlarda birbirinden farklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Membranların kristal yapısını aydınlatabilmek için XRD analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar

değerlendirilmiş ve hazırlanan polimerik nanokompozit membranların kristal yapıları aydınlatılmıştır. Literatürdeki yalın PMMA, PS ve PVA membranları için mevcut olan XRD verileri ile bizim çalışmamızdaki veriler uyumlu olmakla birlikte, gözlenen belirli miktardaki derece farklılıklarının sebebinin çözelti içeriğinde bulunan çapraz bağlayıcı PVP'den kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Membranların molekül içi fonksiyonel grupların incelenebilmesi FTIR analizi yapılmıştır. FTIR analizi sonucu elde edilen piklerin PMMA, PS ve PVA'nın karakteristik pikleri olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca yalın PMMA, PS ve PVA membranında olmayan 530 civarındaki zayıf bandın yapıya nHA eklenmesi ile ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Eklenen nHA yüzdesinin artmasıyla beraber bu bandın da şiddetlendiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, kemik, diş ve diş minesinin inorganik yapısını oluşturan ve mükemmel biyoyumlu bir malzeme olan hidroksiapatit ile; yüksek yüzey sertliğine sahip olan polimerlerden olan PMMA ve PS bir arada kullanılmıştır. Ortopedi alanındaki uygulamalardan olan kalça protezlerinde mekanik olarak dayanımları yüksek malzemeler tercih edilmektedir. PMMA ve PS ile hazırlanan nanokompozit içeriğindeki hidroksiapatitin mükemmel biyoyumluluğu ve kemik yapısına benzerliği nedeniyle canlı üzerinde kullanımına yönelik gerekli testleri de (biyoyumluluk, hemouyumluluk, in vivo, in vitro vb.) yapıldıktan sonra kalça protezi kaplamalarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

PVA ve HA ile hazırlanan polimerik nanokompozit membranların gözenekli bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Hazırlanan membranların canlı hücreler üzerinde gerekli testlerinin yapılmasından sonra, membranın bu gözenekli özelliği sayesinde kan gibi istenmeyen sıvıların vücut dışına çıkışına engel olacak yara örtüsü olarak kullanılabileceği de değerlendirilmektedir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Aslan, M. 2016. Membran teknolojileri. 1. Baskı. Türkiye Çevre Koruma Vakfı, Ankara, 275s.
- [2] Baker, R.W. 2000. Membrane technology. Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 3, 184–249.
- [3] Jain, S., Bajpai, A.K. 2013. Designing polyethylene glycol (PEG)-plasticized membranes of poly (vinyl alcohol-g-methyl methacrylate) and investigation of water sorption and blood compatibility behaviors. Designed Monomers and Polymers, 16(5), 436-446.
- [4] Tomasino, C. 1992. Chemistry & Technology of Fabric Preparation & Finishing, North Carolina State University, USA, 245s.
- [5] Aslam, M., Kalyar, M.A., Raza Z.A. 2018. Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites. Polymer Engineering and Science, 58(12), 2115-2331.
- [6] Ekmen, M. 2009. Hidroksiapatit kristallerinin kontrollü ilaç salımında kullanımı. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 127s, İstanbul.
- [7] Hassan, M.I., Sultana, N. 2017. Characterization, drug loading and antibacterial activity of nanohydroxyapatite/polycaprolactone (nHA/PCL) electrospun membrane. 3 Biotech, 7(4), 1-9.
- [8] Üstündağ, C.B. 2011. Karbon nano tüp takviyeli biyoaktif seramik tozlarının sentezi, karakterizasyonu ve Ti-6Al-4V alaşımı üzerine kaplanması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 165s, İstanbul.
- [9] Kumar, R., Ali, S.A., Singh, P., De, U., Virk, H.S., Prasad, R. 2011. Physical and chemical response of 145 MeV Ne⁶⁺ ion irradiated polymethylmethacrylate (PMMA) polymer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 269(14), 1755-1759.
- [10] Liang J., Huang Y., Zhang L., Wang Y., Ma Y., Guo T., Chen Y. 2009. Molecular-level dispersion of graphene into poly (vinyl alcohol) and effective reinforcement of their nanocomposites. Advances in Materials Science and Engineering, 19, 2297-2302.
- [11] Yang, C.C., Chiu, S.J., Chien, W.C. 2006. Development of alkaline direct methanol fuel cells based on crosslinked PVA polymer Membranes. Journal of Power Sources, 162, 21–29.
- [12] Duan, G., Zhang, C., Li, A., Yang, X., Lu, L., Wang, X. 2008. Preparation and characterization of mesoporous zirconia made by using a poly methyl methacrylate) template. Nanoscale Research Letters, 3, 118–122.

***In Vitro* Cytotoxicity and Cell Migration Activities of Lipid Extracted from *Chlorella Sorokiniana* Shihira & R.W.Krauss Exposed to Nitrogen Stress**

Betül YILMAZ ÖZTÜRK^{*1}, Bükay YENİCE GÜRSU², Halima AL-THAWR³, İlknur DAĞ⁴

^{1,2,4}Central Research Laboratory Application and Research Center, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Türkiye

³Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Eskisehir, Türkiye

⁴Vocational Health Services High School, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Türkiye

(Alınış / Received: 07.12.2024, Kabul / Accepted: 24.05.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords:

Chlorella sorokiniana,
Nitrogen starvation,
Lipid accumulation,
Cell migration

Abstract: Microalgae contain valuable biochemical components and have the potential to be used in many areas. Depending on the culture conditions and species, the biochemical composition of microalgae also varies. Nitrogen is one of the most important nutrient sources for microalgae growth, and lipid accumulation in microalgae such as *Chlorella* increases significantly under stress conditions such as nitrogen limitation. Although many different studies have been conducted on the potential use of biochemical components of microalgae, information on the effects and mechanisms of microalgal lipids on cell viability, migration and wound healing is very limited. In this study, lipid extraction was carried out from *C. sorokiniana* microalga by dichloromethane/methanol method in the presence and absence of nitrogen. *In vitro* cytotoxic effects of both oils on the viability of L929 fibroblast cell line were investigated at eight different concentrations (500, 250, 125, 62.5, 31.25, 15.62, 7.81, 3.90 µg/mL) using the WST-8 test. No toxic effect was found at any of the studied doses and the most effective and lowest dose that increased viability was determined to be 15.62 µg/ml. *In vitro* cell scratch test results revealed that lipid extract significantly accelerated cell migration and proliferation under nitrogen starvation compared to the control group. In both cases, no toxic effect of the obtained oil on the cells was observed. It is important to elucidate the therapeutic potential of these oils with detailed studies and to elucidate the changes in the oil composition of microalgae under stress conditions with further analyses.

Azot Stresine Maruz Kalan *Chlorella Sorokiniana* Shihira & R.W.Krauss 'dan Ekstrakte Edilen Yağın Yara İyileştirme Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Anahtar kelimeler:

Chlorella sorokiniana,
Nitrojen açlığı,
Lipid birikimi,
Hücre göçü

Öz: Mikroalgler değerli biyokimyasal bileşenler içerir ve pekçok alanda kullanılmaya potansiyeline sahiptir. Kültür koşullarına ve türe bağlı olarak mikroalglerin biyokimyasal bileşimi de değişmektedir. Azot, mikroalg büyümesi için en önemli besin kaynaklarından biridir ve *Chlorella* gibi mikroalglerde lipit birikimi, azot sınırlaması gibi stres koşulları altında önemli ölçüde artar. Mikroalglerin biyokimyasal bileşenlerinin potansiyel kullanımı hakkında birçok farklı çalışma yapılmış olmasına rağmen, mikroalg lipitlerinin hücre canlılığı, göçü ve yara iyileşmesi üzerindeki etkileri ve mekanizmaları hakkında bilgiler çok sınırlıdır. Bu çalışmada, *C. sorokiniana* mikroalginden diklorometan/metanol yöntemi ile azot varlığında ve yokluğunda lipit ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. Her iki yağın sekiz farklı konsantrasyonda (500, 250, 125, 62.5, 31.25, 15.62, 7.81, 3.90 µg/mL) L929 fibroblast hücre hattının canlılığı üzerindeki *in vitro* sitotoksik etkileri WST-8 testi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışılan hiçbir dozda toksik etki bulunmamış ve canlılığı artıran en etkili ve en düşük dozun 15.62 µg/ml olduğu belirlenmiştir. *In vitro* hücre çizik testi sonuçları, lipit özütünün azot açlığı altında kontrol grubuna

kıyasla hücre göçünü ve çoğalmasını önemli ölçüde hızlandırdığını ortaya koymuştur. Her iki durumda da elde edilen yağın hücreler üzerinde toksik etkisi gözlenmemiştir. Bu yağların terapötik potansiyelinin detaylı çalışmalarla açıklanması ve stres durumunda mikroalglerin yağ kompozisyonunda meydana gelen değişikliklerin ileri analizlerle aydınlatılması önemlidir.

1. Introduction

Microalgae, considered as the primary producers of the aquatic ecosystem, convert carbon dioxide in the atmosphere into valuable biomolecules such as proteins, lipids, carbohydrates or carotenoids [1]. They can adapt to various ecological environments, including wastewater, due to their rapid growth, high photosynthetic efficiency and simple growth requirements [2,3]. The oil content and production capacity of microalgae are quite high and changes in growth conditions can affect the quantity and quality of lipids. In particular, it is reported that nitrogen limitation increases the lipid content of microalgae [4]. Nitrogen is necessary for the growth of microalgae and plays a critical role in events such as DNA, protein and chlorophyll synthesis [3]. In fact, nutrient stress inhibits cell growth, but some microalgae species can synthesize fatty acids known as triglycerides (TGA), which do not participate in lipid formation in the cell membrane, by remodeling membrane lipids under conditions such as nitrogen limitation [3,5,6]. TAG serves both as an energy and carbon storage compound and as an electron sink under unfavorable conditions for growth [7].

Microalgae oil production can be enriched depending on the relevant species and environmental conditions. Various species belonging to the genera *Chlorella*, *Dunaliella* and *Scenedesmus* are reported as microalgae with high oil content (10-67%) [1]. In literature, it is reported that lipid droplets, cell volume, carotenoid amount and carbohydrate content increase during nitrogen limitation in green algae; general cell division stops due to decrease in protein, chlorophyll and total biomass levels [8]. In recent years, *C. sorokiniana* has attracted attention as a green microalga with high lipid content under different environmental growth environments. It is reported that this species accumulates more neutral lipids in nitrogen limitation compared to nitrogen-complete environmental conditions, but total biomass and energy products decrease due to increased damage to photosystem II [9].

Microalgal extracts have a high potential for use in various biomedical applications due to the bioactive components they contain, such as pigments, fatty acids or polysaccharides. These bioactive components show promising results in terms of antioxidant, anti-inflammatory, antibacterial, skin regenerative or wound healing applications [10]. Wound healing is a multi-stage process that involves the restoration of the structural and physical integrity of damaged

tissue. The healing process involves stages such as homeostasis, inflammation, migration, proliferation and remodeling [11,12]. In an in vitro study and animal model, microalgae were reported to increase the proliferation and migration of skin cells and accelerate the wound healing process [13]. In recent years, promising anti-inflammatory, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative effects of lipids obtained from microalgae have begun to be revealed, but the relationships between the structure of bioactive lipids, their toxicity to healthy cells and their effects on cell migration have not yet been fully elucidated [13,14, 15]. In this study, the oil produced by *C. sorokiniana* microalga under nitrogen starvation and in a non-nitrogen deficient environment was extracted by dichloromethane/methanol method and the effects of these oils on the viability of fibroblast cell lines at different concentrations were evaluated using the WST-8 test. After determining the most effective low dose, it was aimed to compare the effects of the oils extracted at the relevant concentration in both cases on *in vitro* cell migration by cell scratch test.

2. Material and Method

2.1. Cultivation and growth condition of algal cells

The microalga strain used in the study, *C. sorokiniana*, was originally isolated from Musaözü Lake in Eskişehir and maintained from Shihira & R.W. Krauss, Osmangazi University (ESOGÜ) Biotechnology Laboratory. This strain was cultured in standard BG-11 medium, prepared according to our previous study [16]. The medium was formulated using stock solutions as follows:

Stock solutions (per 100 mL distilled water):

NaNO₃: 15 g, K₂HPO₄: 0.4 g, MgSO₄·7H₂O: 0.75 g, CaCl₂·2H₂O: 0.36 g, Citric acid: 0.06 g, Iron (III) ammonium citrate: 0.06 g, Na₂-EDTA: 0.01 g, Na₂CO₃: 0.2 g.

Final medium preparation (per 1 liter distilled water):

10 mL of each stock solution was added, including NaNO₃ (final concentration: 1.5 g/L), and 1 mL of the trace elements stock solution containing H₃BO₃: 61 mg, MnSO₄·H₂O: 169 mg, ZnSO₄·7H₂O: 287 mg, CuSO₄·5H₂O: 2.5 mg, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O: 12.5 mg. The pH of the final medium was adjusted to 6.8. [17,18]. The relative humidity conditions of the culture medium were set at 70-76%. Liquid cultures were inoculated at 2x10⁵ cells/mL and grown in BG-11 medium using the Multi-Cultivator OD-1000 (Photon Systems Instruments, Drásov, Czech

Republic) equipped with an AC-710 cooling unit and an LED array.

C. sorokiniana was cultured for 15 days under nitrogen stress in 2 growth tubes, each with a capacity of approximately 85 mL. Two experimental groups without nitrogen deprivation (Nitrogen 100%, as much as the content of BG11 medium) and with it (Nitrogen 0%, modified BG11 medium without nitrogen) were included in the study. The culture temperature was set at 28 °C, and white light was used with wavelengths between 430-750 nm. The light intensity is 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. The carbon dioxide required for photosynthesis came from compressed atmospheric air reaching the photobioreactor, which was continuously ventilated at approximately equal flow rates at a rate of 1 volume of gas per liquid volume per minute (vvm). To maintain sterilization, the air flow was passed through 0.2 μm PTFE membrane filters (Fluoropore, Merck Millipore).

2.2. Lipid extraction

Lipid extraction was carried out with biomass produced within 15 days after algal cell cultivation and by the dichloromethane/methanol method [19]. Initially, nearly 60 mg of wet microalgae biomass sample was kept in an ultrasonic water bath for 60 minutes in order to disrupt the cell walls. Samples were treated with a 2:1 dichloromethane/methanol mixture. The suspension was then centrifuged at 10,000 rpm, 20 min, and 4 °C to obtain two phases. The first phase (located in the upper part) contains lipids dissolved in the solvent, while the second phase (located in the lower part) belongs to proteins and carbohydrates. After the subphase was removed, the lipid samples were placed in an oven at 60 °C for 24 h to ensure solvent elimination. Based on the ratio of the total amount of lipid extracted to the wet weight of the algae, the lipid extraction efficiency (1) was calculated according to the following formula [20]:

$$\text{Lipid yield (\%)} = \text{g of oil/dry weight of biomass (1)}$$

2.3. Cytotoxicity test

Preparation of Cell Line Culture Medium:

One fibroblast L929 cell line with passage number 16 was used for the study (L929 Cell line originates from ATCC CCL-1). Cells were grown in Eagle's Minimum Essential Medium (EMEM, Multicell, 320-005) containing 10% Fetal bovine serum (FBS, Pan Biotech P30-1301), in a 25T Flask, by checking twice a day; It was expected to reach confluency of 70% or above. (Doubling Time: 22-26 hours).

Preparation of Lipid Samples

Samples were prepared at a concentration of 10 mg/mL. After exposure to UV light for 30 minutes, 100 μL Dimetil Sülfoksit (DMSO, Sigma-Aldrich, D2650)

was dissolved in the medium and homogenization was achieved with the medium. The concentrations to be used after this process were diluted with complete medium.

Planting the Cells in 96-Well Plates

In a 25T flask, 500 μL Trypsin-EDTA (Gibco, 15400054) was added to the cells that reached 70% or more confluency and kept for 3-5 minutes at 37°C in a 5% CO₂ environment. As soon as the cells were observed to be dissociated under an inverted microscope (Zeiss Primovert, Germany), medium containing 10% FBS was added. After centrifugation at 300xg for 5 minutes, counting was done on the Logos Luna II (Logos Biosystems, Anyang, South Korea) device using Trypan blue (Gibco, 1525061), and 10% FBS medium was added to obtain 10⁴ cells per well.

Application of Cytotoxicity Test

When 70% confluency was reached in each well, the medium in the culture dish was withdrawn. Then, after adding fresh medium, the samples were added to the cell dish. Each group was made in at least 3 repeat wells to ensure repeated analysis. Eight different concentrations of active ingredient were applied to the cells (500, 250, 125, 62.5, 31.25, 15.62, 7.81, 3.90 $\mu\text{g/mL}$). After exposure, the cells are waited for 22 h without being removed from the incubator. Apart from the test samples, the so-called negative well contained only medium and cells (Growth control). Dichloromethane (DCM), which is frequently used for lipid extraction, is generally not preferred in cell culture applications due to its cytotoxic and mutagenic effects [21]. For this reason, DMSO was used as the solvent in our study. DMSO is widely used in cell culture studies when applied at final concentrations below 1% and does not show toxic effects. It has also been shown to provide effective solubilization of lipid extract while preserving cell viability and is compatible with various cell types, including L929 [22,23]. Solvent used for lipid dissolution: After lipid extraction, the remaining oil was dissolved in 100 μL of DMSO to ensure proper solubilization before application to cell culture. This volume of DMSO was chosen based on preliminary tests showing that it was sufficient to completely dissolve 10 mg of extracted oil and achieve a homogeneous distribution in the culture medium. The solubility and homogeneity of the oil in DMSO were confirmed by visual inspection and pipetting consistency. It was ensured that the final DMSO concentration in all experimental groups remained below 1%, and a separate solvent control group was not included in the study since the effect of this rate on cell viability was negligible. The positive control well contained 2 μL hydrogen peroxide (H₂O₂, Merck, H1009) (a drug control with known toxicity) in addition to the medium and cells. Finally, blank wells were prepared by adding only the medium. At the end of 22 hours, 10% of the well volume (equal to 20 μL Enhanced Cell Counting Kit 8, WST-8 (E-CK-A362) in the experiment) of WST-8 solution was added. The

lights were turned off during this process. The cell culture dish was wrapped with aluminum foil and kept in the incubator for another 2 h. At the end of 2 h, spectrophotometric readings were made in the cell culture dish at wavelengths of 450 nm and 630 nm [24]. The results were formulated and percent cell survival was determined as presented below (Eq. 2):

$$\% \text{Viability} = \frac{(\text{Experimental well} - \text{Blank})}{(\text{Negative control} - \text{Blank})} * 100 \quad (2)$$

2.4. *In vitro* cell scratch assay

To determine the effects of the oil extracts on *in vitro* cell migration, cell scratch test was performed using L929 fibroblast cells. The samples were planted in 48-well tissue culture dishes in EMEM medium with 10% FBS, 1% penicillin-streptomycin (Gibco, 15070063) and 4 mM L-glutamine (Sigma- Aldrich, G8540) at a concentration of 2×10^4 cells/ml and waited until the surface was covered in a monolayer. Then, an *in vitro* scratch model was created by scratching the surface in one move from one end to the other with the help of a sterile pipette tip (200 μ l). During the process, the upper medium was removed and washed with PBS to remove the shielded cells. After the cytotoxicity experiment, the biomaterial produced at the determined doses was applied and incubated for 24 h at 37 °C in a 5% CO₂ incubator [25]. The solvent of the solvent extract without biomaterial was added to the negative control wells. *In vitro* scratch model was viewed under an inverted microscope (Zeiss Primovert) and at least two images were taken from each well and recorded as hour 0. Likewise, the samples were digitally photographed after 24 h in order to make the necessary calculations. The captured images were analyzed using the Image J image analysis program. For this purpose, the entire area of the image and relative migration areas were calculated in the program. The migration area percentage (Eq. 3) was calculated using the following formula:

$$\text{Area percentage for migration determination} = \left[\frac{(\text{Area}_{t0} - \text{Area}_{t24})}{\text{Area}_{t0}} \right] \times 100 \quad (3)$$

Here, Area_{t0} refers to the measured area of the photo taken at the beginning, and Area_{t24} refers to the area of the photo taken at the 24th h.

2.5. Statistical analyses

The data were presented as mean values with standard deviations (SD), and each experiment was carried out separately in triplicate. Prior to executing a one-way ANOVA, the data's normal distribution was confirmed using the Shapiro-Wilk test, and the equality of variances between groups was confirmed using Levene's test. To find statistically significant differences between the experimental and control groups, Tukey's HSD post hoc analysis was used once one-way ANOVA was completed and these

presumptions were met. A significance level of $p < 0.05$ was used throughout the analysis, and SPSS software (version 26) was used for all statistical evaluations.

3. Results

In our study, the total amount of oil extracted from *C. sorokiniana* microalga in an environment without nitrogen stress (OE-NS) was calculated as 0.019 g and the lipid yield was calculated as 31.7%, while the total amount of oil obtained in the case of nitrogen stress (OE-S) was calculated as 0.078 g and the lipid yield was calculated as 130% (Table 1). Here, lipid extraction efficiency was calculated as the ratio of the extracted lipid weight to the dry biomass weight by following a standard approach (Eq. 1). The 130% lipid yield reported under nitrogen deprivation (0% nitrogen) conditions was relative to the control group (100% nitrogen condition) where the lipid yield was calculated as 31.7%. Therefore, 130% efficiency indicated a 4.1-fold increase in the extracted oil compared to the full nitrogen (100%) condition, indicating significant lipid accumulation under nitrogen stress. In addition, this difference in lipid yield between the groups was statistically significant ($p < 0.05$).

Table 1. Amount and productivity of lipid obtained from *C. sorokiniana*

Algal biomass (mg)	Extracted Lipid (g)	Lipid Yield (%)
Nitrogen 100% 60	0.019	31.7
Nitrogen 0% 60	0.078	130

* Nitrogen 100%, OE-NS: Prepared with normal BG-11 medium under non-stressed conditions.

**Nitrogen 0%, OE-S: The BG-11 medium was modified and defined as a nitrogen-free condition.

In line with the cytotoxicity analysis data, it was determined that both oils used in the study were not toxic to the cells. Figure 1 shows the percentage viability of oil obtained from OE-NS microalga and applied at eight different concentrations on L929 cells. It was determined that the groups with higher percent viability compared to the control group belonged to concentrations of 62.5, 31.25 and 15.62 μ g/mL, and 15.62 μ g/mL, the lowest effective dose among these three concentrations, was selected to be included in the subsequent *in vitro* cell scratch study. These differences among OE-NS treatment groups were statistically significant according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

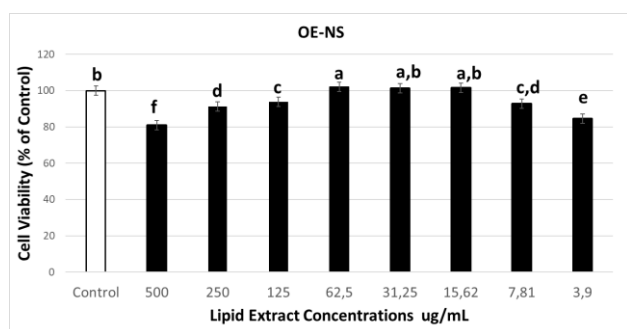


Figure 1. Percentage survival rates of lipid obtained from *C. sorokiniana* microalga without nitrogen stress (OE-NS) and applied at 8 different concentrations on L929 fibroblast cells. Different lower case letters indicate that the concentrations for each OE-NS were significantly different from each other according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

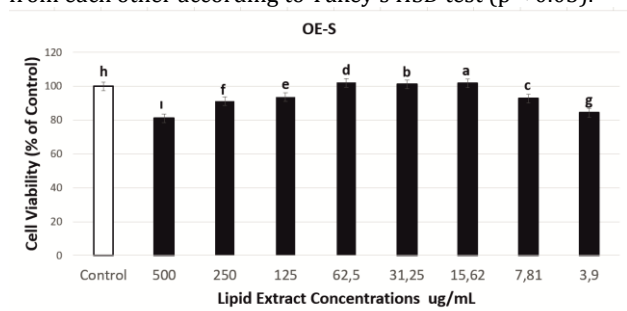


Figure 2. The percentage viability rates of lipid obtained from nitrogen stressed (OE-S) microalga and applied at 8 different concentrations on L929 cells. Different lower case letters indicate that the concentrations for each OE-S were significantly different from each other according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

In this group, similar to the OE-NS group, the groups with higher percent viability compared to the control group were at concentrations of 62.5, 31.25 and 15.62 µg/mL, and 15.62 µg/mL, the lowest effective dose among these three concentrations, was selected to be included in the subsequent *in vitro* cell scratch study. These differences among OE-S treatment groups were also statistically significant ($p < 0.05$, Tukey's HSD test).

Cell images obtained with an inverted microscope (Zeiss Primovert, Germany) as a result of 0 and 24 h applications of the oil at a dose of 15.62 µg/mL, which was selected to be used for both OE-NS and OE-S groups in the cell scratch test, are shown in Figure 3 and the percentage cell migration rates are presented in Figure 4. According to the data obtained, there was a 45% wound closure at the 24th hour compared to the 0th hour in the control group where no active ingredient was applied. As a result of application to adjacent cells obtained from OE-NS group, a greater cell migration was observed at the 24th hour compared to the control and this rate was measured as 55%. As a result of applying the extracted oil to the cells in case of OE-S group, a 96% cell migration was calculated at the 24th hour compared to the control (Figure 3). There was a statistically significant difference in cell migration between all groups ($p < 0.05$).

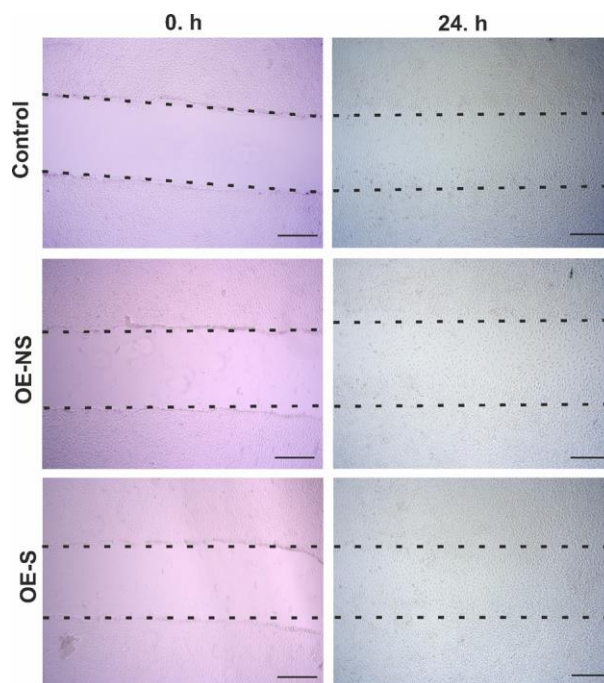


Figure 3. Inverted microscope images obtained as a result of the application of lipid obtained from *C. sorokiniana* microalga at a dose of 15.62 µg/mL on L929 cell lines at 0 and 24 h under conditions OE-NS (without nitrogen stress) and OE-S (nitrogen stressed) compared to the control group (Scale bar: 500 µm).

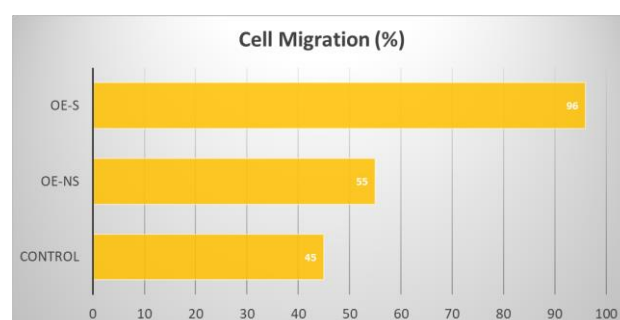


Figure 4. Percentage cell migration rates obtained from the 24 h cell scratch test of the lipid obtained from *C. sorokiniana* microalga and applied to L929 cell lines at a dose of 15.62 µg/mL for OE-NS (without nitrogen stress) and OE-S (nitrogen stressed) groups.

The high cell migration effect of the oil extracted under nitrogen stress in the scratch test was clearly observed at higher magnification and this is presented in Figure 5.

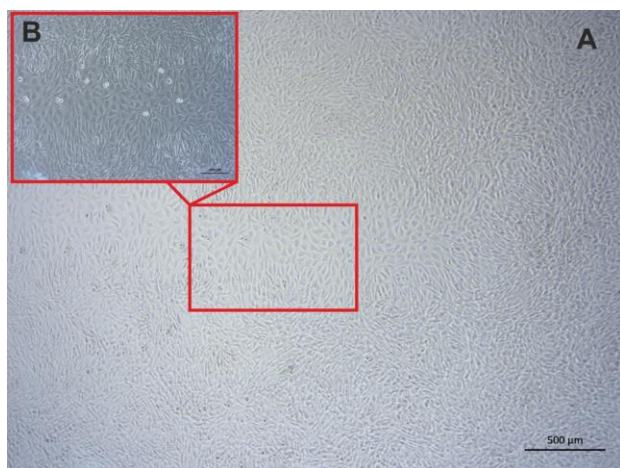


Figure 5. *In vitro* cell migration effect observed after the application of the lipid extract obtained from *C. sorokiniana* microalga exposed to nitrogen starvation with the cell stretching test.

4. Discussion and Conclusions

The fact that microalgae do not require a large area for development and can easily adapt to adverse stress conditions makes them an ideal alternative for the production of various bioactive molecules. *Chlorella* microalgae have also attracted great attention in recent years due to their capacity to synthesize large amounts of valuable bioactive compounds. Compared to other microalgae, *Chlorella* species can synthesize more bioactive compounds and are therefore one of the most studied and cultured microalgae worldwide [26].

Oils are one of the most important energy sources of microalgae, and they both participate in the cell membrane structure and mediate various cell signaling systems when environmental conditions change. Microalgae used for lipid production are divided into two categories; some microalgae have high lipid content but low cell growth, while the other group has high cell growth but low lipid content. In previous studies, microalgae with high lipid content have been studied frequently, but since this group grows slowly, oil production is also low. On the other hand, *Chlorella vulgaris* microalgae show rapid growth (short doubling time 19 h), while lipid accumulation content is only 20% [27]. In the literature, it has been reported that some microalgae such as *Chlorella* increase in lipid content and production under various abiotic stress conditions [28].

Nitrogen is one of the most essential nutrients affecting the growth and lipid accumulation of microalgae. Nitrogen starvation constitutes a critical stress source for microalgae and causes significant changes in the cellular metabolism and development of the organism [26]. When there is no nitrogen required for protein synthesis in the environment, excess carbon from photosynthesis is directed to storage molecules such as triglycerides or starch.

Nitrogen stress in *Chlorella* in particular can increase the lipid and triglyceride content by two to three times [29,30]. More energy can be produced from carbohydrates through the accumulation and oxidation of TAG in the cell. Thus, the cell has an effective reserve when it recovers from deprivation [31]. The increase in the total lipid content of algal cells under stress is generally also associated with an increase in reactive oxygen species (ROS), but the regulatory mechanism of ROS on lipid accumulation has not been elucidated [32]. However, lipid production in microalgae varies depending on factors such as microalgae species, cultivation conditions, nutrient availability, light, pH or temperature [33, 34].

Since wound healing is a complex biological process, there are several *in vitro* and *in vivo* tests that offer a first perspective to evaluate various natural products for their *in vitro* wound healing potential [35,36,37]. Among these, the scratch test stands out as a valuable, cheap and simple method. This test is associated with the second phase of wound healing, expressed by the proliferation and migration of keratinocytes and fibroblasts [34,38].

Microalgal lipids consist of polar (phospholipids etc.) and neutral lipids (acylglycerol, free fatty acids etc.). In the exponential growth phase, microalgae are mostly rich in polar lipids, while in the stationary phase, TAG accumulation is observed due to stress conditions where nutrients are limited [34]. This study includes the *in vitro* comparison of the effects of lipids obtained from *C. sorokiniana* microalga in the presence and absence of nitrogen on the viability and cell migration of fibroblast cell lines. In our study, a 15-day period was chosen for nitrogen stress based on previous studies showing that prolonged nitrogen deprivation can lead to significant lipid accumulation in *C. sorokiniana*. For instance, a study by Zhang et al. (2013) observed substantial neutral lipid accumulation in *C. sorokiniana* C3 cells after 8 days of nitrogen starvation [9]. Similarly, research by Negi et al. (2016) reported that *C. sorokiniana* maintained growth rates and accumulated neutral lipids over a two-week nitrogen deprivation period [39]. These findings suggest that prolonged nitrogen stress can effectively induce lipid accumulation without severely compromising cell viability.

Our observations align with the aforementioned studies, indicating that *C. sorokiniana* cells remained viable after the 15-day nitrogen stress treatment. Despite the nutrient deprivation, the cells continued to exhibit metabolic activity, which is consistent with previous reports demonstrating that *C. sorokiniana* can sustain growth and viability under extended nitrogen-limited conditions.

Our data supported that the obtained lipids did not show toxicity on the fibroblast cell line and had a

positive effect on cell migration. The obtained lipid increased the migration of cells and also the population of L929 cells in the scratch area due to the proliferation of migrating cells. This increase occurred at a higher rate in the case of nitrogen starvation.

There is very limited data in the literature explaining the effects of bioactive components obtained from microalgae, especially oils, on cell migration and wound healing. In a recent *in vivo* study, it was reported that fatty acids extracted from the microalga *Parachlorella kessleri* had a significant effect in reducing excisional wounds and burns [40]. In another study, it was shown that lipid extract obtained from the microalga *Nannochloropsis oceanica* had the capacity to regenerate keratinocytes previously exposed to UVB radiation [41]. Nascimento-Neto and colleagues reported the wound healing, high collagen densification and epithelial restructuring effects of lectin obtained from the macroalga *Bryothamnion seaforthii* [42]. In a study by De Melo et al., *in vivo* wound healing potential of a hydrogel-based *C. vulgaris* extract was investigated. For this purpose, a hydrogel formulation with different concentrations of *C. vulgaris* extracts grown under autotrophic and mixotrophic conditions was prepared and its effects on excisional wounds in mice were evaluated. When the effects of the extracts were considered in the study in terms of protein concentration, phytochemical profile, hemagglutination activity, antioxidant activity and antibacterial activity, it was reported that the extract obtained in mixotrophic conditions accelerated healing and showed anti-inflammatory properties [38]. In a similar study, it was stated that necrotic tissue could be removed, inflammatory process could be modulated and re-epithelialization process could be initiated with the help of collagenolytic enzyme in the extract obtained from *C. vulgaris* UTEX 1803 [43]. Our findings do not examine a complete wound healing process as they only examined fibroblast migration, but they reveal the importance of investigating the *in vitro* cell migration potential of lipids obtained from *C. sorokiniana* against L929 cells stimulated with scratch test and as a possible wound healing component.

As a result, this study involves the initial investigation of the effects of oil produced by *C. sorokiniana* microalga on *in vitro* cell migration compared to the control group under nitrogen stress. Our results showed that the oil extracted from *C. sorokiniana* microalga, which accumulates significant lipids under nitrogen stress, is non-toxic and its *in vitro* migration properties are significantly increased compared to the control group without nitrogen deficiency. However, detailed *in vitro* and *in vivo* data, possible mechanisms of action, and changes in oil composition are needed to elucidate the findings and reveal the wound healing properties.

Acknowledgments

This work was performed at Eskişehir Osmangazi University Central Research Laboratory Application and Research Center (ARUM).

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Udayan, A., Pandey, A. K., Sharma, P., Sreekumar, N., & Kumar, S. 2021. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 1(4), 411-431.
- [2] Goh, B. H. H., Ong, H. C., Cheah, M. Y., Chen, W. H., Yu, K. L., & Mahlia, T. M. I. 2019. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 107, 59-74.
- [3] Şirin, P. A., Serdar, S. 2024. Folia Microbiologica, 1-14.
- [4] Huang, X., Huang, Z., Wen, W., & Yan, J. 2013. Journal of Applied Phycology, 25, 129-137.
- [5] Han, D., Jia, J., Li, J., Sommerfeld, M., Xu, J., & Hu, Q. 2017. Frontiers in Marine Science, 4, 242.
- [6] Fattore, N., Bellan, A., Pedroletti, L., Vitulo, N., & Morosinotto, T. 2021. Algal Research, 58, 102368.
- [7] Breuer, G., de Jaeger, L., Artus, V. G., Martens, D. E., Springer, J., Draaisma, R. B., Wijffels, R.H.W & Lamers, P. P. 2014. Biotechnology for Biofuels, 7, 1-11.
- [8] Cakmak T, Angun P, Demiray YE, Ozkan AD, Elibol Z, Tekinay T. 2012. Biotechnology and Bioengineering 109:1947–1957
- [9] Zhang, Y. M., Chen, H., He, C. L., Wang, Q. 2013. PloS one, 8(7), e69225.
- [10] Miguel, S. P., Ribeiro, M. P., Otero, A., & Coutinho, P. 2021. Algal Research, 58, 102395.
- [11] Guo,, S., DiPietro, L. A. 2010. Journal of Dental Research, 89(3), 219–229.
- [12] Rodrigues, M., Kosaric, N., Bonham, C. A., & Gurtner, G. C. 2019. Physiological Reviews, 99(1), 665–706.
- [13] Huang, H., Lang, Y., & Zhou, M. 2024. Algal Research, 103504.
- [14] Conde, T., Lopes, D., Łuczaj, W., Neves, B., Pinto, B., Maurício, T., Domingues, P.,

- Skrzydłowska, E., Domingues, M. R. 2022. *Metabolites*, 12(2), 96.
- [15] Conde, T., Lopes, D., Łuczaj, W., Neves, B., Pinto, B., Maurício, T., Skrzydłowska, E & Domingues, M. R. 2022. *Metabolites*, 12(2), 96.
- [16] Yılmaz Öztürk, B., Yenice Gürsu, B., Koyuncu, O., Dağ. 2023. Ultrastructural Investigation of the Effects of Malathion on the Green Alga *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss," 6th National Congress of Biological Sciences, November 3-5, Eskişehir.
- [17] Fidan, E. C., Öztürk, B. Y., Şirin, Ü. 2018. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, 11(1), 139-142.
- [18] Rippka, R. 1988. *Methods in enzymology*, vol 167. Academic Press, New York, pp 3-27.
- [19] Ren, X., Wei, C., Yan, Q., Shan, X., Wu, M., Zhao, X., Song, Y. 2021. *Scientific Reports*, 11(1), 20221.
- [20] Parida, S., Biswal, S. 2020. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 7(3), 69-73.
- [21] Buranarom, A., Navasumrit, P., Ngaotepprutaram, T., & Ruchirawat, M. 2021. *Chemico-Biological Interactions*, 346, 109580.
- [22] Galvao, J., Davis, B., Tilley, M., Normando, E., Duchon, M. R., & Cordeiro, M. F. 2014. *The FASEB Journal*, 8(3), 1317-1330.
- [23] Javaid, N., Patra, M. C., Seo, H., Yasmeen, F., & Choi, S. 2020. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(24), 9450.
- [24] Park, C. M., & Xian, M. 2015. In *Methods in enzymology*, 554, 127-142.
- [25] Chen, S., bin Abdul Rahim, A. A., Mok, P., Liu, D. 2023. *BMC biotechnology*, 23(1), 32.
- [26] Fang, Y., Cai, Y., Zhang, Q., Ruan, R., & Zhou, T. 2024. *Process Safety and Environmental Protection*.
- [27] Griffiths, M. J., & Harrison, S. T. 2009. *Journal of applied phycology*, 21, 493-507.
- [28] Lv, J. M., Cheng, L. H., Xu, X. H., Zhang, L., & Chen, H. L. 2010. *Bioresource technology*, 101(17), 6797-6804.
- [29] Chen, H., & Wang, Q. 2021. *Biological Reviews*, 96(5), 2373-2391.
- [30] [30] Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P., Del Borghi, M. 2009. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6), 1146-1151.
- [31] Xin, L., Hong-Ying, H., & Jia, Y. 2010. *New Biotechnology*, 27(1), 59-63.
- [32] Zhang, L., Liao, C., Yang, Y., Wang, Y. Z., Ding, K., Huo, D., Hou, C. 2019. *Bioresource technology*, 287, 121414.
- [33] Vello, V., Chu, W. L., Lim, P. E., Majid, N. A., Phang, S. M. 2018. *Journal of applied phycology*, 30, 3131-3151.
- [34] Morales, M., Aflalo, C., & Bernard, O. 2021. *Biomass and Bioenergy*, 150, 106108.
- [35] Boateng, J., Matthews, K. H., Stevens, H. N. E., & Eccleston, G. M. 2008. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 97(8), 2892-2923.
- [36] Masson-Meyers, D. S., Andrade, T. A., Caetano, G. F., Guimaraes, F. R., Leite, M. N., Leite, S. N., & Frade, M. A. C. 2020. *International journal of experimental pathology*, 101(1-2), 21-37.
- [37] Ibrahim, N. I., Wong, S. K., Mohamed, I. N., Mohamed, N., Chin, K. Y., Ima-Nirwana, S., & Shuid, A. N. 2018. *International journal of environmental research and public health*, 15(11), 2360.
- [38] Kaur, M., Bhatia, S., Gupta, U., Decker, E., Tak, Y., Bali, M., Gupta, V. K., Dar, R. A & Bala, S. 2023. *Phytochemistry Reviews*, 22(4), 903-933.
- [39] Negi, S., Barry, A. N., Friedland, N., Sudasinghe, N., Subramanian, S., Pieris, S., Holguin, F. O., Dungan, B., Schaub, T & Sayre, R. 2016. *Journal of Applied Phycology*, 28, 803-812.
- [40] El-Sheekh, M., Bedaiwy, M., Mansour, H., & El-Shenody, R. A. 2024. *Burns*, 50(4), 924-935.
- [41] Biernacki, M., Conde, T., Stasiewicz, A., Surazyński, A., Domingues, M. R., Domingues, P., & Skrzydłowska, E. 2023. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 14323.
- [42] Nascimento-Neto, L.G., Carneiro, R. F., Silva, S. R., Silva, B. R., Arruda, F. V. S., Carneiro, V. A., Nascimento, K. S., Saker-Sampaio, S., Silva, V. A Jr., Porto, A. L. F., Cavada, B. S., Sampaio, A. H., Teixeira, E. H., Nagano, C. S. 2012. *Marine Drugs*, 10, 1936-1954.
- [43] de Melo, R. G., de Andrade, A. F., Bezerra, R. P., Viana Marques, D. de A., da Silva, V. A., Paz, S. T., de Lima Filho, J. L., & Porto, A. L. F. 2019. *Journal of Applied Phycology*, 31(6).

Yüksek Dayanımlı Betonlarda Uluslararası Standartlardaki Elastik Modüllerin Karşılaştırılması

Nevbahar EKİN*¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 04.03.2025, Kabul / Accepted: 02.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Yüksek dayanımlı beton,
Dinamik elastik modüller,
Statik elastik modüller,
Poisson oranı,
Ultrasonik yöntem,
Uluslararası standartlar

Öz: Betonun statik elastik modülü, betonarme yapıların tasarımı, güvenliği ve performansı açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu parametre, taşıyıcı sistemlerin deformasyonlarının hesaplanmasında, kesit tasarımı ve çatlak kontrolü gibi mühendislik hesaplarında, zemin oturması ve temel sistemi analizlerinde ve zamanla oluşacak rötre ve sünme etkileri fidsagfredwqnnin öngörülmesinde kullanılmaktadır. Statik elastisite modülü deneysel olarak silindirik veya prizmatik numuneler üzerinde uygulanan basınç deneylerinde genellikle yük-deformasyon eğrisi elde edilerek; ampirik olarak ise basınç dayanım değerlerinden hesaplanmaktadır. Betonun statik elastik modülleri belirlenirken farklı ülkelere ait uluslararası standartlara göre birbirinden farklı hesaplanmaktadır. Uluslararası standartların farklı sonuçlar vermesi teknik, jeolojik, iklimsel, kültürel ve politik temellere dayanmaktadır. Bu yüzden, bir ülkede geliştirilmiş bir standardın başka bir ülkede doğrudan kullanılmaması, ya da kullanılmadan önce uygunluk analizinin yapılması gerekmektedir. Uluslararası standartlardaki bu farklılığın doğurduğu sonuçların ortaya konulması, yapım aşamasındaki inşaat hesaplamaları açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betonlarda uluslararası standartlardaki elastik modüllerin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Buna göre, 4 farklı yüksek dayanımlı beton tasarımı hazırlanmıştır. Hazırlanan tasarımların ultrasonik basınç (P) ve kayma (S) dalga ölçümleri ile Tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Buna göre, statik elastik parametreler Tek eksenli basınç dayanım (TEBD) sonuçlarına bağlı olarak ve dinamik elastik parametreler ise tahribatsız test tekniklerinden olan ultrasonik yöntem yardımıyla belirlenen basınç (Vp) ve kayma (Vs) dalga hızlarından hesaplanmıştır. Daha sonra Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), Avrupa Beton Komitesi (CEB), Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ve Norveç standartlarına (NS) göre hesaplanan statik ve dinamik elastik modüllerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca, dinamik elastik parametreler ile statik elastik parametreler arasındaki yüzde (%) değişim oranları belirlenmiştir. Buna göre, birbirine en yakın statik ve dinamik elastik parametre değerleri sırasıyla CEB, TSE, ACI ve NS standartlarında bulunmuştur.

Comparison of Elastic Modules in High-Strength Concretes in International Standards

Keywords

High-strength concrete,
Dynamic elastic modules,
Static elastic modules,
Poisson's ratio,
Ultrasonic method,
International standards

Abstract: The static elastic modulus of concrete is a very important parameter in terms of the design, safety and performance of reinforced concrete structures. This parameter is used in the calculation of deformations of load-bearing systems, in engineering calculations such as section design and crack control, in soil settlement and foundation system analyses and in the prediction of shrinkage and creep effects that will occur over time. The static elastic modulus is generally calculated experimentally by obtaining the load-deformation curve in pressure tests applied on cylindrical or prismatic samples; and empirically from the compressive strength values. When determining the static elastic modules of concrete, they are calculated differently according to international standards belonging to different countries.

The fact that international standards give different results is based on technical, geological, climatic, cultural and political foundations. Therefore, a standard developed in one country should not be used directly in another country, or a conformity analysis should be performed before use. It is very important to reveal the consequences of this difference in international standards in terms of construction calculations during the construction phase. For this reason, the study aimed to compare the elastic modules in international standards in high-strength concretes. Accordingly, 4 different high-strength concrete designs were prepared. Uniaxial compressive strengths of the prepared designs were determined by ultrasonic pressure (P) and shear (S) wave measurements. Accordingly, static elastic parameters were calculated based on the Uniaxial Compressive Strength (UCS) results, and dynamic elastic parameters were calculated from the pressure (Vp) and shear (Vs) wave velocities determined by the ultrasonic method, which is one of the non-destructive testing techniques. Then, a comparison was made between the static and dynamic elastic modules calculated according to the American Concrete Institute (ACI), European Concrete Committee (CEB), Turkish Standards Institute (TSE), and Norwegian standards (NS). In addition, dynamic elastic parameters and percentage (%) change rates between static elastic parameters were determined. Accordingly, the closest static and dynamic elastic parameter values were found in CEB, TSE, ACI and NS standards, respectively.

1. Giriş

Betonarme elemanların tasarımı için betonun mekanik özellikleri, özellikle elastisite modülü, son derece önemlidir. Betonun elastisite modülü, betonarme yapıların performansını etkileyen kritik bir parametredir ve bu nedenle doğru bir şekilde belirlenmesi gereken bir özelliktir. Betonun elastisite modülü, betonun gerilme altındaki deformasyon özelliklerini tanımlar ve betonun mekanik davranışını anlamak için temel bir parametredir [1]. Bu parametrenin deneysel olarak tespiti zordur. Bu zorluk, hesaplamalarda kullanılan yöntem, betonu oluşturan bileşenlerin türü, ve betonun yapım aşamaları gibi işlemlerden kaynaklanmaktadır [2-4]. Betonun elastik modül hesaplamalarında bazı farklılıklar ile karşılaşmaktadır. Hesaplamalardaki bu farklılıkların başlıca nedeni, uluslararası standartlardaki tanımlamaların (betonun basınç dayanımı sınırı (düşük, normal, yüksek dayanımlı beton), su/çimento oranı, betonun yoğunluğu, agrega türü, agreganın mekanik özellikleri, beton numunesinin şekli ve boyutu, kür koşulları vb.) farklı olmasıdır. Ayrıca betondaki donatının etkisi de göz ardı edilmektedir. Donatının (yani betonarme içindeki çelik çubukların) betonun elastik modülüne olan etkisi, doğrudan olmasa da betonarme elemanın genel elastik davranışını etkilemektedir. Yani donatı ile aslında betonun elastik modülü değişmez ama betonarme elemanın (beton + çelik birlikte) rijitlik ve deformasyon özellikleri gibi elastik davranışı büyük ölçüde değişmektedir. Donatı oranı ve yerleşimi, yapı elemanının rijitliği, sehim davranışı ve çatlama kontrolü açısından çok önemlidir. Tüm bu etkenlerden dolayı betonun elastik parametreleri farklı değerler alabilmektedir [5-9].

Betonun elastik modülünü belirlemek için yaygın olarak kullanılan bazı denklemler ve standartlar

kullanılmaktadır. Türk Standartları Enstitüsü [10], Amerikan Beton Enstitüsü [11], Norveç Standartları [12] ve Avrupa Beton Komitesi [13] gibi kurumlar, betonun elastisite modülünü belirlemek için çeşitli deneysel bağıntılar önermiştir. Bu bağıntılar, normal betonlar için (yaklaşık silindirik dayanımı 16-30 MPa ve küp dayanımı 20-37 MPa olan C16-C30 sınıfındaki betonlar) benzer sonuçlar vermekte ve betonun dayanımına bağlı olarak elastisite modülünü hesaplamak için kullanılmaktadır [14].

Betonun elastisite modülü, malzemenin elastik özelliklerini tanımlayan bir parametredir ve genellikle dinamik elastik modül ve statik elastik modül olarak iki şekilde değerlendirilmektedir [15, 16]. Dinamik elastik modül, küçük gerilmeler altında yapılan testlerle elde edilmektedir. Bu modül, genellikle betonun elastik özelliklerinin başlangıç noktasındaki (gerilme-şekil değiştirme eğrisinin teğet çizgisi) davranışına yakın bir değeri temsil etmektedir. Betonun statik elastisite modülü, genellikle betonun basınç dayanımıyla ilişkili olan deneysel bir parametredir. Bunun temel nedeni, betonun elastik özelliklerinin genellikle dayanımıyla doğru orantılı olmasıdır. Bu ilişki, betonun karışım bileşenleri, kullanılan agregalar, bağlayıcı maddeler ve katkı maddelerinin özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Basınç dayanımını etkileyen faktörlerin çoğu elastik modülleri de benzer biçimde etkilemektedir [8, 17]. Elastisite modülü arttıkça malzeme daha rijit (sert) hale gelmektedir. Elastisite modülü küçüldüğünde ise malzeme daha esnek/elastik davranmaktadır [18]. Dinamik elastik modül ise, statik elastisite modülünden daha yüksek bir değere sahiptir. Bunun nedeni, dinamik yükleme koşullarının kısa süreli etkiler altında saf elastik davranış gösteren malzemenin daha rijit gözükmesidir. Bu modül, düşük yükleme seviyeleri ve kısa süreli yüklemeler altında, betonun elastik

tepkisini tanımlamaktadır [19]. Statik elastik modül ise, uzun süreli yüklemeler ve daha büyük gerilme seviyelerinde elde edilen modüldür. Statik elastik modül, dinamik elastik modülden %20-40 arasında daha küçüktür [20]. Bu nedenle yapı tasarımında deprem gibi titreşimli ve tekrarlı yüklere karşı direncin tanımlanmasında dinamik elastisite modülünün kullanılması daha uygundur. Çünkü statik testlerde, yükleme daha yavaş ve uzun süreli olduğunda betonun yapısal özellikleri farklı bir şekilde etkilenebilmektedir. Bu iki elastik modül arasındaki farklar, betonun zamanla değişen davranışlarını ve farklı yükleme koşullarındaki tepkilerini anlamada önemli bir rol oynamaktadır [2, 9, 21, 22].

Elastisite modülünün tespiti için farklı test metotları kullanılmaktadır. Statik elastisite modülü, dinamik elastisite modülüne göre daha yaygın olarak kullanılmasına rağmen, dinamik elastisite modülü yüksek değerler vermesi ve ölçme açısından daha kolay olması nedeniyle daha güvenilir ve üretken olarak kabul edilmektedir [9]. Beton heterojen ve anizotrop bir yapıya sahiptir [23-25]. Elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılan test metotları ve standartlar, betonun homojen olmayan yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle, betonun homojen olmayan yapısı elastisite modülünü etkileyebilmekte ve bu nedenle elastisite modülünün bir aralık olarak verilmesinin daha güvenli bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir [21]. Dinamik elastisite modülünün belirlenmesinde yalnızca P dalgasının kullanılması hem kolay olmamakta hemde P dalga hızı ile dinamik elastisite modülü arasında teorik ve pratik bir formülün olmaması nedeniyle oldukça zordur. Zira, bazı araştırmacılar P-dalga hızı yönteminin güvenilir olmadığını ve betonun dinamik elastik modülünü tahmin etmek için önerilmediğini savunmaktadır [26, 27]. Bazı araştırmacılar da laboratuvarındaki deneylerle S dalgalarının su ve/veya hava içeriğine karşı daha az hassas olduğunu ve erken yaştaki çimentolu malzemelerin sertlik (veya mukavemet) kazanımını değerlendirmek için etkili bir parametre olduğunu göstermiştir [27, 28].

Ayrıca, ultrasonik yöntem ile belirlenen betona ait basınç ve kayma dalga hızlarının birlikte kullanılması ile beton içerisindeki kırık, boşluk ve bozuşma durumunun yanı sıra betonların elastik parametreleri de (elastisite, kayma ve bulk modülleri ile Poisson oranı) elastisite teorisinden hesaplanabilmektedir [29-36].

Bu kapsamda, yapılan çalışmada 4 farklı yüksek dayanımlı beton tasarımı (beton sınıfı C35-C50) hazırlanmıştır. Ancak basınç dayanımları işçilik, şişleme vs. bir çok faktörden etkilenecek 38-70 MPa aralığında bulunmuştur. Çalışma kapsamında odak noktası belirli bir sınıftaki beton üretiminden ziyade mukavemeti yüksek bulunan numunelerdeki elastik parametrelerin değişimini gözlemlemek olmuştur. Uluslararası standartlarda genellikle silindirik

numune dayanımları kullanıldığı için bu dayanım değerleri literatürdeki bir eşitlik (Eşitlik 2) kullanılarak silindirik dayanım değerlerine dönüştürülmüştür [37]. Böylece elde edilen yeni dayanım değerlerinin 34-75 MPa aralığında değiştiği gözlenmiştir. Hazırlanan beton tasarımların ultrasonik hızların hesaplanması amacıyla dalga ölçümleri yapılmış ve ardından basınç dayanımları belirlenmiştir. Buna göre 4 farklı standartta yer alan statik elastik modüller, tek eksenli basınç dayanım sonuçlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Dinamik elastik parametreler ise tahribatsız test tekniklerinden olan ultrasonik yöntem yardımıyla belirlenen V_p ve V_s hızlardan hesaplanmıştır. Daha sonra bu sonuçlar karşılaştırılarak yüksek dayanımlı betonlarda dinamik elastik parametrelerden statik elastik parametrelere geçiş yapılması sağlanmıştır. Ayrıca standartlardaki sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak sonuçlar ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında dayanımları farklı 4 adet beton tasarımı hazırlanmıştır. Her bir tasarım için 27 adet olmak üzere toplam 108 adet 150x150x150 mm boyutunda küp numune hazırlanmıştır. Numune sayıları laboratuvar koşullarının izin verdiği doğrultuda, her bir tasarımdan olabildiğince çok sayıda numune üreterek sonuçların güvenilirliğini artırmak ve değişim aralığını geniş tutmak amacıyla hazırlanmıştır. Beton numunelerin kürlenmesi işlemi oda sıcaklığındaki ve genellikle 20 ± 2 °C sıcaklıklardaki kür havuzları kullanılarak yapılmaktadır [38]. Bunun yanı sıra, inşaat mühendisliğinde beton numunelerin 28 gün sonra kalıcı gücüne ulaştığı kabulü vardır. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan beton numuneler 28 gün boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilmiştir. 28. günde kür havuzundan çıkartılan numunelerin ağırlık ve yoğunlukları belirlendikten sonra basınç (P) ve kayma (S) dalga ölçümleri yapılarak aynı özelliklerdeki 3'er adet numunenin TEBD deneyi ile dayanımları belirlenmiş ve belirlenen değerlerin ortalamaları alınmıştır [39]. Bu işlem bütün tasarımlar için tekrar edilmiştir (Şekil 1).

2.1. Hazırlanan beton tasarımları

Beton numuneler hazırlanırken agregası olarak, iri çakıl, orta çakıl, kum (iri çakıl: %25, orta çakıl: %23, kum: %52) kullanılmış ve en büyük agregası tane boyutu (D_{max}) 63 mm olarak alınmıştır. Ayrıca, CEM II/B-LL Portland çimentosu ve içilebilir nitelikteki şebeke suyunun yanı sıra yine her bir tasarım için belli oranlarda kimyasal katkı maddeleri kullanılarak beton tasarımları hazırlanmıştır. Kimyasal katkı maddeleri (süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici) özellikle yüksek dayanımlı beton oluşturulurken betonun hızla sertleşmesinin önüne geçmek amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra CEM II/B-LL çimentosu da hem ekonomik ve kolay işlenebilir olması hem de yüksek dayanımlı betonlarda daha

kompakt, boşluksuz, pompalanabilir karışımlar elde etmeye katkı sağlaması nedeniyle teknik ve çevresel avantajlar sağlamaktadır. Beton tasarımları hazırlanırken su/çimento (s/ç) oranı ve agrega olarak kullanılan malzemelerin oranı değiştirilerek tasarımlar hazırlanmıştır. 4 adet beton tasarımının hazırlanmasında kullanılan bileşenlere ait ortalama değerler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışma kapsamındaki beton tasarımların ortalama karışım oranları (40 dm3 için)

Parametre	Birim	Miktar
Agrega (iri taneli çakıl)	(kg)	15.8
Agrega (orta boy çakıl)	(kg)	14.5
Agrega (kum)	(kg)	32.8
Portland Çimentosu (CEMII/B-LL))	(kg)	23
Su	(lt)	8.96
s/ç oranı		0.4
Hava	(%)	4.2
Süper akışkanlaştırıcı (Kimyasal katkı)	(g)	335
Hava Sürükleyici Katkı (Kimyasal katkı)	(g)	22.3

2.2. Tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç testi, betonun basınca karşı dayanımını ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem mevcut yapıya zarar vermektedir. Çünkü karot numunesi alındığında beton örneği, yapıya zarar vermeden çıkarılamamakta ve test için hazırlanan numune üzerine bir yük uygulanmaktadır. Uygulanan yük P ve numunenin taban alanı A olmak üzere tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$TEBD = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Laboratuvar ortamında doğrudan numunelerin kırılmasıyla elde edilen TEBD sonuçları ile hasarsız yöntemlerle dolaylı olarak tahmin edilen TEBD arasında genellikle ampirik, doğrusal olmayan ama korelasyonlu bir ilişki vardır. Malzeme özelliklerine ve koşullara bağlı olarak bu ilişkiler farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 1. Numune hazırlama ve ölçüm aşamaları

Yapının farklı bölgelerinden alınan karot örnekleri betonun genel kalitesini daha doğru bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Numune üzerine uygulanan yükün homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla, çapı ve yarıçapı doğru şekilde ayarlanan demir aparatlar kullanılmaktadır. Bu, testin doğruluğunu artıran bir faktördür. Kırılma anında uygulanan yükün, numunenin yüzey alanına oranı ile tek eksenli basınç dayanımı belirlenmektedir. Bu değer, yapının dayanıklılığı hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. TEBD testi, mevcut ve yapım aşamasında olan yapıların yanı sıra özellikle eski yapılarla ilgili yapısal güvenliği değerlendirme açısından oldukça faydalıdır [25, 34, 36, 40, 41].

Çalışma kapsamında 28. günde TEBD deneyi uygulanarak bütün küp numunelerin dayanımları belirlenmiş ve üçer adet numunenin ortalamaları alınmıştır. Uluslararası standartlara göre elastik parametreler belirlenirken silindirik numuneler kullanılmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada 150x150x150 mm’lik küp şeklindeki numunelerin dayanımları Eşitlik 2 kullanılarak 150x300 mm’lik silindirik numune dayanımında dönüştürülmüştür. Küp numunelerin basınç dayanımları silindirik

numunelerden yüksektir [37, 39]. Yüksek dayanımlı betonlarda silindir ve küp numuneler arasındaki dönüşüm katsayısının genellikle 0.91-1.07 arasında değiştiği kabul edilmiştir [37]. Bu durum, Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\frac{TEBD_{Silindir}}{TEBD_{Küp}} = 0.733 + \left(\frac{4.75TEBD_{Küp}}{1000} \right) \quad (2)$$

2.3. Ultrasonik yöntem

Betonda TEBD, yapının taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi açısından en kritik mekanik özelliklerden biridir. TEBD 'yi belirlemek bir amaç iken, bu amaca ulaşmak için kullanılan yöntemler hasarlı/hasarsız ya da yerinde/laboratuvarda olarak farklılık göstermektedir. Beton dayanımının belirlenmesi konusunda, geleneksel yöntemlere (karon alımı, TEBD) kıyasla alternatif olarak geliştirilen hasarsız tekniklerin (ultrasonik, radar, öz direnç vs.) kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Hasarsız yöntemler yapıya zarar vermeden, hızlı ve ekonomik çözüm sağlarken; genellikle dolaylı hesaplamalara ve ampirik bağıntılara dayanmaktadır [40]. Öte yandan, laboratuvar ortamında karot numunesiyle yapılan testler, çevresel etkilerden izole edildiği için daha tutarlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Ancak bu yöntem zaman alıcı ve maliyetlidir, ayrıca yapıdan numune alındığı için hasarlıdır. Hasarsız test yöntemleri, geleneksel karot alma işlemini tamamen ortadan kaldırmasa da özellikle ön tarama amacıyla, yapıya zarar verilmemesi istenen durumlarda, yaygın veya büyük alanların değerlendirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Böylece, hasarsız testler, karot testi ile desteklenerek kullanıldığında en güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Literatürde, laboratuvarda kırılan karot numunelerinin TEBD değerlerinin, yerinde yapılan testlere kıyasla daha doğru olduğu genel kabul gören bir görüştür [42]. Bu nedenle, değerlendirme yapılırken test yönteminin doğası, ölçüm ortamı, numune alma koşulları ve yorumlama gereklilikleri birlikte düşünülmeli; uygun yöntemin seçimi proje gereksinimlerine göre yapılmalıdır.

Ultrasonik ve elektrik öz direnç yöntemleri gibi dolaylı teknikler, betonun özellikleri hakkında bilgi vermektedir, ancak bu yöntemler bazen daha fazla yorumlama ve hesaplama gerektirebilmektedir. Dolayısıyla, beton dayanımının belirlenmesinde kullanılan her iki yöntemin de avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Tahribatlı yöntemler noktasal olarak daha kesin sonuçlar verebilirken, tahribatsız yöntemlerden ultrasonik hızlar dolaylı yaklaşımlar yapmakta ancak daha geniş alanlar hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca yapının oturduğu zeminde tahribatsız yöntemlerden sismik kırılma, öz direnç, mikrotremör ve bunun gibi hasarsız yöntemler, özellikle mevcut yapılar ve bu yapıların oturduğu zeminin kontrolü açısından, dolayısıyla da

insan sağlığı açısından önemli bir alternatif sunmaktadır [34, 43-54].

Ultrasonik yöntem, betonun içerisindeki ultrasonik dalgaların yayılma hızına dayanmaktadır. Betonun agrega, su/çimento oranı ve yoğunluk gibi faktörler, P ve S dalgalarını dalgaların hızını etkilemektedir. Böylece elde edilen ultrasonik hızlar, betonun basınç dayanımına yönelik önemli bilgiler verdiği için oldukça tercih edilmektedir [30, 33]. Ultrasonik yöntemin avantajları; betonun basınç dayanımı, iç yapısı ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, doğrudan kolon ve kirişlerde uygulanabilmesi, karot almayı gerektirmemesi, tamamen hasarsız bir yöntem olması, uygulanan bölgenin 2-boyutlu (2B) ve 3-boyutlu (3B) tomografik görüntüsünün elde edilmesine olanak sağlaması, noktasal değil de alansal bilgi sağlanması ve düşük maliyet ile hızlı sonuçlar vermesi şeklinde sıralanabilmektedir [34].

Laboratuvarda veya yerinde P ve S dalga hızlarını belirlenirken, numune yüzeyinin pürüzsüz ve düzgün olmasının, ölçüm doğruluğu üzerinde önemli etkisi vardır [34, 55, 56]. Ultrasonik cihaz, bir verici (Tx) ve alıcı (Rx) prob sistemine sahiptir. Bu cihaz, numunenin bir tarafından gönderilen dalganın diğer tarafta geliş zamanını kaydeder ve dalga hızı, Tx ile Rx arasındaki mesafenin bu geliş zamanına oranından hesaplanmaktadır [44, 55-57]. Bu ölçüm tekniği, çeşitli yapısal malzemelerde, özellikle beton, köprüler ve yollar gibi yerinde yapılan ölçümlerde kullanılabilmektedir.

Ultrasonik hızların analiz edilmesiyle, sadece betonun mekanik özellikleri değil, aynı zamanda beton içerisindeki kırıklar, boşluklar ve bozulmalar hakkında da bilgi edinilebilmekte dolayısıyla heterojenlikler kolayca ayırt edilebilmektedir. Ultrasonik dalgalar boşluklardan yansımakta veya kırılmaktadır. Bu durum dalgaların giriş hızında yavaşlamaya, sinyalin zayıflamasına veya hiç ulaşmaması gibi etkilere sebep olmaktadır. Dalgaların geçtikleri ortamlarda çatlakların varlığı söz konusu ise, dalgalar oradan geçerken sapma veya yayılma gecikmesi olmaktadır. Tekrarlanan ölçümlerde ani hız değişimleri, kırık veya çatlak belirtisi olabilmektedir [23-25]. Ancak, yerinde yapılan ölçümlerde, donatı üzerinde ölçüm yapıp yapılmadığının belirlenmesi, beton özelliklerinin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için önemlidir. Ultrasonik dalga donatı üzerinden geçtiğinde, ölçülen hız yüksek çıkmakta ve böylece gerçek beton kalitesi olduğundan iyi olarak yorumlanmaktadır [33, 58].

2.4. Betonun elastik modülleri

Elastik modüller; Elastisite modülü (E), Kayma modülü (G) ve Bulk modülünden (K) oluşmaktadır. Bu parametreler hesaplanma şekline göre statik ve dinamik modüller olarak ikiye ayrılmaktadır. Statik elastik modüller TEBD sonuçlarına bağlı olarak

belirlenebilirken; dinamik Elastik parametreler ise tahribatsız test tekniklerinden olan Ultrasonik yöntem yardımıyla belirlenen basınç (V_p) ve kayma (V_s) dalga hızlarından hesaplanabilmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda dinamik elastik modüller genel itibarıyla statik elastik modüllerden %20 daha yüksek değerlerde bulunurken bu değer orta dayanımlı betonlarda %30 ve düşük dayanımlı betonlarda ise %40 civarındadır [20].

2.5.1. Betonun statik ve dinamik elastisite modülleri

Elastisite modülü, bir malzemenin elastik davranışını tanımlayan ve onun deformasyona karşı gösterdiği direnç ile doğrudan ilişkili temel bir mekanik özelliktir. Özellikle beton gibi gevrek ve yapısal malzemelerde, elastisite modülü, malzemenin ne kadar sert olduğunu ve uygulanan yükler altında ne kadar şekil değiştireceğini belirlemede kritik rol oynamaktadır. Betonun elastisite modülünün bilinmesi, mühendislik tasarım ve analiz süreçleri açısından son derece önemlidir. Çünkü, betonarme yapılarda meydana gelen gerilmeler ve yer değiştirmeler, doğrudan yapı elemanlarının elastik deformasyon kapasitesine bağlıdır. Böylece, uygulanan yük altında betonun ne kadar gerileceği veya sıkışacağı önceden tahmin edilebilmektedir. Ayrıca, betonarme yapıların güvenli ve ekonomik şekilde tasarlanabilmesi için, elastisite modülünün doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer, yapı elemanlarının eğilme, burkulma ve yer değiştirme davranışlarını etkileyen en temel mekanik parametrelerden biridir [17].

Betonun elastik modülü orta ve yüksek dayanımlı, düşük gözenekli ve normal ağırlıklı betonlar için genellikle 25- 50 GPa arasında değişmektedir, ancak bu değer kullanılan malzeme türüne ve karışım oranlarına göre farklılık gösterebilmektedir. Literatürde bazı araştırmacılar ampirik bağıntılar ile $TEBD$ değerlerinden elastisite modülüne yaklaşım yapılabileceğini ortaya koymuşlardır [59-62].

Betonun elde edilmesinde kullanılan ve viskoz bir karışım olan çimento hamuru, beton malzemenin birim şekil değiştirmesinin betonu oluşturan katı malzemenin birim şekil değiştirmesinden farklı olmasını sağlamaktadır. Bu durumun temel sebepleri beton içerisindeki agregaların elastik ve rijit davranışlar sergilemesine karşılık çimento hamurunun elastik ve viskoz (zamana bağlı deformasyon) davranış sergilemesidir. Bu nedenle beton, yük altında iken homojen bir şekilde deformasyon gösteremediği için heterojen yapıdadır. Statik elastisite modülü tek eksenli basınç testi esnasında elde edilen gerilme-deformasyon eğrisi vasıtasıyla belirlenmektedir. Ancak, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesi zor ve uzun süren deneysel çalışmalar gerektirmektedir. Bundan dolayı kolay ve pratik bir yol olması açısından elastisite

modülünün beton basınç dayanımından elde edildiği bağıntılar kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar için statik elastisite modülü dünya çapındaki birçok standarda göre tanımlanan eşitlikler yardımıyla GPa cinsinden ampirik olarak hesaplanabilmektedir. TSE standartlarında [10] statik elastisite modülü Eşitlik 3'te tanımlanmıştır.

$$E_s(TSE) = 3.25(TEBD)^{0.5} + 14 \quad (3)$$

ACI (Amerika Beton Enstitüsü) standartlarında [11] statik elastisite modülü Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$E_s(ACI) = 3.32(TEBD)^{0.5} + 6.9 \quad (4)$$

Sadece yüksek dayanımlı betonlar için ise CEB (Avrupa Beton Komitesi) standartlarında [13] statik elastisite modülü Eşitlik 5'te gösterilmektedir.

$$E_s(CEB) = 10(TEBD + 8)^{1/3} \quad (5)$$

Statik elastisite modülü NS (Norveç) standartlarında [12] ise Eşitlik 6'daki gibi tanımlanmıştır.

$$E_s(NS) = 9.5(TEBD)^{0.3} \quad (6)$$

Basınç (P) dalga hızının (V_p) yanı sıra kayma (S) dalga hızlarının (V_s) da belirlenmesi ile elde edilen hız oranı yardımıyla ve dinamik kayma modülüne (G_d) bağlı olarak dinamik elastisite modülü (E_d) Eşitlik 7'den hesaplanabilmektedir [63, 64].

$$E_d = 3G_d \left[\frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - \frac{4}{3}}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right] \quad (7)$$

Bu modül betonun esneme direnci ve sağlamlığı hakkında bilgi vermektedir [64].

2.5.2. Betonun statik ve dinamik kayma modülleri

Kayma modülü, bir malzemenin kayma gerilmesine karşı gösterdiği dirençtir ve bu, malzemenin elastik özelliklerinin bir ölçüsüdür. Yanal yönde bir kuvvet uygulandığında, malzeme kayma gerilmesi üretir ve bu gerilme, malzemenin kayma deformasyonuna oranlanarak kayma modülü elde edilmektedir.

Elastisite modülü ve Poisson oranına bağlı olarak statik kayma modülü (G_s) Eşitlik 8'den hesaplanmaktadır.

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)} \quad (8)$$

G_s , TSE standartlarında Poisson oranının 0.2 olarak kabul edilmesine bağlı olarak;

$$G_s = 0.4E_s \quad (9)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. G_d -ise yoğunluk (bha, γ) (gr/cm^3) ve S dalga hızı (km/s) ile hesaplanmaktadır.

$$G_d = \frac{\gamma V_s^2}{g} \quad (10)$$

Burada g yer çekim ivmesidir. Yoğunluk ise ultrasonik hızlar yardımıyla hesaplanabilmektedir [65].

$$\gamma = 0.7(V_p V_s)^{0.08} \quad (11)$$

Kayma modülü, betonun kayma kuvvetlerine karşı gösterdiği dirençle doğrudan ilgilidir. Betonun kayma modülü büyükse, beton daha fazla esneme gösterir ve bu da depremdeki S dalgası gibi etkilerle başa çıkabilmesine yardımcı olmaktadır. Kayma modülünün düşük olması ise, betonun kayma gerilmelerine karşı daha az direnç göstermesi anlamına gelmektedir. Bu durum, betonun daha az rijit, dolayısıyla daha fazla şekil değiştirebilen bir yapı sergilemesine yol açmaktadır. Ancak, betonun plastik deformasyon kapasitesi sınırlı olduğundan, bu şekil değişimi genellikle çatlak oluşumu ve kırılma ile sonuçlanmaktadır. Özellikle bağlantı bölgelerinde ve çekme etkisinin yoğun olduğu noktalarda, düşük kayma modülü; çatlak ilerlemesi, aderans kaybı ve yapısal zayıflıklara neden olabilmektedir. Bu nedenle, betonarme yapıların tasarımında kayma rijitliği göz önünde bulundurulmalıdır [66].

2.5.3. Betonun statik ve dinamik bulk modülleri

Sıkışmazlık (bulk) modülü, bir malzemenin, özellikle beton gibi, hacimsel deformasyonlara karşı gösterdiği dirençle ilgilidir. Sıkışmazlık modülü, hidrostatik basınç altındaki bir malzemenin hacimsel değişimini ölçen bir parametredir. Yani, belirli bir basınç uygulandığında, bu malzemenin hacminde ne kadar küçülme (ya da genellikle genişleme) olduğunu göstermektedir. Beton gibi sert malzemelerde, sıkışmazlık modülü yüksek olursa, malzeme daha az sıkışır ve hacminde daha az değişiklik olur. Elastisite modülü ve Poisson oranına bağlı olarak statik bulk modülü (K_s) Eşitlik 12'den hesaplanabilmektedir [67].

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\mu_s)} \quad (12)$$

Dinamik bulk modülü (K_d) ise, betonun yoğunluğu ve ultrasonik hızlar yardımı ile;

$$K_d = G_d \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - \frac{4}{3} \right] \quad (13)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

2.5.4. Betonun statik ve dinamik Poisson oranı

Poisson oranı (ya da Poisson katsayısı), malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlayan bir parametredir ve

genellikle bir malzemenin elastik davranışını anlamada kullanılmaktadır. Bu oran, bir malzeme üzerine boyuna doğrultuda uygulanan bir yük sonucu oluşan boyuna deformasyon ile, aynı malzemenin enine doğrultuda oluşan deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

Poisson oranı, genellikle μ ile gösterilerek aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\mu_s = \frac{\left(\frac{\Delta a}{a} \right)}{\left(\frac{\Delta L}{L} \right)} \quad (14)$$

Burada $\frac{\Delta a}{a}$: enine deformasyon; $\frac{\Delta L}{L}$: boyuna deformasyondur.

Poisson oranı, 0-0.5 arasında değerler alabilmektedir. Ancak, çoğu elastik katılar için ortalama Poisson oranı değeri 0.25 civarındadır [68]. Uluslararası standartlarda statik Poisson oranı (μ_s) için her ülke farklı kabuller yapmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar için Poisson oranı genellikle 0.2-0.3 aralığında değişmekle birlikte [9, 34-36, 69-71] TSE, ACI, CEB ve NS standardında 0.2 kabul edilmektedir [10-13]. Dinamik Poisson oranı (μ_d) olarak ultrasonik hızlardan hesaplanabilmektedir. Bir malzemedeki gözeneklerin su veya havaya doygunluğunun değerlendirilmesi açısından Poisson oranı önemlidir. Poisson oranı ultrasonik hız oranına (V_p/V_s) doğrudan bağlıdır [35, 36, 64, 72].

$$\mu_d = \left[\frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2} \right] \quad (15)$$

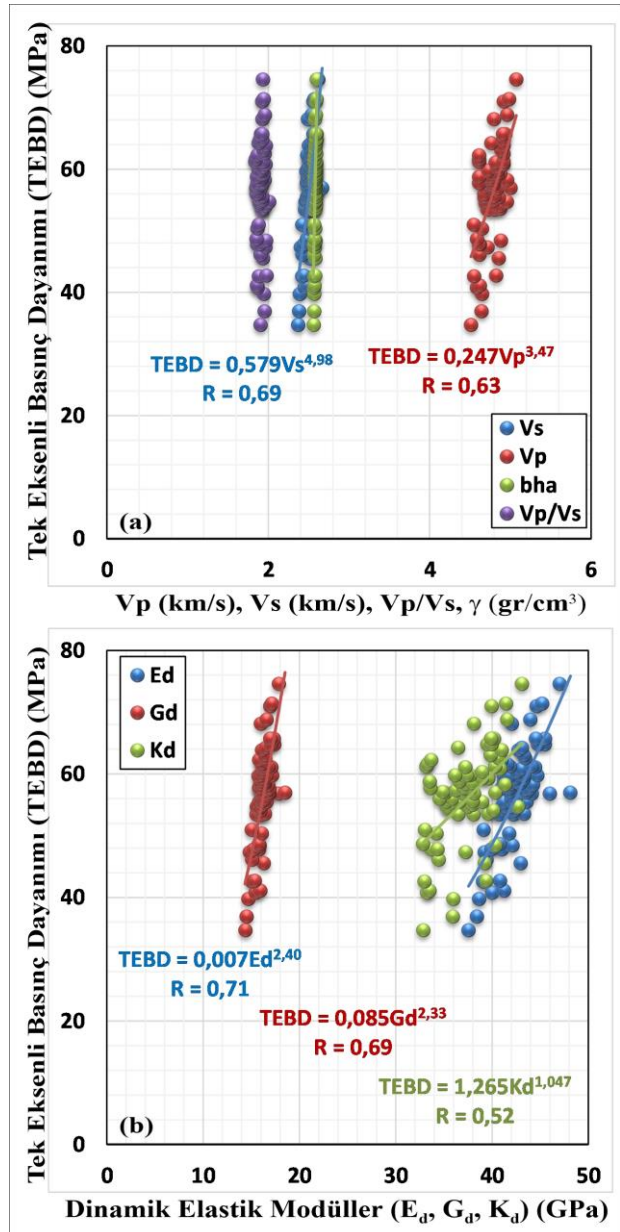
Betonda gözeneklerin su ya da havaya doygunluğu Poisson oranına bağlı olarak belirlenebilmektedir-[17, 36]. Özellikle beton gibi malzemelerde, Poisson oranının yüksek değerleri, betondaki gözeneklerin suyla doygun olduğunu gösterebilmektedir. Bu durum, betonun su emme kapasitesini ve dayanımını etkileyebilmektedir. Öte yandan, düşük Poisson oranı, malzemenin daha fazla hava dolayısıyla gözenekli olduğunu ve bu durumun betonun dayanıklılığını düşürebileceğini göstermektedir. P ve S dalga hızları ise, malzemenin elastik özelliklerini, özellikle dayanıklılığıyla ilgili daha net bilgiler sunabilmektedir. Bu dalga hızlarının incelenmesi, malzemenin iç yapısındaki özellikler (boşluk, kırık gibi) hakkında daha doğru bir değerlendirme yapmayı sağlamaktadır [36, 64].

3. Bulgular

Yapılan çalışmada yüksek dayanımlı betonlara ait dinamik ve statik elastik parametreler ile tek eksenli basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Buna göre, öncelikle Şekil 2a'da yüksek dayanımlı betonlara ait P ve S dalga hızları, hız oranı (V_p/V_s) ve yoğunluk değerleri ile tek eksenli beton basınç dayanımları arasındaki ilişkilendirmeler sunulmuştur.

Bunun yanı sıra yine Şekil 2b’de, yüksek dayanımlı betonların dinamik elastik parametreleri (E_d , G_d , K_d) ile tek eksenli beton basınç dayanımlarının değişimi araştırılmıştır. Buna göre V_p hızları 4.4-5.2 km/s, V_s hızları ise 2.3-2.8 km/s aralığında bulunmuştur. Yoğunluk değerleri genel itibarıyla 2.5 gr/cm³ olarak belirlenirken hız oranı V_p/V_s ise 1.7-2.1 aralığında bulunmuştur. Ayrıca, dinamik elastisite modülü 37-49 GPa, dinamik kayma modülü 14-19 GPa, dinamik bulk modülü 32-44 GPa ve dinamik Poisson oranı 0.28-0.35 aralığında bulunmuştur.

Ayrıca, küp numunelerin tek eksenli basınç dayanımları Eşitlik 2 kullanılarak 4 adet tasarım için (D1, D2, D3 ve D4) sırasıyla 38-54 MPa, 54-57 MPa, 57-60 MPa ve 60-70 MPa olarak bulunmuştur. Daha sonra, bu numunelerin dayanımları uluslararası standartlardaki elastik modüllerin karşılaştırılması amacıyla küp şeklindeki numunelerin dayanımları literatürdeki Eşitlik 2 yardımıyla [37] silindirik numune dayanımlarına dönüştürülmüştür. Buna göre D1 tasarımına ait betonları dayanımı 34.71-53.43 MPa, D2 tasarımı 53.56-57.09 MPa, D3 tasarımı 57.34-60.82 MPa ve D4 tasarımı 61.08-74.59 MPa silindirik numune dayanımlarına sahip bulunmuştur.



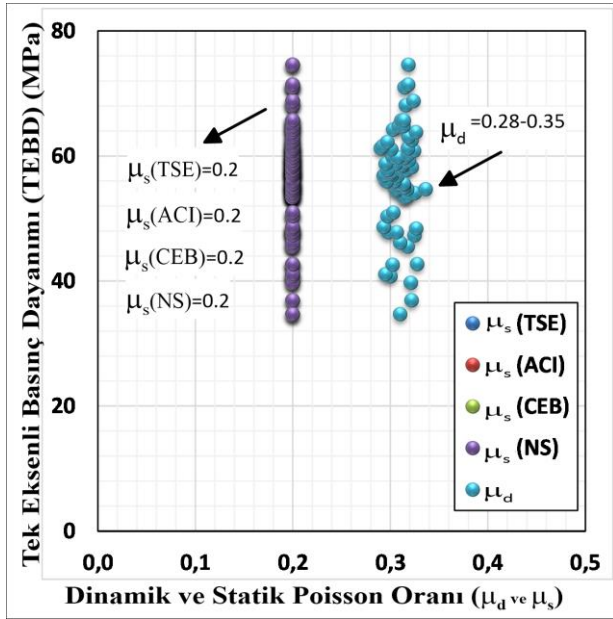
Şekil 2. Yüksek dayanımlı betonlara ait a) P ve S dalga hızları, V_p/V_s oranı ve yoğunluk (bha) değerleri ile b) dinamik elastik modüller (E_d , G_d , K_d) ve tek eksenli beton basınç dayanımları arasındaki ilişkilendirmeler

Yüksek dayanımlı betonlarda bağımlı değişkenler olan P ve S dalga hızları ile dinamik elastik modüller (E_d , G_d , K_d) ve bağımsız değişken TEBD arasındaki ilişki denklemleri Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre, aralarında pozitif yönlü üstel ilişkiler olduğu ve dayanım değerlerinin geniş bir alanda yayılmasından dolayı ve ayrıca agrega tipi, nem oranı gibi parametrelerin mikroyapısal değişkenliğe sebep olası gibi nedenlerle korelasyon katsayılarının (R) 0.52-0.71 aralığında bulunduğu gözlenmiştir. Bu durumda ilişkilerin iyi bir lineerlik sergilememesi, yüksek dayanımlı betonlarda dinamik parametrelerin TEBD’yi tahmin etmede etkili olduğunu, ancak yapısal heterojenlik nedeniyle tek başına yeterli olmadığını göstermektedir.

Tablo 2. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki denklemleri

Bağımsız değişken	Birim	İlişki denklemi ($y=ax^b$)	R
V_p	km/s	$TEBD = 0.247 \cdot V_p^{3.47}$	0.63
V_s	km/s	$TEBD = 0.579 \cdot V_s^{4.98}$	0.69
E_d	GPa	$TEBD = 0.007 \cdot E_d^{2.4}$	0.71
G_d	GPa	$TEBD = 0.085 \cdot G_d^{2.33}$	0.69
K_d	GPa	$TEBD = 1.265 \cdot K_d^{1.047}$	0.52

Şekil 3'te Yüksek dayanımlı betonlarda elastik teoriden elde edilen μ_d ve farklı standartlarda kabul edilen μ_s ile TEBD karşılaştırılması sunulmuştur. Buna göre statik Poisson oranının sabit bir değer olarak 0.2 alınmasına karşın dinamik Poisson oranının 0.28-0.35 aralığında değiştiği belirlenmiştir.

**Şekil 3.** Yüksek dayanımlı betonların dinamik ve statik Poisson oranı (μ_d ve μ_s) ile tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4'te yüksek dayanımlı betonların farklı standartlardaki (TSE, ACI, CEB ve NS) statik elastik modülleri (elastisite, kayma ve bulk) ile tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması sunulmuştur.

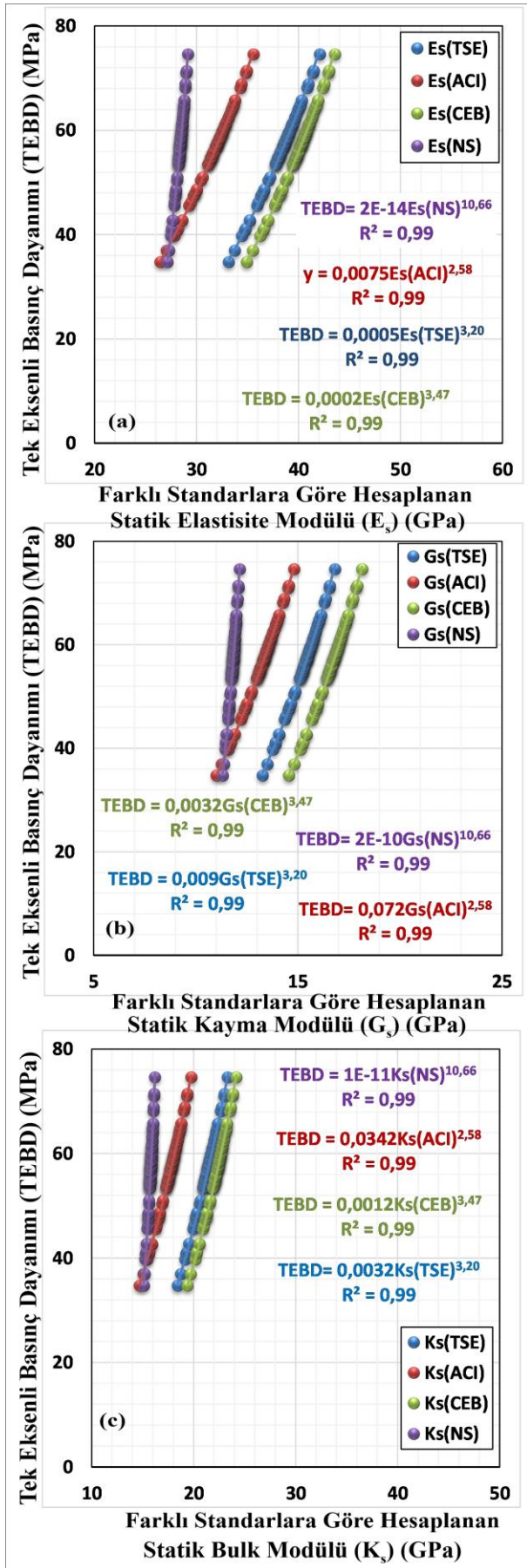
Buna göre, statik elastik parametrelerdeki değişim incelendiğinde NS standardına göre belirlenen elastik modüller daha dar bir aralıkta değişirken, ACI, CEB ve TSE standardında daha geniş bir aralıkta değişmektedir. Statik elastisite modülü NS, ACI, TSE ve CEB standardında sırasıyla 26-30 GPa, 26-36 GPa, 32-42 GPa ve 34-44 GPa aralığında değişmiştir. Buna karşın, kayma modülü sırasıyla 12-13 GPa, 11-16 GPa, 13-17 GPa ve 15-19 GPa aralığında bulunmuştur. Bulk modülü değerleri ise sırasıyla 12-14 GPa, 12-18 GPa, 16-22 GPa ve 18-24 GPa aralığında hesaplanmıştır. Ayrıca yine Şekil 4'te incelendiğinde, statik elastik modüller arttıkça tek eksenli basınç dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir.

Genel itibarıyla nispeten TSE ile CEB standartları ve ACI ile NS standartlarından belirlenen statik elastik parametreler birbirine yakın değerlerde bulunmakla birlikte her bir uluslararası standartta farklı elastik modül değerleri bulunmuştur. Her bir standart için elastik parametrelerden TEBD değeri belirlenirken elde edilen eşitliklerde üs değeri aynı olmakla birlikte sadece katsayıdaki farklılık ile elastisite, kayma ve bulk modüllerinden TEBD değerlerine yüksek doğrulukla yaklaşım yapılabildiği gözlenmiştir. Bütün bağıntılarda belirlilik katsayısı (R^2) 0.99 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla aralarında pozitif yönde üstel bir ilişkinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Yüksek dayanımlı betonlarda bağımlı değişkenler olan statik elastik modüller (E_d , G_d , K_d) ve bağımsız değişken TEBD arasındaki ilişki denklemleri 4 ayrı uluslararası standart göz önünde bulundurularak Tablo 3'de ayrı ayrı verilmiştir. Buna göre, aralarında pozitif yönlü üstel ilişkiler olduğu ve belirlilik katsayılarının oldukça yüksek bulunduğu gözlenmiştir.

Tablo 3. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki denklemleri

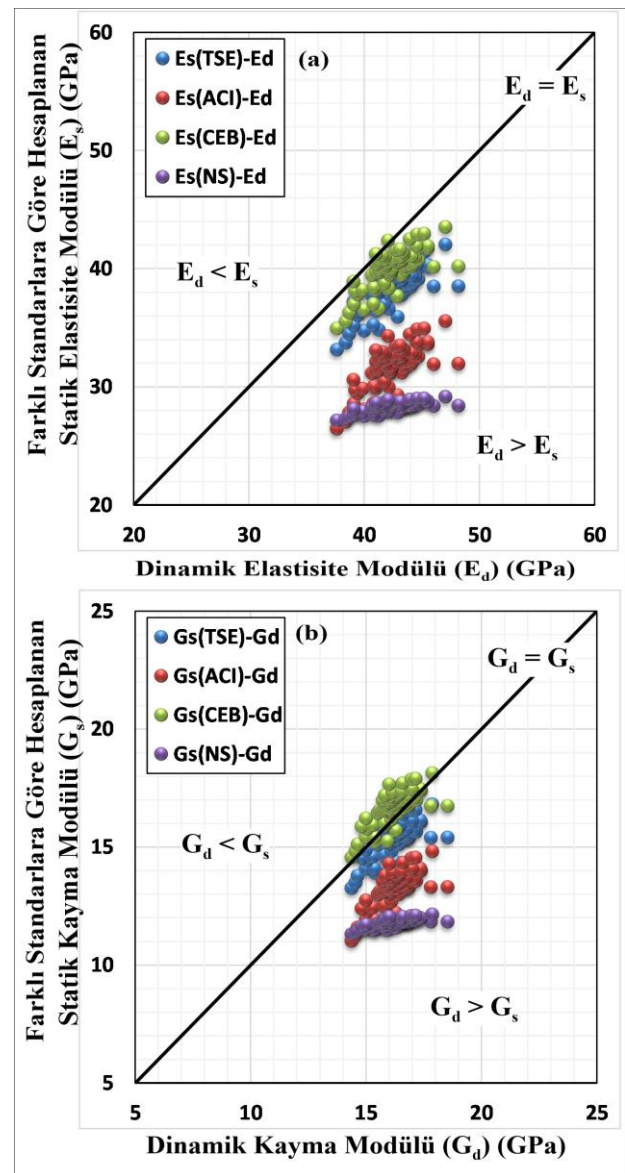
Bağımsız değişken (GPa)	İlişki denklemi ($y=ax^b$) (MPa)	Belirlilik katsayısı (R^2)
$E_s(TSE)$	$TEBD = 0.0005 \cdot E_s(TSE)^{3.2}$	0.99
$G_s(TSE)$	$TEBD = 0.009 \cdot G_s(TSE)^{3.2}$	0.99
$K_s(TSE)$	$TEBD = 0.0032 \cdot K_s(TSE)^{3.2}$	0.99
$E_s(ACI)$	$TEBD = 0.0075 \cdot E_s(ACI)^{2.58}$	0.99
$G_s(ACI)$	$TEBD = 0.072 \cdot G_s(ACI)^{2.58}$	0.99
$K_s(ACI)$	$TEBD = 0.0342 \cdot K_s(ACI)^{2.58}$	0.99
$E_s(CEB)$	$TEBD = 0.0002 \cdot E_s(CEB)^{3.47}$	0.99
$G_s(CEB)$	$TEBD = 0.0032 \cdot G_s(CEB)^{3.47}$	0.99
$K_s(CEB)$	$TEBD = 0.0012 \cdot K_s(CEB)^{3.47}$	0.99
$E_s(NS)$	$TEBD = 2 \cdot 10^{-14} \cdot E_s(NS)^{10.66}$	0.99
$G_s(NS)$	$TEBD = 2 \cdot 10^{-10} \cdot G_s(NS)^{10.66}$	0.99
$K_s(NS)$	$TEBD = 1 \cdot 10^{-11} \cdot K_s(NS)^{10.66}$	0.99



Şekil 4. Yüksek dayanımlı betonlarda a) E_s -TEBD b) G_s -TEBD-ve c) K_s -TEBD karşılaştırılması

Şekil 5 ve 6'da yüksek dayanımlı betonların farklı standartlardaki (TSE, ACI, CEB ve NS) statik ve dinamik elastisite, kayma ve bulk modülleri ile Poisson oranlarının karşılaştırılması sunulmuştur. Buna göre, genel itibariyle dinamik elastik parametreler statik elastik parametrelere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Dinamik ve statik elastisite modülü değeri CEB standardında birbirine en yakın değerlerde bulunurken, aralarındaki farklılığın en fazla NS standardında olduğu bulunmuştur.

Statik ve dinamik kayma modülü değerlerinin başta TSE ve CEB standartlarında olmak üzere birbirine oldukça yakın elde edildiği belirlenmiştir. Bulk modülü değerleri karşılaştırıldığında ise özellikle NS standartlarında aradaki farkın oldukça fazla olduğu ve dinamik bulk modülü değerinin statik modülden yüksek bulunduğu gözlenmiştir.

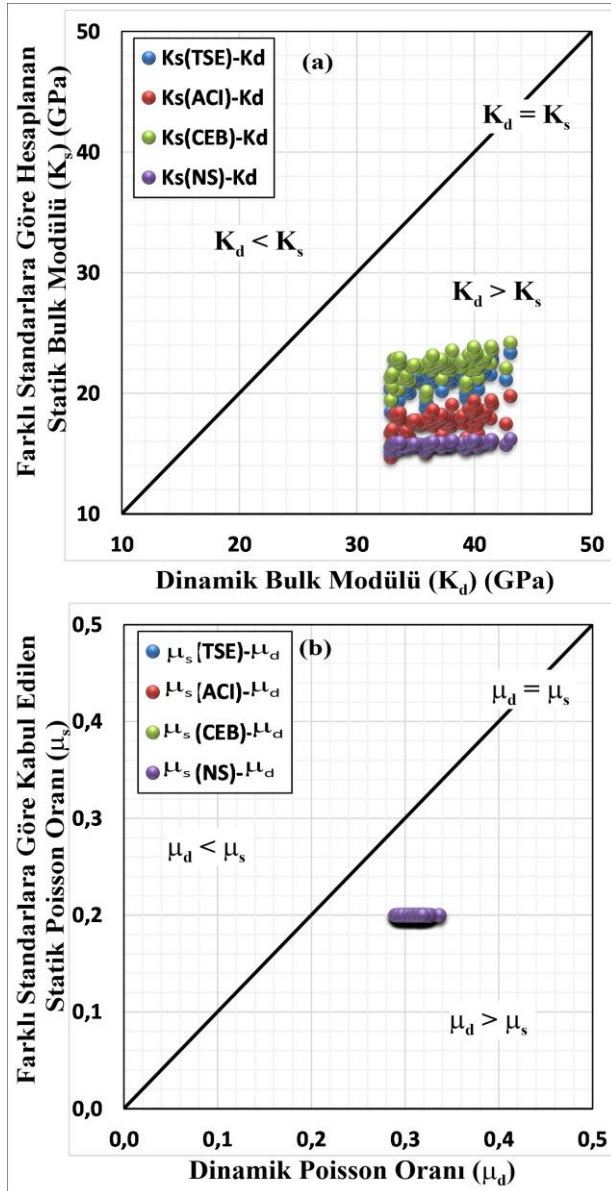


Şekil 5. Yüksek dayanımlı betonların statik ve dinamik a) elastisite ve b) kayma modüllerinin karşılaştırılması

Yüksek dayanımlı betonlar için NS standardında statik bulk modülü 12-14 GPa aralığında iken dinamik bulk

modülü 32-44 GPa aralığında bulunmuştur. Yüksek dayanımlı betonlarda dinamik Poisson oran değeri 0.28-0.35 aralığında değişirken, statik Poisson oranı TSE, ACI, CEB ve NS standartlarında sabit bir değer ve 0.2 olarak kabul edilmektedir.

Poisson oranının sabit alınması elastik modül hesaplamalarındaki farklılıklar üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Bu parametrenin sabit kabul edilmesi ile daha yüksek elastik modül değerleri elde edilmektedir. Bu durumda, Poisson oranının sabit kabul edilmeyip beton dayanımına bağlı olarak belirlenmesi güvenli yapılaşma açısından bir avantaj sağlamakla birlikte, maliyet açısından dezavantajlı bir durum ortaya koyabilmektedir [36].



Şekil 6. Yüksek dayanımlı betonların statik ve dinamik a) Bulk modülü ve b) Poisson oranlarının karşılaştırılması

Dinamik elastik parametre değerlerinin statik elastik parametrelerden hangi oranda daha yüksek bulunduğunu ortaya koymak amacıyla, Şekil 5 ve 6 birlikte değerlendirildiğinde statik ve dinamik elastik

parametreler arasındaki yüzde (%) değişim miktarları Eşitlik 16 yardımıyla hesaplanarak Tablo 4'te sunulmuştur.

$$\% \text{ Değişim} = \frac{|x_2 - x_1|}{x_1} \times 100 \quad (16)$$

Bu çalışma için Eşitlik 16'da gösterilen X₁ ve X₂ değişkenleri sırasıyla dinamik ve statik elastik parametreleri temsil etmektedir.

Tablo 4. Farklı standartlardan hesaplanan statik elastik parametreler ve dinamik elastik parametreler arasındaki yüzde (%) değişim

Uluslararası Standart	Elastik Parametreler			
	E	G	K	μ
NS	32.9	26.8	57.5	35.4
CEB	5.5	3.8	40	35.4
ACI	25	18.2	52.5	35.4
TSE	9.5	5.2	42.7	35.4

Tablo 4 değerlendirildiğinde statik ve dinamik elastik parametreler arasındaki değişim en az CEB standardında iken bunu sırasıyla TSE, ACI ve NS standartları izlemiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Jeofizik yöntemler, özellikle yapısal incelemelerde önemli avantajlar sunmaktadır. Klasik yöntemler, örnek olarak bir bölgedeki betonun durumunu analiz ederken, jeofizik yöntemler yapının tamamını taramaktadır. Bu sayede sadece belirli bir noktadan değil, tüm yapı boyunca betonun dayanıklılığı, boşluklar, çatlaklar veya diğer yapısal sorunlar tespit edilebilmektedir.

Özellikle ultrasonik testler, betonun içinde ses dalgalarını kullanarak, iç yapı hakkında bilgi vermektedir. Ultrasonik yöntemlerin en büyük avantajı, hasarsız olması ve noktasal değil alansal bilgi vermesidir. Dolayısıyla, her iki yöntemin de kullanım ve yöntemlerin kombinasyonu, yapının tüm durumu hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır.

Okul, hastane, nükleer santral vb. yüksek dayanımlı yapıların elastik modül değerlerinin bilinmesi oldukça önem taşımaktadır. Bu anlamda tahribatsız test teknikleri ile yapıya hasar vermeden oldukça ekonomik ve hızlı bir şekilde beton basınç dayanımlarının ve elastik modüllerinin tahmin edilmesi mümkündür. Ayrıca, tahribatsız elde edilen dinamik elastik parametrelerden, tahribatlı olarak elde edilen dayanım değerlerinden hesaplanan statik elastik modüllere yaklaşım yapılabileceği ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışmada yüksek dayanımlı betonlar için farklı standartlardaki elastik modül hesaplamalarının birbirinden farklı çıktığı görülmektedir. Her ülkenin standardı elastik modülü farklı katsayılar veya

ampirik formüller kullanarak hesaplamaktadır. Örneğin TEBD değeri 30 MPa olması durumunda statik elastik modüller karşılaştırıldığı zaman TSE, ACI, CEB ve NS standartlarında Elastisite modülü sırasıyla 31.80 GPa, 25.08 GPa, 33.62 GPa ve 26.82 GPa olarak hesaplanmaktadır. Aynı dayanım için statik elastik modüller arasında yaklaşık %34'e kadar farklar vardır. Ayrıca ACI ve TSE gibi formüllerde üs ifadesi 0.5 olduğu için daha hızlı artış gösterirken (daha düşük dayanımlarda daha düşük, yükseklerde daha yüksek değerler verir), CEB ve NS denklemlerinde üs ifadesi 0.3 olduğu için daha dengeli ve yatay bir artış göstermektedir. Bu nedenle her zaman kullanılan standartla uyumlu bir Elastisite modülü değeri seçilmelidir. Tasarım hassasiyeti gereken özel projelerde, özellikle yüksek dayanımlı beton kullanılıyorsa, doğrudan statik elastisite deneyi yapılmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Elastik modül hesaplamalarının birbirinden farklı sonuçlar üretmesinin bir sebebi de özellikle statik kayma ve bulk modüllerinin hesaplanmasında Poisson değerinin her standartta sabit kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, Poisson değerinin dayanım değerlerine göre değişebildiği ve bu nedenle de sabit alınmasının doğru olmayacağı düşünülmektedir. Aynı beton sınıfı için farklı standartlara göre farklı elastik modül değerleri elde edilmesi gerilme, sehim (sünek davranış), rijitlik ve çatlama kontrolü gibi hesaplamalarda farklı sonuçlar doğuracaktır.

Küreselleşen inşaat sektöründe aynı projede farklı ülkelerden mühendisler, firmalar ve ekipmanlar kullanılabiliyor. Bu durumda hangi standardın temel alınacağı ve betonun elastik modülü farklı ülkelerce farklı belirlendiğinde hesapların tutarlılığının nasıl sağlanacağı gibi konular ciddi koordinasyon ve iletişim sorunlarına yol açabilecektir. Elastik modül düşük alındığında, yapı daha esnek görülmekte ve daha büyük deformasyonlar, daha büyük kesitler gerekebilmektedir. Bu durum gereksiz maliyet artışına sebep olacaktır. Elastik modül yüksek alındığında ise yapı daha rijit gibi görülmekte ve gerçek davranışı yansıtmazsa çatlama, servis ömrü kısılması gibi riskler doğmaktadır. Bu nedenlerle betonun elastik modülünün hangi standarda göre hesaplandığı mutlaka belirtilmeli ve projedeki hesaplamalar buna göre uyumlu hale getirilmelidir. Aksi halde, yapının performansı ciddi biçimde etkilenebilecektir.

Teşekkür

Makalenin gelişmesine yaptıkları katkılardan dolayı sayın Editör, hakemler ve Prof. Dr. Osman UYANIK'a çok teşekkür ederim.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

Kaynakça

- [1] Sun, R. W., Fanourakis, G. C. 2022. An Assessment of Factors Affecting the Elastic Modulus of Concrete. Structural Concrete, 23, 593–603.
- [2] Demir, F. 2005. Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi İçin Bir Bulanık Yaklaşım. Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, Kocaeli, 1353.
- [3] Emiroğlu, M., Yıldız S., Özgan, E. 2009. Lastik Agregalı Betonlarda Elastisite Modülünün Deneyisel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(3), 469-476.
- [4] Türk, K., Karataş, M., Tuğrul, P., Benli, A. 2010. Farklı Tip ve Miktarda Puzolan İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanımı ve Elastisite Modülü Arasındaki İlişki. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3), 247-253.
- [5] Li, G., Zhao, Y., Pang, S., Li, Y. 1999. Effective Young's Modulus Estimation of Concrete. Cement and Concrete Research, 29(9), 1455-1462.
- [6] Huo, X. S., Al-Omaishi, N., Tadros, M. K. 2001. Creep, Shrinkage and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete. ACI Materials Journal, 98(6), 440-449.
- [7] Türkel, B. 2002. Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 79s.
- [8] Yılmaz, A. O., Arıoğlu, N., Arıoğlu, E. 2006. Investigation of Elastic Modulus/Compressive Strength Ratio in Normal and High Strength Concrete. Turkish Journal of Concrete Fabrication, 77-78.
- [9] Ekin, N., Uyanık, O. 2021. 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.

- [10] TS ISO 1920-10. 2015. Beton deneyleri-Bölüm 10: Basınç altında statik elastik modülünün belirlenmesi. TSE, Ankara.
- [11] ACI Committee 363. 2010. Report on High-Strength Concrete. ACI 363R-10. American Concrete Institute Committee 363, Farmington Hills, MI.
- [12] NS 3676. 1987. Concrete Testing, Hardened Concrete. Modules of Elasticity in Compression, Norway.
- [13] CEB-FIB. 1990. BullationD'Information. CEB, Laussane, Switzerland.
- [14] Shih, T. S., Lee, G. C., Chang, K. C. 1989. On Static Modulus of Elasticity of Normal-Weight Concrete. ASCE Journal of Structural Engineering, 115(10), 2579-2585.
- [15] Han, S. H., Kim, J. K. 2004. Effect of Temperature and Age on the Relationship Between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete. Cem. Concr. Res., 34(7), 1219-1227.
- [16] Ranchero, J. L. 2005. Analyzing and Determining Relationships in Elastic Properties of Concrete Using Wave Propagation and Vibration and Uniaxial Compression. University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Illinois.
- [17] Zhou, Y., Gao, J., Sun, Z., Qu, W. 2015. A Fundamental Study on Compressive Strength, Static and Dynamic Elastic Moduli of Young Concrete. Construction and Building Materials, 98, 137-145.
- [18] Ersoy, U., Özcebe, G. 2001. Reinforced: Basic Principles TSI-500-2000 and Account According to Turkish Earthquake Code (1998). Expanded New Edition, Evrim Publ.
- [19] Lee, B. J., Kee, S. H., Oh, T., Kim, Y. Y. 2017. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 1651753, 13.
- [20] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. 2008. Concrete: Microestrutura. Propriedades e Materiais, 3 ed. São Paulo: IBRACON, 674s.
- [21] Lydon, F. D., Iacouou, M. 1995. Some Factors Affecting The Dynamic Modulus of Elasticity of High Strength Concrete. Cement and Concrete Research, 25(6), 1246-1256.
- [22] Nagy, A. 1997. Determination of E-Modulus of Young Concrete with Nondestructive Method. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 9(1), 15-20.
- [23] Ekin, N. 2021. 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.
- [24] Ekin, N. 2021. Concrete Anisotropy Estimated from Ultrasonic Signal Amplitudes. Materials Testing, 63(12), 1164-1173.
- [24] Ekin, N., Uyanık, O. 2021. Anisotropy of Reinforced Concrete from Geophysical Methods. Science of Sintering, 53(3), 323-345.
- [26] Popovics, J. S. 2008. A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. in ACI-CRC Final Report.
- [27] Lee, B. J., Kee, S.-H., Oh, T., Kim, Y.-Y. 2015. Effect of Cylinder Size on The Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Concrete from Static and Dynamic Tests. Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 580638, 12s.
- [28] Carette J. Staquet, S. 2015. Monitoring The Setting Process of Mortars by Ultrasonic P and S-Wave Transmission Velocity Measurement. Construction and Building Materials, 94, 196-208.
- [29] Uyanık, O., Kaptan, K., Gülay, F. G., Tezcan, S. 2011. Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. Yapı Dünyası, 184, 55-58.
- [30] Uyanık, O. 2012. Sismik Hızlardan Beton Dayanımının Belirlenmesi. Jeofizik Bülteni, 23(70), 25-30.
- [31] Uyanık, O., Tezcan, S. 2012. Beton Dayanımının Ultrasonik Yöntemle Tayini. Jeofizik Bülteni, 23(70), 41-45.
- [32] Uyanık, O., Gülay, F. G., Tezcan, S. 2012. Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. Hazır Beton, 436, 82-85.
- [33] Sabbağ, N. 2016. Beton Kalitesinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 172s.
- [34] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2017. Prediction of Reinforced Concrete Strength by Ultrasonic Velocities. Journal of Applied Geophysics, 141, 13-23.
- [35] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2018. Doygun Betonların Statik ve Dinamik Elastik Parametrelerinin Karşılaştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(017201), 1181-1189.
- [36] Ekin, N. 2020. Betonların Elastik Modül Hesabında Poisson Oranının Önemi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6, 239-252.
- [37] Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., Girgin, C. 1999. Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil-Boyut Etkisi. Hazır Beton Dergisi, Ocak-Şubat, 40-50.

- [38] TS EN 12390-3. 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- [39] Neville A.M. 1997. Properties of Concrete. John Wiley&Sons, New York.
- [40] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2018. Determination of the Reinforced Concrete Strength by Apparent Resistivity depending on the Curing Conditions. Journal of Applied Geophysics, 155, 13-25.
- [41] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2020. Determination of Anisotropy of Reinforced Concretes by Using the Resistivity Method. Pamukkale Univ. Journal of Engineering Sciences, 26(3), 570-578.
- [42] Neville, A.M. 2011. Properties of Concrete. Pearson Education Limited, Essex.
- [43] Sabbağ, N., Uyanık, O. 2018. Determination of Reinforced Dry Concrete Strength by Electrical Resistivity Method. Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Derg. 24(6), 1230-1236.
- [44] Öziçer S., Uyanık O. 2017. Beton Dayanımının Yerinde P Dalga Hızından Belirlenmesi ve İzmir Örneği. SDU International Journal of Technological Sciences, 9(1), 1-16.
- [45] Ateş E., Uyanık O. 2019. Jeofizik Yöntemler ile Yer ve Yapı Etkileşimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23, 46-60.
- [46] Ateş E., Uyanık, O. 2025. Comparison of soil-Structure Interaction Obtained from Spectral Ratio Methods Applied to Earthquake and Microtremor Records. Journal of Applied Geophysics, 234, 105645.
- [47] Uyanık, O., Gördesli, F. 2013. Sismik Hızlardan Taşıma Gücünün İncelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 5(2), 78-86.
- [48] Uyanık, O., Ekin, N., Çoşkun O. 2021. Attenuation Relationship for Peak Horizontal Acceleration From Ground and Earthquake Parameters. Dokuz Eylül University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering, 23(68), 575-593.
- [49] Uyanık, O., Çatlıoğlu, B. 2014. Determination of Landslide Geometry by Using Electrical Resistivity and Seismic Refraction Methods. Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 18(3), 22-29.
- [50] Ates, E., Uyanık, O., 2023. Comparison of Acceleration Records Measured at Different Depths. Turk Deprem Arastirma Dergisi, 5(2), 215-232.
- [51] Uyanık, O., Öncü, Z., Uyanık, N.A., Ekin, N. 2024. Seismic Microzonation and Geotechnical Modeling Studies Considering Local Site Effects for İnegöl Plain (Bursa-Turkey). Earth and Space Science, 11(11), e2023EA003460.
- [52] Uyanık, N., Öncü, Z., Uyanık, O., Bozcu, M., Akkurt, İ., Günoğlu, K., Yağmurlu, F. 2015. Distribution of Natural Radioactivity from Radioelement in Volcanics of Sandıklı-Şuhut (Afyon) Area. Acta Physica Polonica A, 128(2B), B438-440.
- [53] Uyanık, N., Öncü, Z., Uyanık, O., Akkurt, İ. 2015. Determination of Natural Radioactivity from with Gamma-Ray Spectrometer in Dereköy-Yazır (Southwestern Anatolia). Acta Physica Polonica A, 128(2B), B441-442.
- [54] Uyanık, A.N., Uyanık, O., Akkurt, İ. 2013. Micro-Zoning of the Natural Radioactivity Levels and Seismic Velocities of Potential Residential Areas in Volcanic Fields: The Case of Isparta (Turkey). Journal of Applied Geophysics, 98, 191-204.
- [55] 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(8), 6003-6016.
- [56] Ekin N., Uyanık N. A., Uyanık O. 2023. The Effect of Reinforcement on Seismic Velocities in Low Strength Reinforced Concrete. Türk Deprem Arastirma Dergisi, 5(1), 33-47.
- [57] Hongyu, S., Zhang, J., Fan, T., Li, Z. 2015. Electrical Method to Evaluate Elastic Modulus of Early Age Concrete, Construction and Building Materials, 101(1), 661-666
- [58] Malhotra, V.M., Carino, N.J. 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press.
- [59] Najjar, M.F. Soliman, A.M. Nehdi, M.L. 2014. Critical Overview of Two-Stage Concrete: Properties and Applications. Constr. Build. Mater. 62, 47-58.
- [60] Saud, A. F., Abdelgader, H. S., El-Baden, A. S. 2014. Compressive and Tensile Strength of Two-Stage Concrete. Adv. Mater. Res., 893, 585-592.
- [61] He, S., Chen, C., Zhou, H., Jin, F. 2017. Current Research on Comprehensive Properties of Rock Filled Concrete. J. Hydroelectr. Eng., 36, 10-18.
- [62] Wang, H., M., J., Zhou, H., He, S., Jin, F. 2021. Mechanical Behavior of Rock-Filled Concrete With Uniaxial Compression. J Tsinghua Univ. (Sci Technol.), 6.
- [63] Telford, W. M., Geldart, L. P., Scheriff, R. E. 1993. Applied Geophysics. Cambridge University Press, London, 225s.
- [64] Uyanık, O., Şenli, G., Çatlıoğlu, B. 2013. Binaların Beton Kalitesinin Tahribatsız Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. SDÜ Uluslararası Teknoloji Bilimler Dergisi, 5(2), 156-165.
- [65] Uyanık, O., Çatlıoğlu, B. 2015. Determination of Density from Seismic Velocities. Jeofizik, 17, 3-15.

- [66] Uyanık, O. 2014. Klasik ve Jeofizik Yöntemlerle Yapı İncelemeleri (Yapı Jeofiziği). TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, JFMO Eğitim Yayınları No:19., ISBN:978-605-01-0643-5, 80s.
- [67] Uyanık, O. 2015. Deprem Ağır Hasar Alanlarının Önceden Belirlenmesi ve Şehir Planlaması için Makro ve Mikro Bölgelendirmelerin Önemi. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(2), 24-38.
- [68] Doğangün, A. 2002. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul. 17. Basım., 768s.
- [69] Chia, K.S., Zhang, M.H. 2002. Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete. Cement and Concrete Research, 32, 639-645.
- [70] Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. 2003. Concrete, 2nd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- [71] Mehta P.K., Monteiro, P.J.M. 2014. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill.
- [72] Tezcan, S.S., Keçeli, A., Özdemir, Z. 2010. Zemin ve Kayaçlarda Emniyet Gerilmesinin Sismik Yöntem ile Belirlenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi. 3(1), 1-10.

Theoretical Insight For The Diels-Alder Reaction Mechanism Between Pyrrole And Acrylonitrile

Aslı ÖZTÜRK KIRAZ* 

Pamukkale University, Faculty of Science, Department of Physics, Computational Physics Laboratory, 20030, Denizli, Türkiye

(Alınış / Received: 28.03.2025, Kabul / Accepted: 03.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Reaction mechanism,
Transition state,
Diels-Alder,
Thermal properties

Abstract: Diels Alder reactions are the best method used for the synthesis of various important molecules. In this study, the reaction mechanism between pyrrole and acrylonitrile, which can be an example of these reactions, is explained by DFT. Using the B3LYP method with the 6-31+G(d,p) basis set, chemical hardness, softness, electrophilicity index, electrochemical potential and thermodynamic properties were calculated. When we calculated these properties with solvents such as toluene, the gap between the HOMO and LUMO orbitals of the product formed as a result of the DA reaction was 9.53 eV in the gas phase, while it decreased to 6.49 eV in the toluene solvent environment. In addition, as a result of the calculations; thermodynamic parameters such as enthalpy, entropy and internal energy increased with increasing temperature, but the Gibbs free energy decreased.

Pirol Ve Akrilonitril Arasındaki Diels-Alder Reaksiyon Mekanizmasının Teorik Olarak İncelenmesi

Anahtar Kelimeler

Reaksiyon mekanizması,
Geçiş durumu,
Diels-Alder,
Thermal özellikler

Öz: Diels Alder reaksiyonları çeşitli önemli moleküllerin sentezinde kullanılan en iyi yöntemdir. Bu çalışmada bu reaksiyonlara örnek olabilecek pirol ve akrilonitril arasındaki reaksiyon mekanizması DFT ile açıklanmıştır. 6-31+G(d,p) baz setli B3LYP yöntemi kullanılarak kimyasal sertlik, yumuşaklık, elektrofiliklik indeksi, elektrokimyasal potansiyel ve termodinamik özellikler hesaplanmıştır. Bu özellikleri tolüen gibi çözücülerle hesapladığımızda DA reaksiyonu sonucu oluşan ürünün HOMO ve LUMO orbitalleri arasındaki boşluk gaz fazında 9,53 eV iken, tolüen çözücü ortamında 6,49 eV'ye düşmüştür. Ayrıca hesaplamalar sonucunda; entalpi, entropi ve iç enerji gibi termodinamik parametreler artan sıcaklıkla artmış, ancak Gibbs serbest enerjisi azalmıştır.

1. Introduction

The Diels-Alder cycloaddition (DA)[1] is a highly effective reaction for forming new carbon-carbon bonds, making constituting a crucial method in the synthesis of various compounds, including pharmaceuticals, macromolecules, and self-healing materials [2-8]. This reaction occurs between a conjugated diene and an alkene, referred to as a dienophile, resulting in a cyclic compound, typically a six-membered ring. While considerable research has been conducted on the DA reaction, its mechanism remains somewhat contentious. In a DA reaction, these two reactants undergo a [4 + 2] cycloaddition mechanism, converting one π bond into two σ bonds

[9]. Developed by Otto Diels and Kurt Alder in 1928, this reaction is now regarded as one of the most reliable methodologies in organic chemistry. The DA reaction continues to hold substantial importance as significant today as it was 50 years ago, particularly in synthesizing biologically active natural products [10]. It is prized for its efficiency and precision in controlling stereochemistry, establishing itself as an indispensable tool for organic chemists aiming to streamline the synthesis of complex molecular structures [11-12]. Its extensive applicability in organic synthesis, and its complex mechanistic aspects, position the DA reaction as a vital area for ongoing research and innovative development [13-16]. The reaction may proceed in one or two steps,

*Corresponding author: aslio@pau.edu.tr

depending on the symmetry of the orbitals involved and geometric constraints. The one-step pathway simultaneously forms two carbon-carbon bonds, whereas the two-step mechanism allows for a more gradual formation [17-19].

Pyrrole is a heteroaromatic molecule known for its electron-rich characteristics. It features a five-membered ring that includes one nitrogen atom and four carbon atoms. In contrast, acrylonitrile is a colorless, volatile, and flammable organic compound with a mildly pungent odor. Recent studies have examined the DA reaction involving acrylonitrile and pyrrole [20-22] as shown in Figure 1. Notably, this reaction can be conducted on a microscale without significantly lowering the yields. The application of the In materials engineering, the Diels-Alder reaction is not a novel field of study, it encompasses a broad range of fields, including synthetic chemistry, pharmaceuticals, and biomedical research [23].

The purpose of this study is to use computational techniques to examine the mechanism of reaction between these two compounds. In both the gas phase and the toluene solution, calculations were carried out using density functional theory (DFT). The strong hydrogen-bonding solvent trifluoroethanol has been shown to speed up the Diels-Alder reactions [24], possibly at speeds similar to those of water. DFT is employed to clarify the interactions between the diene and the dienophile [25]. Recognized for its ability to provide accurate results for both organic and inorganic systems, DFT is well-suited for examining the Diels-Alder reaction. However, it is still uncertain whether the anticipated product will result from the reaction, as there is currently no established method to predict the formation of the product.

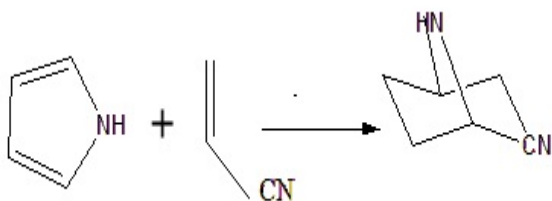


Figure 1. Reaction of pyrrole with acrylonitrile

2. Material and Method

Gaussian 16 [26] was used for the calculations and design of the molecules for this work [27] and GaussView 6.0 was also used for visualization of the structures [28]. Initially, optimization was performed using the 6-31+G (d,p) basis set and DFT with the CAM-B3LYP method [29]. To investigate the effect of solvent on chemical reaction, toluene was employed as a solvent around the bond in calculations utilizing the IEFPCM (Integral Equation Formalism Polarizable Continuum Model) model [30].

Furthermore, chemical hardness (η) and chemical softness from energies of frontier molecular orbitals were calculated by using the following equations [31].

$$\text{Chemical hardness } (\eta) = \frac{E_{LUMO} - E_{HOMO}}{2}$$

$$\text{Chemical softness } S = \frac{1}{2\eta}$$

$$\text{Electrophilicity index } (\mu) = \frac{E_{LUMO} + E_{HOMO}}{2}$$

$$\text{Electronic chemical potential } (\omega) = \frac{\mu^2}{2\eta}$$

3. Results

The optimized geometry of the reactants, product, and transition state are shown in Figure 2, Figure 3, and Figure 4.

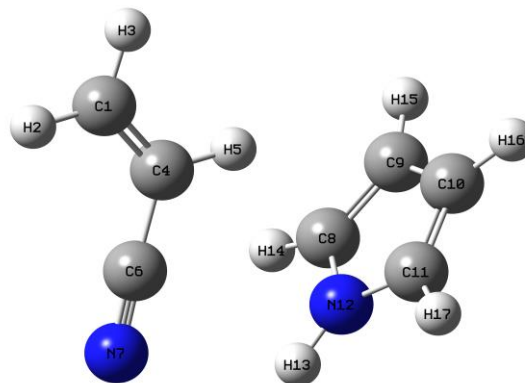


Figure 2. Structure of reactants with numbering and labels.

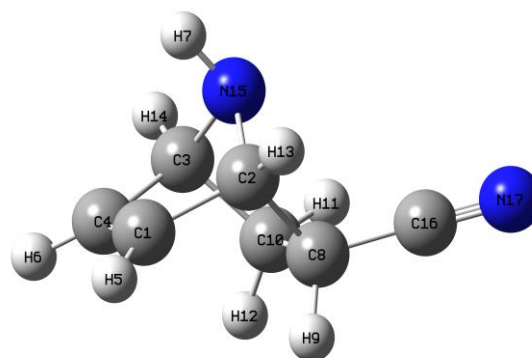


Figure 3. Structure of product with numbering and labels.

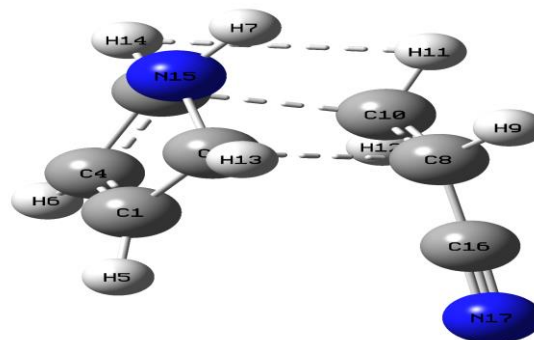


Figure 4. Structure of the transition state with numbering and labels.

3.1. Dipole moment

The dipole moment is a crucial indicator of whether a reaction is proceeding in the correct direction [32]. Specifically, if the dipole moment of the transition state is greater than that of the reactants, it suggests that the reaction pathway is valid, conversely, if it is not, the pathway may not be viable [33]. In the cycloaddition reaction between pyrrole and acrylonitrile, a transition state (TS) is defined as the highest energy unstable intermediate structure that reactants pass through before turning into products during a chemical reaction is generated. The dipole moment of TS measures 5.6 D, which exceeds those of pyrrole (1.9 D) and acrylonitrile (3.9 D). This observation indicates that the transition state is unstable, and the reaction is likely to proceed. Furthermore, a closer examination of the reaction mechanism reveals that the C8 and C11 atoms of pyrrole approach the C1 and C4 atoms of acrylonitrile to form a product as illustrated in Figure 1 [31]. The Gibbs free energy of all structures relative to the reactants is depicted in Figure 5.

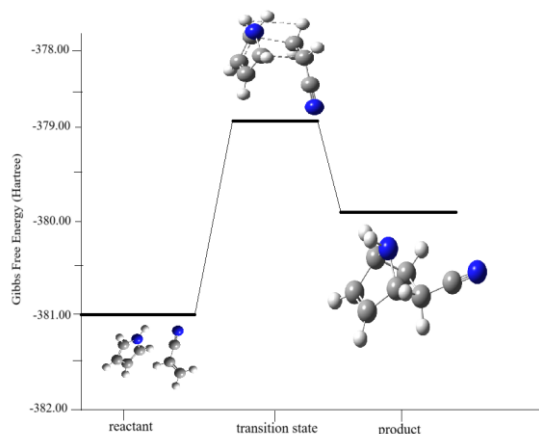


Figure 5. Examining the variations in Gibbs Free Energy among the components of a chemical reaction.

During the reaction, the reaction coordinates change, resulting in the formation of various transition states. When pyrrole and acrylonitrile react, they reach a transition state (TS) that represents the highest energy point in the entire reaction mechanism. If the energy of the products is lower than that of the reactants, a stable product is formed, where the energy is below that of the TS. Ultimately, the reaction yields a product, which possesses an energy lower than that of the reactants.

3.2. Thermodynamics analysis

Thermodynamic properties offer valuable insights into the spontaneity of chemical reactions and the stability of their products [34]. In particular, the reaction between pyrrole and acrylonitrile is exothermic [35]. As shown in Table 1, Table 2, and Table 3, the enthalpy [36], entropy [37], internal energy [37], and heat capacity [37] all rise as the

temperature increases from 0 to 300 K, while Gibbs free energy [38] falls. This pattern suggests that raising the temperature is detrimental to this exothermic reaction. The two reactants have in fact reacted, as evidenced by the overall negative energy change and the observed decrease in Gibbs free energy across different states, which points to the formation of an adduct [39]. At 10 K and 300 K, respectively, the reactants' Gibbs free energy is -380.97859 and -381.01736, demonstrating that Gibbs free energy falls with increasing temperature. The formation of a stable product is indicated by the product's Gibbs free energy being higher than the reactants' [40]. The reaction is spontaneous and can happen on its own because the reactants' Gibbs free energy is greater than the products', as shown in Figure 6.

Internal energy, enthalpy, entropy, and heat capacity at constant volume (C_v) are among the other parameters that have been examined. As the graphs in Figure 6 illustrate, these parameters show that all thermodynamic properties increase with temperature while Gibbs free energy decreases. The graphs that accompany the reaction show how temperature affects the reactants, intermediates, and products. Tables 1, 2, 3, 4, and 5 provide specific information on how temperature affects thermodynamic parameters for each step. Gibbs free energy continuously falls with increasing temperature, as shown in Figure 5, even though internal energy, enthalpy, and entropy all rise.

3.3. Electrostatic potential surfaces

The chemical reactivity of molecules can be inferred from their molecular electrostatic potential [40]. The self-consistent field (SCF) method [41] is used to calculate molecular electrostatic potential surfaces (ESP) [42] to describe the process of electron transfer during chemical reactions. The electron density and its quantity are indicated by the ESP in the regions where it is present [41]. It displays the separation between positive charges and electrons. Areas that are green and yellow indicate weak electrophile sites. One can determine which sites of a molecule are most electrophilic and nucleophilic by using a DFT [43] technique. Electrostatic potential increases from red to yellow to green to blue. Different densities are represented by different colors on these maps, which show the regions of electron densities in molecules [44]. Acrylonitrile's carbon atoms C8 and C10 migrate in the direction of pyrrole's carbon atoms C2 and C3 during the reaction. The region surrounding the nitrogen atom in acrylonitrile is recognized as an electron-rich site in the ESP of these two compounds, as shown in Figure 6.

Table 1. Calculated thermodynamic values of reactants by DFT/CAM-B3LYP/6-31+G(d,p)

Tem (K)	C _v (cal/mol-K)	U (Hartree)	H (Hartree)	S (cal/mol-K)	G (Hartree)
10	7.016	-380.977	-380.9779	43.044	-380.978
50	15.657	-380.977	-380.9769	64.232	-380.9821
100	18.450	-380.975	-380.9754	77.425	-380.9878
150	21.037	-380.974	-380.9737	86.174	-380.9943
200	24.596	-380.972	-380.9717	93.262	-381.0014
250	28.943	-380.970	-380.9694	99.650	-381.0091
300	33.615	-380.966	-380.9668	105.701	-381.0173

Table 2. Calculated thermodynamic values of the product by DFT/B3LYP/6-311G(d,p)

Tem (K)	C _v (cal/mol-K)	U (Hartree)	H (Hartree)	S (cal/mol-K)	G (Hartree)
10	5.962	-380.660	-380.6602	41.545	-380.6609
50	7.320	-380.659	-380.6597	54.804	-380.6641
100	9.949	-380.659	-380.6589	62.062	-380.6688
150	13.034	-380.658	-380.6578	67.459	-380.6739
200	16.987	-380.657	-380.6564	72.300	-380.6795
250	21.763	-380.655	-380.6547	77.034	-380.6854
300	26.989	-380.653	-380.6526	81.823	-380.6918

Table 3. Calculated thermodynamic values of the transition state of DA reaction by DFT/CAM-B3LYP/6-31+G(d,p)

Tem (K)	C _v (cal/mol-K)	U (Hartree)	H (Hartree)	S (cal/mol-K)	G (Hartree)
10	5.62	-379.920	-379.9202	41.638	-379.9209
50	7.919	-379.919	-379.9197	55.220	-379.9241
100	11.246	-379.919	-379.9187	63.096	-379.9288
150	14.938	-379.918	-379.9175	69.142	-379.9341
200	19.281	-379.916	-379.9160	74.589	-379.9398
250	24.208	-379.914	-379.9141	79.856	-379.9459
300	29.363	-379.912	-379.9118	85.088	-379.9525

3.4. Electronic properties

Frontier molecular orbitals offer essential insights into the reactivity of molecules and reactants [43], as well as their electron-donating and electron-accepting capabilities. As a result, we calculated the HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) energy levels and energy gaps for all relevant structures. When kinetic stability and energy gaps are high, the reaction tends to be less reactive, conversely, lower values indicate a more reactive nature [45]. Our findings presented in Table 4 indicate that the HOMO-LUMO energy gap for the transition state (TS) is 3.07 eV, which is notably lower than the gaps observed for the reactants and products. This suggests that the transition state is highly reactive and unstable. If the HOMO of acrylonitrile interacts with the LUMO of pyrrole, the reaction is classified as inverse electron demand [46]. On the other hand, if the HOMO of pyrrole interacts with the LUMO of acrylonitrile, the reaction is considered normal electron demand. The energy values derived from frontier molecular orbitals (FMOs) are instrumental in determining the type of reaction taking place. The energy gap between the HOMO of acrylonitrile and the LUMO of pyrrole was

found to be 11.33 eV. In a similar calculation, the gap between the LUMO of acrylonitrile and the HOMO of pyrrole yielded a value of 7.31 eV. The difference in energy gap between the HOMO of pyrrole and the LUMO of acrylonitrile is comparatively smaller than the others, confirming that this reaction is of normal electron demand.

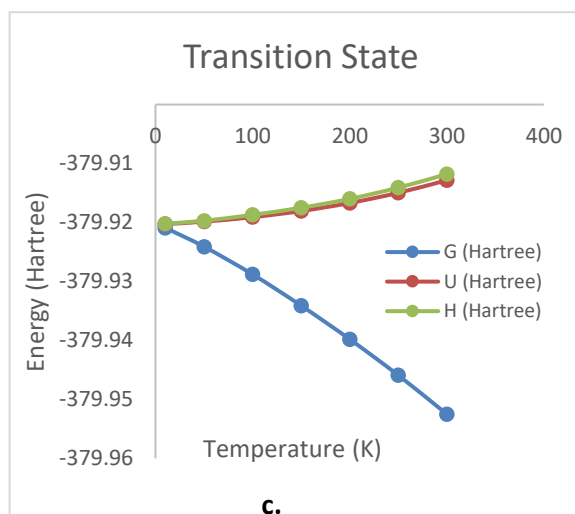
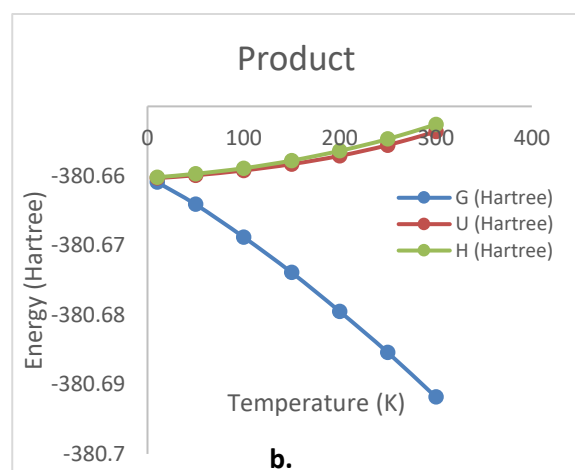
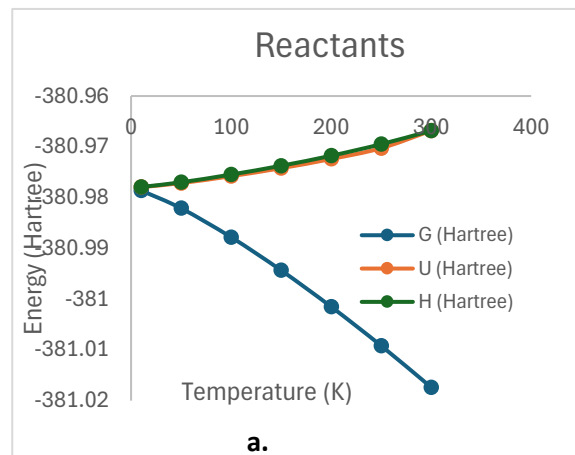


Figure 6. Graph **a.** represent the effect of temperature on reactants, **b.** represent product, **c.** represent transition state.

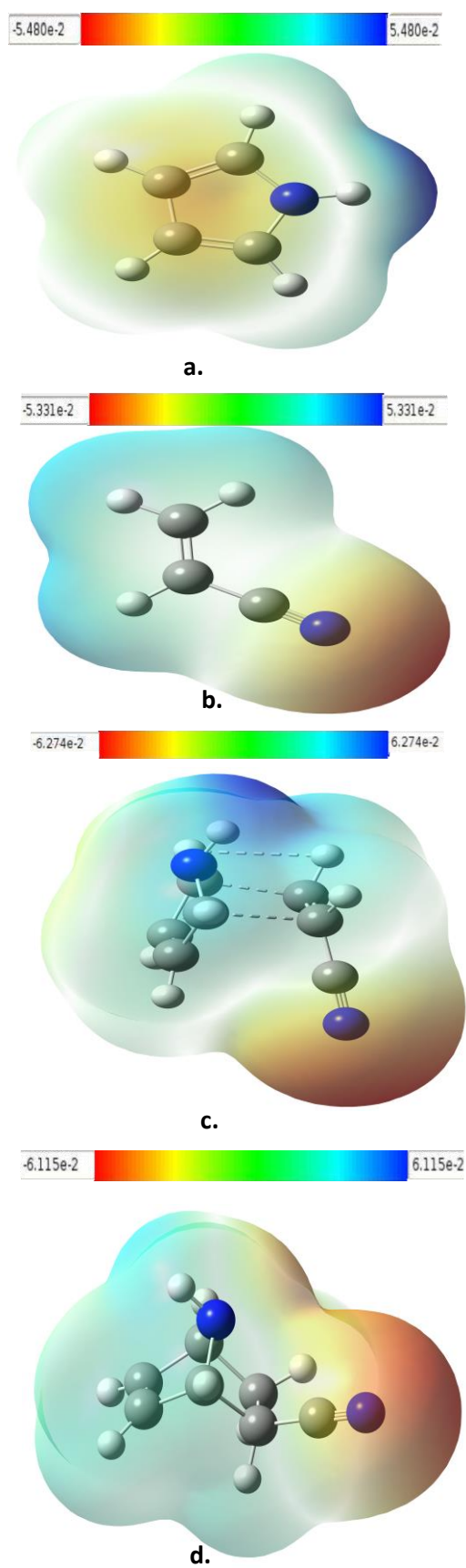


Figure 7. ESP of **a.** pyrrole **b.** acrylonitrile **c.** transition state of the DA reaction **d.** product.

Table 4. HOMO-LUMO energy gap in gas phase calculated by method DFT/CAM-B3LYP/6-31+G(d,p)

Parameters	acrylonitrile		pyrrole		reactants		product		ts	
	gas	toluen	gas	toluen	gas	toluen	gas	toluen	gas	toluen
E_{HOMO} (eV)	-9.46	-9.58	-7.39	-7.45	-6.00	-5.56	-8.22	-8.07	-5.28	-5.50
E_{LUMO} (eV)	-0.08	-1.69	1.87	-2.37	-1.70	-1.56	1.31	-1.587	-2.21	-1.12
$\Delta E = E_{\text{LUMO}} - E_{\text{HOMO}}$ (eV)	9.38	7.89	9.26	5.08	4.30	3.99	9.53	6.49	3.07	4.38
I (ionization potential) (eV)	9.46	9.58	7.39	7.45	6.00	5.56	8.22	8.07	5.28	5.50
A (electron affinity) (eV)	0.08	1.69	-1.87	2.37	1.70	1.56	-1.31	1.58	2.21	1.12
χ (electronegativity) (eV)	4.77	5.64	2.75	4.91	3.85	3.56	3.46	4.83	3.74	3.31
η (global hardness) (eV)	4.69	3.94	4.63	2.54	2.15	1.99	4.77	3.24	1.54	2.19
S (global softness) (eV^{-1})	0.21	0.25	0.21	0.39	0.46	0.50	0.21	0.31	0.65	0.46
μ (electronic chemical potential) (eV)	-4.77	-5.64	-2.75	-4.91	-3.85	-3.56	-3.46	-4.83	-3.74	-3.31
ω (global electrophilicity index) (eV)	2.42	4.03	0.82	4.74	3.44	3.18	1.25	3.59	4.56	2.50

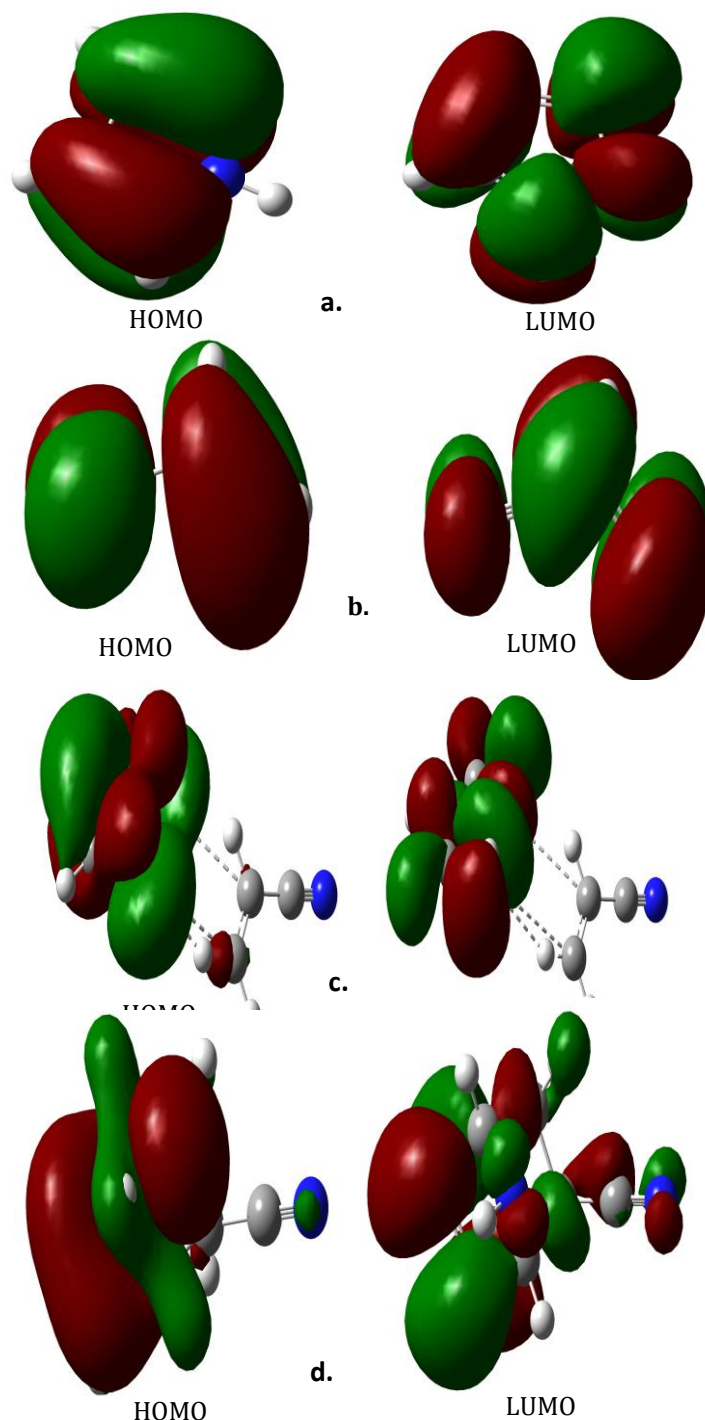


Figure 8. HOMO-LUMO of the **a.** pyrrole **b.** acrylonitrile **c.** transition state **d.** product

It is also observed that the energy gaps for the transition states are consistently lower than those of the reactants and products [47]. The electrophilicity index serves as a measure of a molecule's ability to accept electrons. In this case, because the electrophilicity index value of acrylonitrile exceeds that of pyrrole, acrylonitrile functions as the electrophile. The impact of the solvent on the rate of reaction is investigated using Density Functional Theory (DFT) alongside the Integral Equation Formalism Polarizable Continuum Model (IEFPCM). Our results demonstrate that using toluene as a solvent significantly lowers the activation energy barrier, suggesting an enhanced reaction rate compared to other solvents. This insight is important for optimizing conditions in chemical reactions. The configurations of the HOMO-LUMO orbitals of the reactants, product, and transition state are presented in Figure 8.

4. Discussion and Conclusion

This study shows that for temperature changes ranging from 0 to 300 K, the following thermodynamic quantities significantly increase: enthalpy, internal energy, and heat capacity. However, over this temperature range, Gibbs free energy decreases. This overall increase in these quantities and the concomitant decrease in Gibbs free energy imply that raising the temperature is detrimental to the forward reaction of this exothermic reaction, influencing overall feasibility and efficiency. The reaction products between pyrrole and acrylonitrile have stable structures, which can be inferred from the enormous gap between HOMO and LUMO energies of the resultant products. In addition, these products possess thermodynamic stability. A stable product is formed when the Gibbs free energy of the product is lower than that of the reactants. The toluene solvent exerts a major influence on the reaction rate. Our findings demonstrate that toluene effectively reduces the activation energy barrier compared to other solvents, leading to a markedly increased reaction rate. This understanding is vital for optimizing the milieu of chemical reactions. Such computations are a useful guide for real-world research undertakings.

Acknowledgments

The author would like to thank the TUBITAK/ULAKBIM clusters for their assistance in performing some computations and Pamukkale University, Grand ID: 2018FEBE002 and Dr. Aykut Demirçali for his support.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the

actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Diels, O., Alder, K. 1928. Synthesen in Der Hydroaromatischen Reihe. *Leibigs Ann. Chem.* 460, 98–122.
- [2] Tasdelen, M. A. 2011. Diels–Alder “click” Reactions: Recent Applications in Polymer and Material Science. *Polym. Chem.* 2, 2133–2145.
- [3] Heravi, M. M., Ahmadi, T., Ghavidel, M., Heidari, B., Hamidi, H. 2015. Recent Applications of the Hetero Diels–Alder Reaction in the Total Synthesis of Natural Products. *RSC Adv.* 5, 101999 – 102075.
- [4] Nicolaou, K. C., Snyder, S. A., Montagnon, T., Vassilikogiannakis, G. 2002. The Diels - Alder Reaction in Total Synthesis. *Chem., Int. Ed.* 41, 1668.
- [5] Kappe, C. O., Murphree, S. S., Padwa, A. 1997. Synthetic Applications of Furan Diels-Alder Chemistry. *Tetrahedron* 53, 14179–14233.
- [6] Funel, J.-A., Abele, S. 2013. Industrial Applications of the Diels-Alder Reaction. *Angew. Chem., Int. Ed.* 52, 3822–3863.
- [7] Peterson, A. M., Jensen, R. E., Palmese, G. R. 2010. Room-Temperature Healing of a Thermosetting Polymer Using the Diels-Alder Reaction. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2, 1141–1149.
- [8] Zeng, C., Seino, H., Ren, J., Hatanaka, K., Yoshie, N. 2013. Bio-Based Furan Polymers with Self-Healing Ability. *Macromolecules*, 46, 1794–1802.
- [9] U. Rehman, A. Mansha, M. Zahid, S. Asim, A.F. Zahoor, Z.A. Rehan, 2022. Quantum mechanical modeling unveils the effect of substitutions on the activation barriers of the Diels-Alder reactions of an antiviral compound 7H-benzo [a] phenalene, *Struct. Chem.* 1–14.
- [10] B.S. Bodnar, M.J. Miller, 2011. The nitrosocarbonyl hetero-Diels–Alder reaction as a useful tool for organic syntheses, *Angew. Chem. Int. Ed.* 50, 5630–5647.
- [11] D. McLeod, M. K. Thogersen, N. I. Jessen, K. A. Jorgensen, C. S. Jamieson, X.-S. Xue, K. Houk, F. Liu and R. Hoffmann. 2019. *Accounts of Chemical Research* 52, 3488.
- [12] J. S. Barber, M. M. Yamano, M. Ramirez, E. R. Darzi, R. R. Knapp, F. Liu, K. Houk, and N. K. Garg, 2018. *Nature Chemistry* 10, 953.

- [13] A. N. S. Chauhan, G. Mali, and R. D. Erande, 2022. *Asian Journal of Organic Chemistry* 11, e202100793.
- [14] M.-M. Xu, L. Yang, K. Tan, X. Chen, Q.-T. Lu, K. Houk, and Q. Cai, 2021. *Nature Catalysis* 4, 892.
- [15] Y. S. Zholdassov, L. Yuan, S. R. Garcia, R. W. Kwok, A. Boscoboinik, D. J. Valles, M. Marianski, A. Martini, R. W. Carpick, and A. B. 2023. *Braunschweig, Science* 380, 1053.
- [16] S. Chen, P. Yu, and K. Houk, 2018. *Journal of the American Chemical Society* 140, 18124.
- [17] Houk, K. N., Gonzalez, J., Li, Y. 1995. *Pericyclic Reaction Transition States: Passions and Punctilios, 1935–1995. Acc. Chem. Res.* 28, 81–90.
- [18] Houk, K. N., Li, Y., Evanseck, J. D. 1992. *Transition Structures of Hydrocarbon Pericyclic Reactions. Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* 31, 682–708.
- [19] Domingo, L. R., José Aurell, M., Pérez, P., Contreras, R. 2003. *Origin of the Synchronicity on the Transition Structures of Polar Diels-Alder Reactions. Are These Reactions [4 + 2] Processes? J. Org. Chem.,* 68, 3884–3890.
- [20] Xujian Chen, Chengcheng Wei, Min Xie, Yongjun Hu, 2023. *Single-Photon Ionization Induced New Covalent Bond Formation in Acrylonitrile(AN)–Pyrrole(Py) Clusters. J. Phys. Chem. A,* 127, 40, 8272–8279.
- [21] Cetiner, S., Kalaoglu, F., Karakas, H. et al. 2011. *Characterization of conductive poly(acrylonitrile-co-vinylacetate) composites: Matrix polymerization of pyrrole derivatives. Fibers Polym* 12, 151–158.
- [22] El-Aassar, M.R., Shibraen, M.H.M.A., Abdel-Fattah, Y.R. et al. *Functionalization of Electrospun Poly(Acrylonitrile-co-Styrene/Pyrrole) Copolymer Nanofibers for Using as a High-performance Carrier for Laccase Immobilization. Fibers Polym* 20, 2268–2279.
- [23] Gandini, A., Carvalho, A.J.F., Trovatti, E., Kramer, R.K. and Lacerda, T.M. 2018. *Eur. J. Lipid Sci. Technol., Macromolecular materials based on the application of the Diels–Alder reaction to natural polymers and plant oils,* 120, 1700091.
- [24] Dutt, G., Ghanty, T. 2003. *Rotational dynamics of nondipolar probes in ethanols: How does the strength of the solute-solvent hydrogen bond impede molecular rotation? J. Chem. Phys.* 119, 4768–4774.
- [25] Ali, M., Mansha A., Asim, S., Zahid, M., Usman, Ali, M. N. 2018. *DFT study for the spectroscopic and structural analysis of p-dimethylamino azobenzene, J. Spectrosc.* 2018, 9365153, 15 pages.
- [26] Frisch, M.J., Trucks, G.W., Schlegel, H.B., Scuseria, G.E., Robb, M.A., Cheeseman, J.R.; Scalmani, G.; Barone, V.; Petersson, G.A.; Nakatsuji, H.; Li, X.; Caricato, M.; Marenich, A.V.; Bloino, J., Janesko, B.G., Gomperts, R., Mennucci, B., Hratchian, H.P., Ortiz, J.V., Izmaylov, A.F., Sonnenberg, J.L., Williams-Young, D., Ding, F., Lipparini, F., Egidi, F., Goings, J., Peng, B., Petrone, A., Henderson, T., Ranasinghe, D., Zakrzewski, V.G., Gao, J., Rega, N., Zheng, G., Liang, W., Hada, M., Ehara, M., Toyota, K., Fukuda, R., Hasegawa, J., Ishida, M., Nakajima, T., Honda, Y., Kitao, O., Nakai, H., Vreven, T., Throssell, K., Montgomery Jr., J.A., Peralta, J.E., Ogliaro, F., Bearpark, M.J., Heyd, J.J., Brothers, E.N., Kudin, K.N., Staroverov, V.N., Keith, T.A., Kobayashi, R., Normand, J., Raghavachari, K., Rendell, A.P., Burant, J.C., Iyengar, S.S., Tomasi, J., Cossi, M., Millam, J.M., Klene, M., Adamo, C., Cammi, R., Ochterski, J.W., Martin, R.L., Morokuma, K., Farkas, O., Foresman, J.B., Fox, D.J. 2016. *Gaussian 16, Revision B.01, Gaussian, Inc., Wallingford CT.*
- [27] C. Barros, P. De Oliveira, F. Jorge, A. Canal Neto, M. Campos, 2010. *Gaussian basis set of double zeta quality for atoms Rb through Xe: application in non-relativistic and relativistic calculations of atomic and molecular properties, Mol. Phys.* 108, 1965–1972.
- [28] Dennington, R. Keith, T., Millam, J. *GaussView, Version 6. Semichem Inc., Shawnee Mission, KS, 2016.*
- [29] Jahantigh, F., Ghorashi, S.B., Belverdi, A.R. 2018. *A first principle study of benzimidazobenzophenanthroline and tetraphenyldibenzoperiflanthene to design and construct novel organic solar cells, Phys. B Condens. Matter* 542, 32–36.
- [30] Zheng, S., Geva, E., Dunietz, B.D. 2013. *Solvated charge transfer states of functionalized anthracene and tetracyanoethylene dimers: a computational study based on a range separated hybrid functional and charge constrained self-consistent field with switching Gaussian polarized continuum models, J. Chem. Theory Comput.* 9, 1125–1131.
- [31] Hussain, R., Saeed, M., Mehboob, M.Y., Khan, S.U., Khan, M.U., Adnan, M., Ahmed, Iqbal, M. J., Ayub, K.J.R. 2020. *Density functional theory study of palladium cluster adsorption on a graphene support, 10, 20595-20607.*

- [32] B. Champagne, E.A. Perp`ete, D. Jacquemin, S.J. Van Gisbergen, E.-J. Baerends, C. Soubra-Ghaoui, K.A. Robins, B. Kirtman. 2000. Assessment of conventional density functional schemes for computing the dipole moment and (hyper) polarizabilities of push-pull π -conjugated systems, *Chem. A Eur. J.* 104 4755-4763.
- [33] Best, R.B., Hummer, G. 2005. Reaction coordinates and rates from transition paths, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 6732-6737.
- [34] Ren, S.-J., Wang, C.-P., Xiao, Y., Deng, J. Tian, Y., Song, J.-J., Cheng, X.-J., Sun, G.-F. 2020. Thermal properties of coal during low temperature oxidation using a grey correlation method, *Fuel* 260, 116287.
- [35] DeBoef, B.L. 2003. Novel rhodium catalyzed [4+ 2] and [4+ 2+ 2] cyclization reactions: New methods for the synthesis of six and eight-membered rings, Washington University in St. Louis.
- [36] Torres, F.E., Kuhn, P., Bruyker, Bell, D. De A.G., Wolkin, M.V., Peeters, E. Williamson, J.R., Anderson, G.B., Schmitz, G.P., Recht, M.I. 2004. Enthalpy arrays, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 9517-9522.
- [37] Bein, B. 2006. Entropy, *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 20, 101-109.
- [38] Jia, C.-S., Zhang, L.-H., Peng, X.-L., Luo, J.-X. Y.-L. Zhao, J.-Y. Liu, J.-J. Guo, L.- D. Tang, 2019. Prediction of entropy and Gibbs free energy for nitrogen, *Chem. Eng. Sci.* 202, 70-74.
- [39] Zuo, R. Zhang, H., Wang, B.-L. Meng, S.-C. Chen, P., Zhang, R. 2016. Quantum chemistry study on the adduct reaction paths as functions of temperature in GaN/AlN MOVPE growth, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 5, P667.
- [40] Chakraborty, A., Saha, B.B. Ng, K.C., Koyama, S. Srinivasan, K.J.L. 2009. Theoretical insight of physical adsorption for a single-component adsorbent+ adsorbate system: I. Thermodynamic property surfaces, 25, 2204-2211.
- [41] Bayoumy, A.M., Ibrahim, M. Omar. A. 2020 Mapping molecular electrostatic potential (MESP) for fulleropyrrolidine and its derivatives, *Opt. Quant. Electron.* 52, 1-13.
- [42] Prabavathi, N., Nilufer, A., Krishnakumar, B. 2013. Spectroscopy, Vibrational spectroscopic (FT-IR and FT-Raman) studies, natural bond orbital analysis and molecular electrostatic potential surface of Isoxanthopterin, 114 101-113.
- [43] Obot, I., Macdonald, D. Gasem, Z. 2015. Density functional theory (DFT) as a powerful tool for designing new organic corrosion inhibitors. Part 1: an overview, *Corros. Sci.* 99, 1-30.
- [44] Akinpelu, O.I., Lawal, M.M., Kumalo, H.M. Mhlongo, N.N.J.o.B.S.m2022. Dynamics, Computational studies of the properties and activities of selected trisubstituted benzimidazoles as potential antitubercular drugs inhibiting MTB-FtsZ polymerization, 40 1558-1570.
- [45] H. Zhang, H. Zhao, X. Wang, Y. Shang, B. Han, Z.J.J.o.m.m. Li, 2014. Theoretical study on the mechanisms of polyethylene electrical breakdown strength increment by the addition of voltage stabilizers, 20, 1-11.
- [46] Rohling, R.Y., Tranca, I.C. E.J. Hensen, E.A.J.A.c. Pidko, 2018. Mechanistic Insight into the [4+ 2] Diels-Alder Cycloaddition over First, Row d-Block Cation-Exchanged Faujasites 9, 376-391.
- [47] Bendikov, M. Wudl, F. D.F.J.C.r. Perepichka, 2004. Tetrathiafulvalenes, oligoacenenenes, and their buckminsterfullerene derivatives: The brick and mortar of organic electronics, 104. 4891-4946.

Dizel Motorlarda Silindir İçi Basıncı Tahmini için Veri Odaklı Makine Öğrenimi Modellerinin Performans Analizi

Ahmet KARAOĞLU¹ , Hüseyin SÖYLER^{*2} 

¹ Sinop Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 57000, Sinop, Türkiye

² Sinop Üniversitesi, Gerze Meslek Yüksek okulu, Ulaştırma Hizmetleri, 57600, Sinop, Türkiye

(Alınış / Received: 20.01.2025, Kabul / Accepted: 16.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Dizel motor silindir içi basınç tahmini, XGBoost, Karar Ağacı, Random Forest, Makine öğrenmesi

Öz: Bu çalışma, dizel motorlarda silindir içi basınç tahmini için veri odaklı makine öğrenimi yaklaşımlarının performansını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Krank açısı ve yük değişkenlerine dayalı bir veri seti kullanılarak, Random Forest, Karar Ağacı ve XGBoost algoritmaları değerlendirilmiştir. Modellerin doğruluk oranları, işlem süreleri ve hata metrikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar, Random Forest ($R^2 = 0.9999$) modelinin genelleme başarısı ve düşük hata oranları ile en iyi performansı sergilediğini göstermiştir. Karar Ağacı modeli de benzer şekilde yüksek doğruluk ($R^2 = 0.9999$) sunmasına rağmen genelleme yeteneği sınırlı kalmıştır. XGBoost modeli ise hızlı tahmin yeteneği ile dikkat çekerken, $R^2 = 0.9990$ ile hafif doğruluk kayıpları sergilemiştir. Bu modeller, emisyon kontrolü ve motor verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalarda kullanılabilir güçlü tahmin araçları sunmaktadır. Elde edilen bulgular, veri odaklı yaklaşımların, dizel motorların performans ve emisyon analizinde güvenilir ve etkili bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Performance Analysis of Data-Driven Machine Learning Models for In-Cylinder Pressure Prediction in Diesel Engines

Keywords

Diesel engine in-cylinder pressure prediction, Artificial neural networks, XGBoost, Random Forest, Machine learning

Abstract: This study aims to compare the performance of data-driven machine learning approaches for in-cylinder pressure prediction in diesel engines. Using a dataset based on crank angle and load variables, Random Forest, Decision Tree and XGBoost algorithms are evaluated. Accuracy rates, processing times and error metrics of the models are analysed in detail. The results showed that the Random Forest model ($R^2 = 0.9999$) performed the best with generalisation success and low error rates. Similarly, the Decision Tree model also showed high accuracy ($R^2 = 0.9999$), but its generalisation ability was limited. The XGBoost model, on the other hand, was notable for its fast prediction capability, but exhibited slight accuracy losses with $R^2 = 0.9990$. These models provide powerful predictive tools that can be used in emission control and engine efficiency improvement studies. The findings suggest that data-driven approaches offer a reliable and effective alternative for performance and emission analysis of diesel engines.

1. Giriş

Dizel motorlar, günümüzde özellikle kara ve deniz taşımacılığında yaygın olarak kullanılmakta olup, enerji verimliliği ve dayanıklılık açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu motorların performans analizi, yanma odasında oluşan silindir basıncı verilerinin detaylı incelenmesiyle sağlanmaktadır [1]. Silindir

basıncı, motorun verimliliğini, yanma etkinliğini ve emisyon özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu bağlamda, krank açısına bağlı olarak silindir içinde oluşan basıncı tahmin etmek, yanma sürecinin dinamiklerinin anlaşılmasında önemli bir adımdır.

Silindir içi basıncın doğru tahmini, motor performansını optimize etmek, emisyonları azaltmak ve dizel motorlarda gelişmiş yanma kontrol stratejileri uygulamak için çok önemlidir. Silindir içi basınç doğrudan sensörlerle ölçülebilse de bu ölçüm yöntemi çeşitli sınırlamalara sahiptir. Yüksek çözünürlüklü basınç sensörleri hem yüksek maliyetlidir hem de motorun çalışması esnasında fiziksel olarak zor koşullarda kalmaları nedeniyle zamanla bozulabilmektedir. Ayrıca, her silindire ayrı bir sensör yerleştirmek çoğu durumda ekonomik ve yapısal olarak mümkün değildir. Özellikle çok sayıda motorun aynı anda izlenmesi gereken test ortamlarında bu yaklaşım pratikliğini yitirmektedir. Bu bağlamda, krank açısı ve yük gibi doğrudan ölçülebilir parametreler kullanılarak silindir basıncının makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi, hem gerçek zamanlı izleme hem de maliyet etkinliği açısından güçlü bir alternatif sunmaktadır [2].

Araştırmacılar ek sensörler olmadan silindir içi basıncı tahmin etmek için çeşitli dolaylı yöntemler geliştirmişlerdir [3]. Bu yaklaşımlar arasında krank mili kinematikini kullanan model tabanlı teknikler, ivmeölçer ölçümleri ve yarı ampirik modeller yer almaktadır. Krank mili tabanlı yöntemler, ölçülen krank açısı ve tek bir basınç sensöründen silindir basınçlarını yeniden yapılandırmak için esnek krank mili modellerini ve adaptasyon algoritmalarını kullanır [2], [3], [4], [5]. İvmeölçer tabanlı teknikler, basıncı tahmin etmek için ivme sinyalinin yanma ve yanma dışı bileşenlerini ayırır. Yarı ampirik modeller, basınç izlerini tahmin etmek için politropik sıkıştırma varsayımlarını ısı salınım fonksiyonları ile birleştirir.

Kademeli enjeksiyon, yakıtın tek seferde değil, farklı zaman dilimlerinde püskürtülmesiyle yanma sürecini kontrol altına almayı amaçlayan bir tekniktir. Ancak bu strateji, tahmin modellerinin doğruluğunu zorlaştırmaktadır. Emisyon yönetmelikleri daha katı hale geldikçe, sağlam silindir içi basınç tahmini dizel motor performansını ve verimliliğini optimize etmede giderek daha önemli bir rol oynayacaktır [6].

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, kalibrasyon ve hesaplama gereksinimleriyle ilgili zorlukları ele alarak motorlarda silindir içi basıncı tahmin etmek için geleneksel termodinamik modellere alternatifler araştırmıştır. Veri odaklı yaklaşımlar, özellikle de yapay sinir ağları (YSA'lar), silindir basıncını doğru bir şekilde tahmin etme konusunda umut vaat etmektedir. Bu modeller, belirli parametreler için doğruluk ve hesaplama süresi açısından termodinamik simülasyonlardan daha iyi performans gösterebilir [7], [8]. Bununla birlikte, termodinamik tabanlı modeller, bazılarının çeşitli motor parametrelerine karşı hassasiyetler içermesiyle birlikte geçerliliğini korumaktadır [9]. Emisyon tahmini için silindir içi basınç ölçümlerini kullanan gerçek zamanlı uygulanabilir modeller geliştirilmiştir [10]. Araştırmacılar ayrıca simülasyonların otomatik kalibrasyonu için yöntemler ve parametre tahmin

stratejileri önermişlerdir [11], [12]. Çevrimiçi pilot kütle tahmini için sanal sensörler ve basınç tahmini için derin öğrenme yaklaşımları gibi gelişmiş teknikler bu alanda devam eden gelişimi göstermektedir [13], [14].

Son çalışmalar, motorlarda silindir basıncını tahmin etmek için doğruluk ve hesaplama verimliliğinde potansiyel iyileştirmeler sunan veri odaklı yaklaşımları araştırmıştır. Regresyon modelleri, sinir ağları ve zaman serisi analizleri dahil olmak üzere çeşitli makine öğrenimi teknikleri uygulanmıştır. Yapay Sinir Ağları (YSA), silindir basıncını yüksek doğrulukla tahmin etmede umut verici sonuçlar göstermiştir [15], [16]. Ayrıca makine öğrenimine dayalı regresyon modelleri, mühendislik alanlarının yanı sıra, tıp gibi farklı disiplinlerde de başarılı sonuçlar vermektedir [17], [18]. Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) modelleri, silindir basıncının zaman serisi tahmininde etkili olduğunu göstermiştir [19]. Frekans Tepki Fonksiyonları ve Evrimsel Sinir Ağları (CNN) sırasıyla krank mili hızı dalgalanmalarından ve basınç ölçümlerinden silindir basıncını tahmin etmek için kullanılmıştır [20], [21]. Zaman gecikmeli sinir ağları, krank kinematığı veya blok titreşim ölçümleri kullanılarak silindir basıncını yeniden yapılandırmak için uygulanmıştır. Bu veri odaklı yaklaşımlar, dizel motorları, HCCI motorları ve doğal gaz motorları dahil olmak üzere çeşitli motor türlerinde potansiyel göstermiştir [22], [23], [24].

Yapılan literatür incelemeleri, dizel motorlarda silindir içi basınç tahmininin motor performansı ve emisyon kontrolü açısından önemini ortaya koymuştur. Geleneksel termodinamik modeller, basınç tahmininde sıkça kullanılmakla birlikte, yüksek hesaplama maliyetleri ve kalibrasyon zorlukları nedeniyle veri odaklı yaklaşımlar alternatif bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, makine öğrenmesi yöntemleri, silindir basıncını doğrudan ölçüm yapmadan yüksek doğrulukla tahmin etme potansiyeline sahiptir. Literatürde Random Forest, Karar Ağacı ve XGBoost gibi makine öğrenimi algoritmaları, motor performans analizi ve emisyon kontrolü için umut verici sonuçlar vermiştir [24], [25], [26], [27].

Bu çalışma, söz konusu tahminlerin doğruluk düzeyini ortaya koymak ve farklı modellerin bu amaçla kullanılabilirliğini değerlendirmek üzere gerçekleştirilmiştir. Dizel motorlarda silindir içi basıncı tahmin etmek için farklı makine öğrenmesi modellerinin doğruluğunu karşılaştırarak bu modellerin avantajlarını ve kısıtlılıklarını belirlemektir. Bu doğrultuda, farklı deneysel koşullarda elde edilen silindir basıncı verileri kullanılarak Random Forest, Karar Ağacı ve XGBoost algoritmalarının performansı doğruluk oranları, işlem süreleri ve hata analizleri üzerinden değerlendirilmiştir. Veri toplama süreci, model eğitimi ve kullanılan parametreler ve performans değerlendirme kriterleri titizlikle belirlenmiş ve

deney sonuçları karşılaştırmalı analizlerle incelenmiştir. İzlenen yöntem ve analiz süreçleri aşağıdaki materyal ve metot bölümünde detaylı olarak açıklanmaktadır.

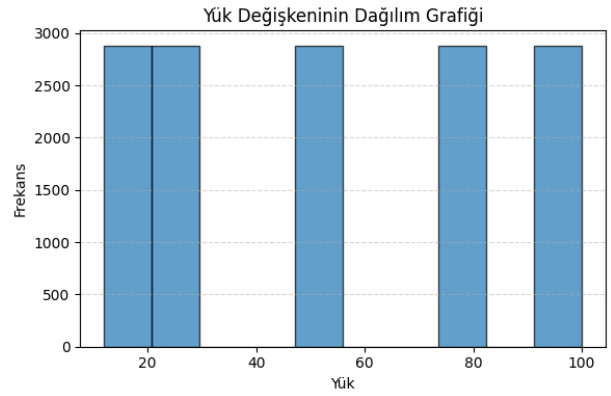
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, farklı makine öğrenimi algoritmalarının tahmin performanslarını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, veri ön işleme, model eğitimi, hiperparametre ayarları ve model değerlendirmesi adımları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemler, verilerin yapılandırılmasından model performanslarının görselleştirilmesine kadar disiplinlerarası standartlara uygun bir yaklaşımla uygulanmıştır. Aşağıda, kullanılan algoritmaların özellikleri, performans değerlendirme metrikleri ve sonuçların görsel karşılaştırmalarına ilişkin detaylar sunulmaktadır.

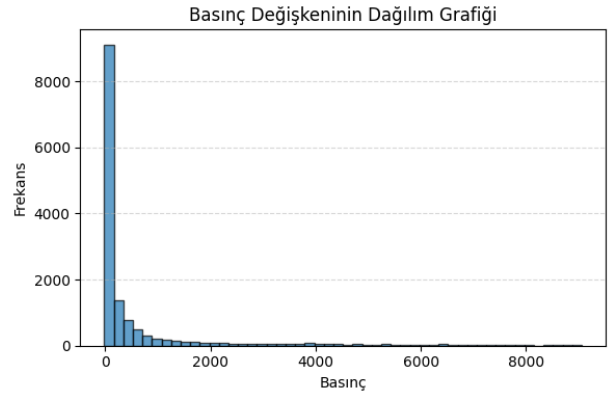
2.1. Veri seti ve ön işleme

Bu çalışmada, [28] tarafından sağlanan, 4 zamanlı common rail enjeksiyon sistemine sahip 6,8 L turboşarjlı 6 silindirlili Tier II bir dizel motora ait veriler kullanılmıştır. Veriler, ISO Standardı 8178:4 D2 döngüsüne uygun olarak 1800 rpm'de gerçekleştirilen beş test çalışmasını kapsamaktadır. Bu veri seti, çalışmamızda kullanılan makine öğrenimi modellerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi için temel oluşturmuştur. Makine öğrenmesi algoritmaları, büyük ve çeşitli veri kümelerini işleyebilme yetenekleri sayesinde motor verisi gibi kompleks yapıları sistemlerde başarılı tahminler sağlamaktadır [29].

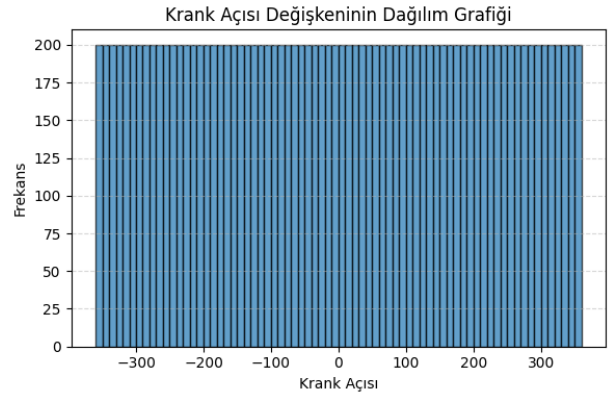
Veri seti, Excel formatında yüklenmiştir ve Tablo 1'de örnek satırları gösterilmiştir. İlk iki sütun giriş değişkenleri (X), üçüncü sütun ise çıkış değişkeni (y) olarak belirlenmiştir. Veri setinin uygunluğu, eksik veri kontrolü ve genel bilgi incelemesi ile doğrulanmıştır. Eksik veri kontrolü sırasında, veri setindeki tüm sütunlar gözden geçirilmiş ve veri bütünlüğü sağlanmıştır. Eksik veya hatalı veriler bulunmadığı doğrulandıktan sonra normalleştirme adımına geçilmiştir. Bu aşamada, giriş ve çıkış değişkenleri MinMaxScaler kullanılarak 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir. Bu işlem, farklı ölçeklerdeki değişkenlerin model performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olmaması için uygulanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 1. Veri setinin dağılım grafikleri. (a) Yük, (b) Basınç, (c) Krank açısı.

Bu görselleştirme, değişkenlerin model eğitimi sırasında homojen bir şekilde kullanılacağını ve veri kaybı veya tutarsızlık olmadığını vurgulamaktadır. Şekil 1'de görülen yapı, modelleme sürecinde değişkenlerin özellikleri hakkında kapsamlı bir bilgi sunmuştur.

Veri normalleştirme sonrası, giriş (X) ve çıkış (y) değişkenlerinin dağılımları incelenmiştir. Eğitim, doğrulama ve test setlerine ayrılmadan önce verilerin homojen dağılımda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere basınç değişkeni için histogram grafiği incelendiğinde, verinin büyük bir kısmının düşük değerler arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Basınç değişkeni uzun bir sağ kuyruk

sergilemektedir. Bu da yüksek basınç değerlerinin nadiren ölçüldüğünü göstermektedir. Bu durum, model tahmin performansı üzerinde etkili olabilir ve gerekirse veri dönüşüm teknikleri ile ele alınabilir.

Tablo 1. Veri setinden örnek veriler.

	Yük (%)	Krank Açısı	Silindir Basıncı
1	12	-360.00	90.759
2	12	-359.75	89.577
3	12	-359.50	89.746
4	12	-359.25	89.302

Krank açısı değişkeninin dağılım grafiği ise açılar arasında eşit bir dağılım sergilemektedir. Bu durum, krank açısının veri setinde eksiksiz bir şekilde ölçüldüğünü göstermekte ve modelin bu değişkenle sağlıklı bir ilişki kurabileceğine işaret etmektedir. Yük değişkeni için histogramda ise farklı yük seviyelerinin (örneğin 20, 40, 60, 80 ve 100) eşit sıklıkta yer aldığı görülmektedir. Bu durum, veri setinin farklı yük koşullarını kapsadığı ve modelin bu yüklerle iyi bir şekilde eğitilebileceği anlamına gelir.

Tablo 2. Veri setinin istatistiksel verileri.

İstatistik	Yük	Krank açısı (°)	Basınç (Bar)
Gözlem Sayısı (Count)	14400.000	14400.000	14400.000
Ortalama (Mean)	52.400	-0.125	670.614
Standart Sapma (Std)	32.142	207.853	1502.922
En Küçük Değer (Min)	12.000	-360.000	-20.095
1. Çeyrek (Q1, %25)	25.000	-180.062	40.545
Medyan (Q2, %50)	50.000	-0.125	80.972
3. Çeyrek (Q3, %75)	75.000	179.813	409.301
En Büyük Değer (Max)	100.000	359.750	9058.385

Bu dağılım analizleri, veri setindeki dengesizliklerin ve homojenliklerin belirlenmesine yardımcı olmuş ve modelleme sürecinde dikkate alınmıştır. Tablo 2'deki istatistiksel özet, veri setinin boyutlarını ve dağılımlarını göstermektedir.

Tabloda yer alan istatistiksel ölçütler, veri setinin dağılım özelliklerini özetlemektedir. Gözlem Sayısı (Count), her değişkene ait toplam veri sayısını belirtir. Ortalama (Mean), tüm gözlemlerin aritmetik ortalamasını ifade eder. Standart Sapma (Std), verilerin ortalama etrafındaki yayılım derecesini gösterir. Büyük sapma, verinin daha geniş dağıldığını ifade eder. En Küçük Değer (Min) ve En Büyük Değer (Max), sırasıyla veri setindeki minimum ve maksimum

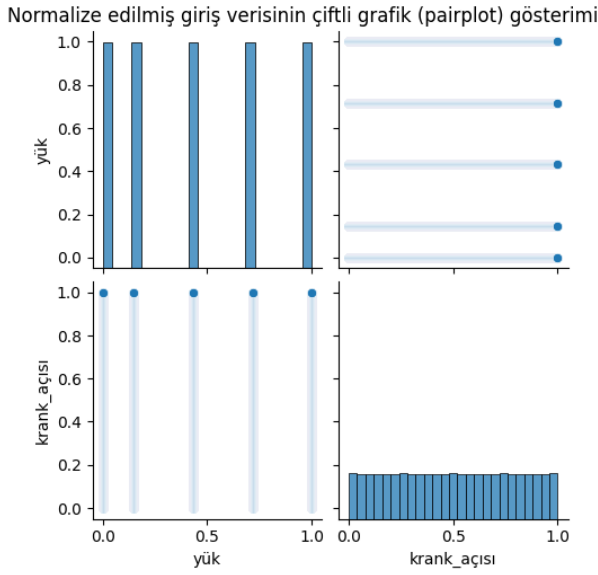
değerleri temsil eder. 1. Çeyrek (%25, Q1), verinin en küçükten büyüğe doğru sıralandığında ilk %25'lik kısmının üst sınırıdır. Medyan (%50, Q2), ortadaki değeri temsil eder ve veriyi iki eşit parçaya böler. 3. Çeyrek (%75, Q3) ise verinin %75'inin altında, %25'inin üstünde kalan değeri belirtir. Bu çeyrek değerler, özellikle veri setindeki asimetrik dağılımların ve aykırı değerlerin tespitinde önemli rol oynar.

Tablo 2 incelendiğinde yük değişkeni 12 ile 100 arasında değerler almakta ve ortalaması yaklaşık 52.4'tür. Krank açısı değişkeni -360° ile 360° arasında eşit dağılımlı bir değişken olup ortalama açısı -0.125° civarındadır. Basınç değişkeni ise -20.1 ile 9058,4 arasında geniş bir aralıkta dağılmıştır ve ortalama basınç değeri 670.6 bar olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, özellikle basınç değerlerinde standart sapmanın yüksek olması nedeniyle veri setinin uç değerlere duyarlı olabileceğini göstermektedir. Verideki minimum ve maksimum basınç değerleri, bazı anomalilerin veya yüksek basınç koşullarının veri setine dahil edildiğini göstermektedir. Bu durum, model eğitiminde ve değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken bir husus olarak ele alınmıştır.

Şekil 2'de, normalleştirilmiş yük ve krank açısı değişkenleri arasındaki dağılım grafiği detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu çift değişkenli dağılım grafiği, veri setindeki değişkenlerin normalizasyon işleminden sonra hangi aralıklarda yer aldığını ve dağılım düzenlerini açıkça ortaya koymaktadır. Normalizasyon süreci, değişkenler arasındaki ölçek farklılıklarını ortadan kaldırmak ve model eğitimi sırasında her bir değişkenin eşit bir katkıda bulunmasını sağlamak için uygulanmıştır. Grafik, yük değişkeninin belirli seviyelerde kümелendiğini ve farklı motor yük koşullarını temsil ettiğini göstermektedir. Bu kümelenme, veri setinin farklı yük koşullarını kapsadığını ve motor performans analizinde çeşitliliğin sağlandığını işaret etmektedir. Bunun yanı sıra, krank açısı değişkeni krank açısının tam döngüsünü kapsamakta olup, -360° ile +360° arasında eşit bir dağılım sergilemektedir. Bu durum, krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimlerinin tam bir döngü boyunca ölçüldüğünü ve analiz için gereken sürekliliğin sağlandığını göstermektedir. Ayrıca, grafikte her bir değişkenin ayrı ayrı normalleştirilmiş değerlerini koruduğu ve veri çeşitliliğinin uygun bir şekilde temsil edildiği görülmektedir.

Bu analiz, veri setinin homojen bir dağılım sergilediğini ve modelleme sürecinde herhangi bir dengesizlik veya eksikliğin olmadığını doğrulamaktadır. Grafikte gözlemlenen düzen, modelin eğitim sırasında hem yük hem de krank açısı değişkenlerinden faydalanarak doğru ilişkiler kurabileceğini ve silindir içi basınç tahmini için güçlü bir temel oluşturabileceğini göstermektedir. Böylece, veri setindeki bu düzenli yapı, modelin genelleme

başarısını artırma potansiyeline sahip olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 2. Normalleştirilmiş yük ve krank açısı değişkenleri

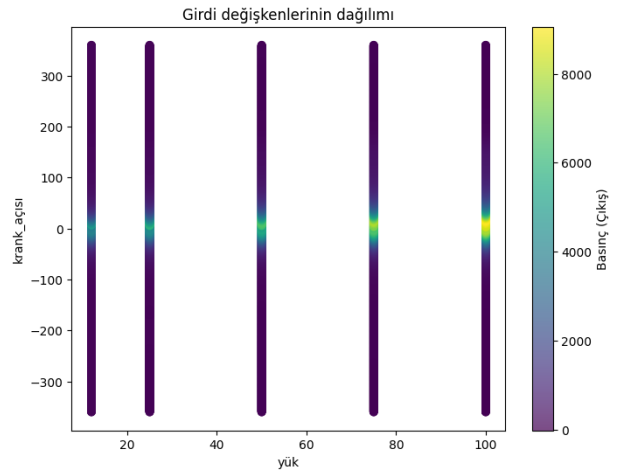
2.2 Veri setinin ayrılması

Normalizasyon işleminin ardından, veri seti %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak üç alt kümeye bölünmüştür. Veri bölme işlemi sırasında, modelin genellenabilirliğini artırmak amacıyla rastgele veri dağılımı için random_state=42 parametresi kullanılmıştır. Veri setinin eğitim, doğrulama ve test kümelerine ait örnek büyüklükleri aşağıda Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Veri setininne ait örnek büyüklükleri

Veri Kümesi	Örnek Sayısı	Açıklama
Eğitim (X_train, y_train)	9792	Modelin öğrenme sürecinde kullanılan veri kümesi
Doğrulama (X_val, y_val)	2448	Modelin hiperparametre ayarlamasında kullanılan doğrulama kümesi
Test (X_test, y_test)	2160	Modelin performans değerlendirmesi için ayrılmış, daha önce görülmemiş veri kümesi

Bu yapılandırma, veri setinin eğitim sırasında aşırı öğrenme (overfitting) veya yetersiz öğrenme (underfitting) problemleri yaşamaması için dengeli bir şekilde bölünmesini sağlamıştır. Model performansı, doğrulama ve test kümeleri üzerinde hesaplanarak genel sonuçların değerlendirilebilirliği artırılmıştır.



Şekil 3. Girdi değişkenlerinin dağılım grafiği

Şekil 3, çalışma kapsamında kullanılan veri setinin giriş değişkenleri arasındaki ilişkiyi görselleştirmektedir. Girdi değişkenleri, krank açısı (°) ve yük (%) olarak belirlenmiş, çıkış değişkeni ise basınç (Cyl kPa) değeridir. Yatay ekseninde yük değerleri (%), dikey ekseninde krank açıları (°) yer almaktadır. Renk skalası, her bir gözlem için basınç değerlerini temsil etmekte olup, yüksek basınç değerleri daha açık tonlarla gösterilmiştir. Veri seti, farklı yük seviyelerinde motor performans parametrelerinin detaylı şekilde ölçülmesi amacıyla toplanmıştır. Her yük seviyesinde krank açısı -360° ile +360° arasında değişmekte ve yanma döngüsünün tamamını kapsamaktadır. Grafik, veri setindeki ölçüm yoğunluğunun farklı krank açıları için sabit yük seviyeleri için homojen dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu yapılandırma, basınç değişimlerinin krank açısı ve yük ile ilişkisini analiz edebilmek için veri setinin kapsamlı bir şekilde düzenlendiğini göstermektedir. Böylece, modelleme ve analiz süreçlerinde kullanılan veri seti, farklı motor çalışma koşullarını temsil eden ölçüm değerlerinden oluşmakta ve her bir yük seviyesi için krank açısına bağlı basınç ölçümleri detaylı bir şekilde kayıt altına alınmaktadır.

2.3. 5-katmanlı (5-fold) çapraz doğrulama (cross-validation)

Bu çalışmada, model performansının daha güvenilir ve nesnel bir biçimde değerlendirilmesi amacıyla 5-katmanlı (5-fold) çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Veri seti, rastgele karıştırılarak beş alt kümeye bölünmüş ve her bir fold için modeller ayrı ayrı eğitilip doğrulama verisi üzerinde test edilmiştir. Her bir iterasyonda modeller, eğitim alt kümesinde GridSearchCV yöntemi ile optimize edilmiş hiperparametreler ile eğitilmiş, doğrulama verisinde en yüksek R^2 değerini veren yapılandırma kaydedilmiştir.

Tablo 4. Model Katmanlarının Yapısı

Bileşen	Açıklama
Model Tipi	Decision Tree, Random Forest, XGBoost
Girdi Özellikleri	2 (örneğin: sıcaklık, basınç)
Çıktı	1 (örneğin: verim, emisyon)
Doğrulama Yöntemi	5-katmanlı (5-fold) çapraz doğrulama
Test Verisi	%15 oranında, tamamen ayrılmış ve eğitimde hiç kullanılmamış
Hiperparametre Seçimi	Her fold'da GridSearchCV ile en iyi parametre kombinasyonu seçildi
Performans Metrikleri	MAE, RMSE, R ²

Nihai olarak her model için en başarılı fold'da eğitilen yapı, daha önce eğitimde hiç kullanılmamış %15'lik test veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Model başarımı, ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error - MAE), kök ortalama kare hata (Root Mean Squared Error - RMSE) ve determinasyon katsayısı (R²) ile ölçülmüştür. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri ve değerlendirme yapısı Tablo 4'te sunulmuştur.

2.4. Regresyon modelleri

Bu çalışmada, regresyon problemini çözmek için XGBoost Regressor, Random Forest Regressor, Decision Tree Regressor olarak üç farklı model kullanılmıştır. Bu çalışmada hiperparametre seçimi, her bir makine öğrenmesi algoritmasının yapısal özellikleri ve genelleme kapasitesi dikkate alınarak, sistematik bir tarama yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Her fold içerisinde GridSearchCV yöntemi kullanılarak belirli hiperparametre aralıkları üzerinden kapsamlı bir arama yapılmış ve en iyi çapraz doğrulama performansını sağlayan parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Hiperparametre aralıkları, ilgili algoritmaların aşırı öğrenmeye yatkınlıklarını dengeleyecek şekilde, özellikle ağaç tabanlı modellerde derinlik, örnek sayısı ve budama gibi yapısal sınırlayıcılar gözetilerek oluşturulmuştur. XGBoost modeli için ise L1 (reg_alpha) ve L2 (reg_lambda) düzenleme katsayıları gibi yerleşik kontrol mekanizmaları da arama kapsamına dâhil edilmiştir.

Parametre seçim süreci sadece doğrulama metriklerine değil; aynı zamanda kalıntı analizi, parite grafikleri ve hata dağılımı gibi görsel destekleyici unsurlarla da değerlendirilmiştir. Nihayetinde, her model için en iyi sonuç veren fold'daki yapılandırma, daha önce eğitimde hiç kullanılmamış %15'lik test veri seti üzerinde test edilerek, modellerin hem öğrenme hem de genelleme kapasiteleri nesnel biçimde analiz edilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım, sadece doğruluk metriklerine değil, model davranışlarına da odaklanan çok yönlü bir değerlendirme süreci sunmuştur.

2.4.1. XGBoost

XGBoost (Extreme Gradient Boosting), gradyan artırmalı ağaç (gradient boosting tree) algoritmalarının optimize edilmiş ve düzenleme mekanizmaları entegre edilmiş bir sürümüdür.

Tablo 5. XGBoost Regressor model parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
n_estimators	100	Toplam zayıf model sayısı
max_depth	6	Her bir ağacın maksimum derinliği
learning_rate	0.1	Öğrenme oranı
subsample	1	Her ağaç için kullanılacak örnek oranı
colsample_bytree	1	Her ağaçta kullanılacak özellik oranı
gamma	0	Bölünme için gereken minimum kayıp azaltımı
reg_alpha	0	L1 düzenleme katsayısı
reg_lambda	2	L2 düzenleme katsayısı
random_state	42	Rastgelelik kontrolü

Model, hata fonksiyonunu minimize etmeyi amaçlayan art arda ağaçlar inşa eder ve her yeni ağaç, önceki ağaçların yapamadığı tahminleri iyileştirmeye çalışır. XGBoost, L1 (lasso) ve L2 (ridge) regularizasyon terimlerini içeren kayıp fonksiyonu sayesinde overfitting riskine karşı oldukça dayanıklıdır. Ayrıca yüksek hız, paralelleştirilebilirlik ve eksik veri toleransı gibi avantajlara sahiptir. XGBoost Regressor algoritması model parametreleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

2.4.2. Karar Ağacı (Decision Tree)

Bu çalışmada bir diğer yöntem olarak, tahminleme sürecinde Karar Ağacı Regressor (Decision Tree Regressor) algoritması kullanılmıştır. Karar ağacı algoritması, veriyi ardışık biçimde bölerek tahmin işlemini gerçekleştiren sezgisel bir öğrenme yöntemidir.

Ağaç yapısı, düğümler aracılığıyla karar kuralları oluşturur ve her yaprak düğümde bir çıktı değeri üretilir. Regresyon amaçlı kullanımında, her bir bölmede varyansı minimize edecek şekilde veri alt kümelerine ayrılır. Karar ağaçları, yorumlanabilirliği yüksek ve hızlı uygulanabilir yapılar sunmasına rağmen, aşırı dallanma durumunda genelleme kabiliyetini kaybederek overfitting'e yatkın hâle gelebilir. Bu nedenle, derinlik ve örnek sayısı gibi hiperparametrelerin dikkatle sınırlandırılması gerekmektedir. Model parametreleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Karar Ağacı Regressor (Decision Tree Regressor) model parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
criterion	'squared_error'	Hata fonksiyonu (MSE)
splitter	'best'	En iyi bölmeyi arar
max_depth	None	Maksimum derinlik sınırlaması yok
min_samples_split	2	Bölme için gerekli minimum örnek sayısı
min_samples_leaf	1	Yaprakta bulunması gereken minimum örnek sayısı
max_features	None	Özellik alt kümesi sınırı yok
random_state	42	Sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlar
criterion	'squared_error'	Hata fonksiyonu (MSE)

2.4.3. Rastgele Orman (Random Forest)

Bu çalışmada, tahminleme sürecinde bir diğer yöntem olarak Random Forest Regressor algoritması kullanılmıştır.

Tablo 7. Random Forest Regressor model parametreleri.

Parametre	Değer	Açıklama
n_estimators	100	Kullanılan karar ağacı sayısı
criterion	'squared_error'	Hata hesaplama yöntemi (MSE)
max_depth	None	Her ağacın maksimum derinliği
min_samples_split	2	Bir iç düğümün bölünmesi için gereken minimum örnek
min_samples_leaf	1	Bir yaprakta olması gereken minimum örnek sayısı
max_features	'auto'	Her ağaç için kullanılacak maksimum özellik sayısı
bootstrap	True	Örnekleme yöntemi: geri dönüşümlü
random_state	42	Sonuçların tekrarlanabilirliği

Random Forest algoritması, çok sayıda karar ağacından oluşan bir topluluk öğrenme (ensemble learning) yöntemidir. Her bir ağaç, eğitim verisinin rastgele bir alt kümesi ve özelliklerin rastgele bir alt kümesi ile eğitilir. Bu yaklaşım, karar ağaçlarının varyansını azaltır ve modelin genelleme kapasitesini artırır. Rastgele ormanlar, gürültülü verilerle başa çıkabilme kabiliyeti ve aşırı öğrenmeye karşı dirençli

yapısıyla öne çıkar. Ancak, yorumlanabilirliği tekil karar ağaçlarına göre daha düşüktür. Model parametreleri Tablo 7'de gösterilmiştir.

2.5. Performans metrikleri

Model, eğitim kümesindeki verilerle eğitilmiş ve test kümesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Performans metrikleri olarak Tablo 8'de gösterildiği gibi determinasyon katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama kare hata (MSE) ve kök ortalama kare hata (RMSE) kullanılmıştır.

Model performansını daha bütüncül değerlendirebilmek adına hem Ortalama Mutlak Hata (MAE) hem de Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) birlikte kullanılmıştır. MAE, tüm hataların mutlak değerlerinin ortalamasını alarak sapmaların genel büyüklüğünü ölçerken, RMSE hataların karesini alarak büyük sapmalara daha fazla ağırlık verir. Bu nedenle RMSE, uç değerlerin model üzerindeki etkisini daha belirgin şekilde yansıtırken; MAE, geneldeki tahmin hatalarının ortalama düzeyini verir. Her iki ölçüt birlikte değerlendirildiğinde, modelin hem genel doğruluğu hem de uç değerlere karşı hassasiyeti hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmektedir. Bu durum, özellikle enerji tüketimi, emisyon tahmini veya maliyet öngörüsü gibi yüksek varyanslı çıktılarda önem arz etmektedir.

Tablo 8. Kullanılan performans metrikleri.

Performans Metrikleri	Açıklama
R^2 Score	Modelin açıklanabilirlik oranını temsil eden determinasyon katsayısı
MAE (Mean Absolute Error)	Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ortalama mutlak fark
RMSE (Root Mean Squared Error)	Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki kök ortalama kare fark

Genelleme kapasitesi, bir modelin yalnızca eğitim verisi üzerinde değil, daha önce görmediği yeni veri üzerinde de benzer düzeyde başarı gösterebilme yeteneğini ifade eder. Bu çalışmada genelleme kapasitesi, eğitim+doğrulama süreci dışında bırakılan bağımsız %15'lik test veri seti üzerindeki performansla değerlendirilmiştir. Eğitim sürecinde elde edilen başarı metrikleri ile test sürecindeki metrikler karşılaştırılarak, modelin yeni veriler üzerindeki tutarlılığı ölçülmüştür. Özellikle eğitim doğruluğu ile test doğruluğu arasında belirgin bir fark olmaması, modelin aşırı öğrenmeden kaçındığını ve genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, genelleme kapasitesinin sayısal olarak değerlendirilmesini sağlar ve modelin pratik uygulamadaki güvenilirliğini destekler.

2.6. Sonuçların karşılaştırılması ve görselleştirilmesi

Modellerin performans karşılaştırması, normalize edilmiş performans metrikleri kullanılarak radar grafiği ile görselleştirilmiştir. Radar grafiği, her modelin her bir performans metriğinde sergilediği göreceli başarıyı aynı düzlemde incelemeyi mümkün kılmıştır ve tüm metrikler, farklı ölçeklerdeki değerlerin karşılaştırılabilmesi için normalize edilmiştir. Tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere göre dağılımını gösteren parite grafikleri, modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla kullanılmış ve ideal bir model için tüm veri noktalarının 45°'lik doğrultu üzerinde yer alması gerektiği vurgulanmıştır. Kalıntı (residual) dağılım grafikleri, tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki farkların rastgele dağılımı durumunda modelin uygun bir tahmin performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Hata histogramları, tahmin hatalarının frekans dağılımını inceleyerek normal dağılıma benzer bir yapı olup olmadığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Son olarak, radar grafiği, her modelin farklı performans metriklerine göre sergilediği göreceli başarısını bir arada sunarak model karşılaştırmalarının bütüncül bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır.

Modellerin performans metrikleri arasındaki istatistiksel farklılıkları değerlendirebilmek amacıyla, her bir modelin 5 katmanlı çapraz doğrulama sürecinde elde ettiği RMSE, MAE ve R^2 değerlerine tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) uygulanmıştır. Bu analizde, her metrik için modeller arası ortalama farkların anlamlı olup olmadığı test edilmiştir. ANOVA testi, özellikle aynı veri seti üzerinde eğitilen modellerin hata dağılımları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunup bulunmadığını ortaya koymak açısından önemli bir araç olarak tercih edilmiştir. Analizler, Python ortamında `scipy.stats.f_oneway` fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen p-değerlerine göre, istatistiksel olarak anlamlı farklar gözlemlenen metriklerde model tercihinin yönelik güçlü çıkarımlar yapılmıştır.

2.7. Kullanılan yazılım ortamı ve araçlar

Bu çalışma Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri işleme ve modelleme için Scikit-learn, XGBoost ve Pandas kütüphaneleri; görselleştirme için Matplotlib ve Seaborn kütüphaneleri kullanılmıştır.

3. Bulgular

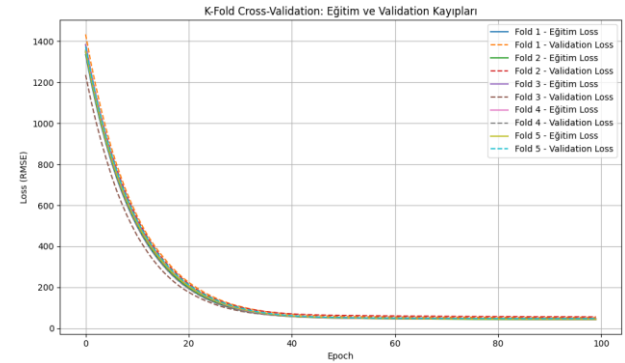
Bu çalışmada, kullanılan modeller, K-Fold çapraz doğrulama ($K=5$) ile değerlendirilmiştir. Eğitim süreci boyunca modelin doğrulama kaybı (validation loss), doğrulama ortalama mutlak hatası (MAE) ve R^2 skorları hesaplanmıştır.

K-Fold yöntemi kullanılarak yapılan değerlendirme sonuçlarında, her bir modelin fold süreçleri için eğitim ve doğrulama kayıp değerleri incelenmiştir. R^2 skorları, modelin doğrulama veri kümesi üzerindeki performansını doğrulamak için hesaplanmış olup, modelin doğruluk düzeyini temsil etmektedir. Modellerin K-Fold çapraz doğrulama sürecinde elde edilen değerleri aşağıdaki Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. K-Fold çapraz doğrulama değerleri.

Model	Fold	RMSE	MAE	R^2
XGBoost	1	51.803460	16.780338	0.998926
	2	55.567916	18.438903	0.998677
	3	45.995282	15.067042	0.998861
	4	46.904797	15.440563	0.999013
	5	47.080374	15.291440	0.999033
Random Forest	1	20.037200	5.036235	0.999839
	2	14.546379	4.697721	0.999909
	3	13.449586	4.519034	0.999903
	4	13.677057	4.160759	0.999916
	5	13.220504	4.214282	0.999924
Decision Tree	1	23.666829	7.454356	0.999776
	2	19.567332	7.113923	0.999836
	3	17.596448	6.413074	0.999833
	4	16.389079	5.823862	0.999880
	5	15.792187	6.005221	0.999891

XGBoost modelinin her bir fold için eğitim ve doğrulama kayıp değerlerinin epoch sayısına göre değişimi Şekil 4 ile görselleştirilmiştir. Grafiklerde, modelin erken durdurma (early stopping) kullanılarak aşırı öğrenme (overfitting) problemi minimize edildiği gözlemlenmiştir. Eğitim ve doğrulama kayıpları, modelin stabil bir hale ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4. XGBoost modeli eğitim ve doğrulama kayıp grafiği.

Modelin farklı doğrulama kümeleri üzerindeki R^2 skorlarının yüksek olması, modelin doğruluk performansının tatmin edici olduğunu ortaya koymuştur.

MAE değerlerinin düşük olması, modelin tahmin ettiği değerlerle gerçek değerler arasındaki sapmanın az olduğunu ifade etmektedir. Model kaybının düşük olması ise modelin doğrulama verileri üzerindeki genelleme kapasitesinin yüksek olduğunu işaret etmektedir. Bu bulgular, önerilen modelin regresyon tabanlı problemler için uygun bir yapılandırma sunduğunu ve K-Fold çapraz doğrulama yaklaşımı ile

güvenilir tahminler sağladığını göstermektedir. Tablo 10'da modellerin doğruluk oranları ve hata değerleri verilmiştir.

Tablo 10. Modellerin doğruluk ve hata değerleri

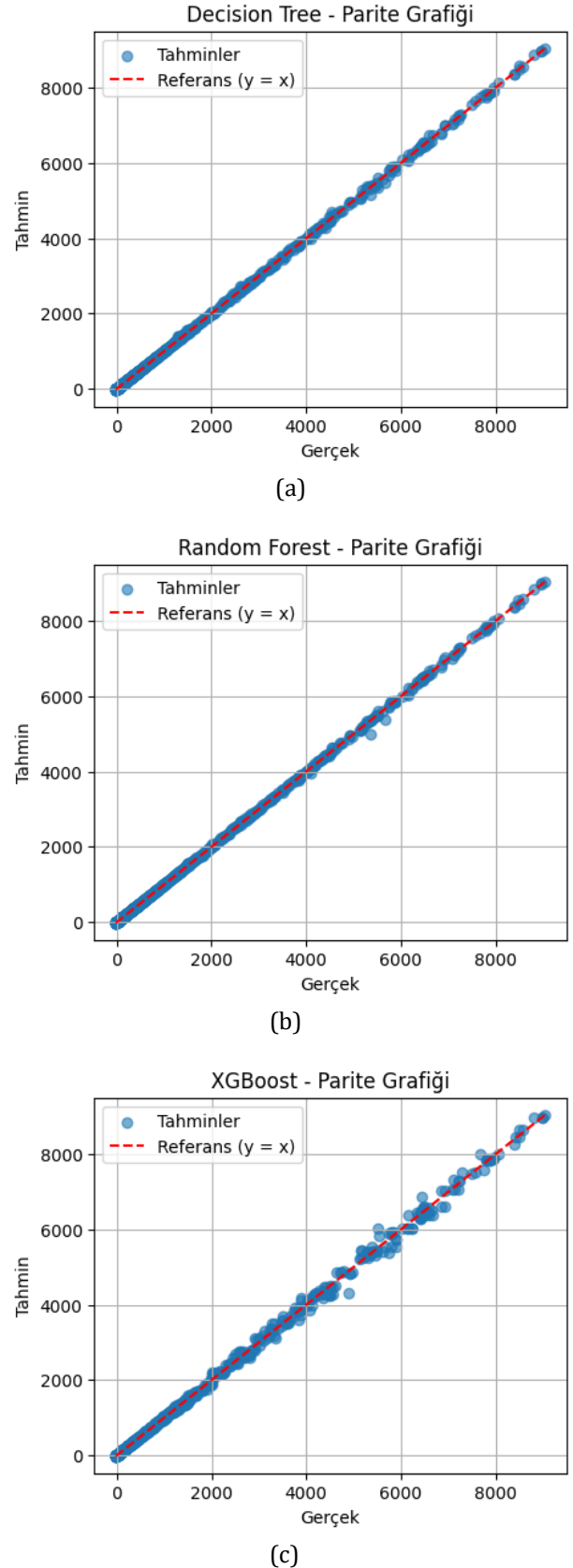
Model	R ² Score	MAE	RMSE
DecisionTreeRegressor	0.9999	6.639	17.785
RandomForestRegressor	0.9999	4.546	15.552
XGBoost	0.9990	16.212	47.394

Decision Tree modeli, test veri kümesi üzerinde neredeyse mükemmel bir performans sergilemiştir. Çok düşük MAE ve RMSE değerleri, modelin tahminlerinin gerçek değerlere oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Random Forest modeli, test veri kümesi üzerinde Decision Tree modeline benzer şekilde mükemmel bir doğruluk sergilemiştir. Ancak, MAE ve RMSE değerleri daha düşük olup, tahmin başarısı açısından en iyi model olarak öne çıkmıştır. XGBoost modeli, diğer modellere göre hafif bir doğruluk düşüşü gösterse de hala mükemmel bir performans sunmuştur. MAE ve RMSE değerleri diğer modellere göre bir miktar daha yüksektir, ancak genelleme başarısı yüksektir. Tüm modellerin gerçek değerler ile tahmin edilen değerleri Tablo 11'de gösterilmiştir.

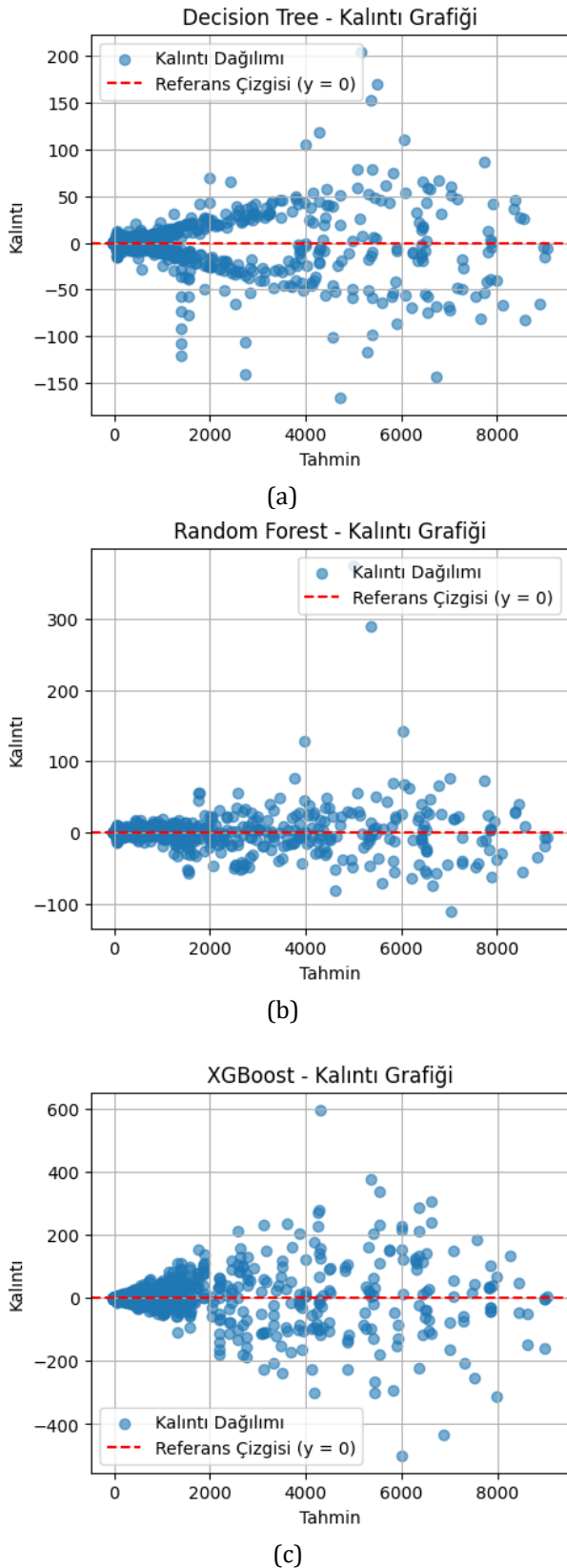
Tablo 11. Tüm modellerin gerçek değerler ile tahmin edilen basınç değerleri.

Gerçek Değer	Tahmin Değeri (Decision Tree)	Tahmin Değeri (Random Forest)	Tahmin Değeri (XGBoost)
49.02229	48.471192	47.970658	48.399296
5293.479	5311.286	5299.47771	5255.908203
60.22967	56.388141	58.397946	58.904957
70.08236	70.533620	70.172157	67.384402
19.59600	19.234800	19.345404	20.927893
-5.324062	-5.466102	-5.359881	-5.633992
2021.785	2039.418193	2036.140771	2016.367310
96.46930	97.209415	98.604179	97.069702
33.42666	43.458730	33.441528	27.610344

Şekil 5, XGBoost, Decision Tree Regressor ve Random Forest Regressor modellerinin test veri kümesi üzerinde tahmin ettikleri değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Mavi noktalar, modellerin tahmin değerlerini; kırmızı kesikli çizgi ise ideal tahmin doğruluğunu temsil etmektedir. XGBoost modeli, tahmin değerlerinin büyük çoğunluğunun ideal doğruluk çizgisi üzerinde veya çok yakınında yer aldığı bir performans sergilemiş, ancak bazı veri noktalarında hafif sapmalar gözlemlenmiştir. Decision Tree modeli, tahmin değerlerinin büyük ölçüde kırmızı çizgi ile örtüştüğünü göstermiştir; ancak tek bir ağaç yapısına dayalı olması nedeniyle bazı veri noktalarında genelleme kabiliyeti sınırlı kalmıştır.



Şekil 5. Modellerin parite grafiği. (a) Decision Tree, (b) Random Forest, (c) XGBoost



Şekil 6. Modellerin kalıntı grafiği. . (a) Decision Tree, (b) Random Forest, (c) XGBoost

Random Forest modeli ise tahmin değerlerinin neredeyse tamamen ideal doğruluk çizgisi ile örtüştüğü, sapma ve varyansın dengelendiği bir yapı sunarak en düşük hata değerleriyle en iyi genelleme başarısını elde etmiştir. Genel olarak, tüm modellerin yüksek doğruluk sağladığı görülmüş; ancak Random

Forest modelinin genelleme kapasitesinin diğer modellere kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

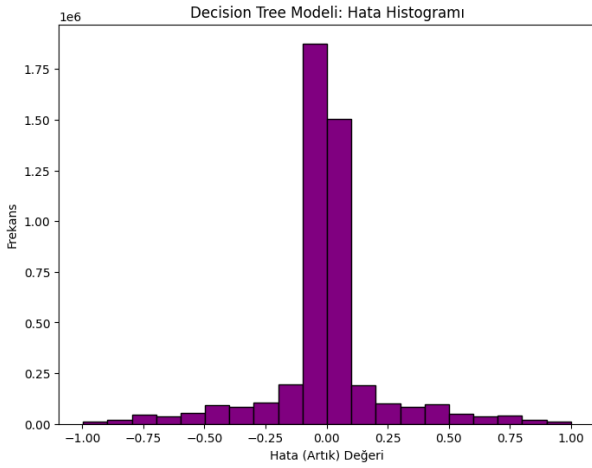
Model performanslarını değerlendirmek amacıyla tahmin hatalarının dağılımı incelenmiş ve sonuçlar her bir model için ayrı ayrı Şekil 6 'da görselleştirilmiştir. Decision Tree, Random Forest ve XGBoost modellerine ait kalıntı (residual) grafiklerine bakıldığında, hataların büyük oranda sıfır çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, modellerin genel olarak yüksek doğrulukla tahmin gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Decision Tree modeline ait kalıntılar, sınırlı bir dağılım göstermekte ve tahmin hataları genellikle dar bir aralıkta yoğunlaşmaktadır. Bu da modelin istikrarlı bir şekilde tahmin yaptığına işaret etmektedir. Random Forest modelinin kalıntı dağılımı da benzer şekilde simetrik ve dar bir yapıdadır; bu da modelin genelleme başarısının yüksek olduğunu düşündürmektedir. XGBoost modelinde ise bazı uç değerlerin daha belirgin olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, XGBoost'un kalıntılarının büyük çoğunluğu yine sıfır çevresinde toplanmıştır; bu durum, modelin doğruluğunun yüksek olduğunu ancak bazı örneklerde göreceli sapmaların oluşabileceğini göstermektedir.

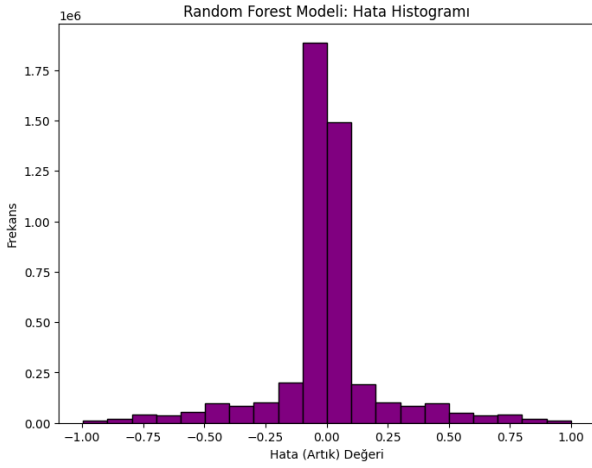
Grafiklerdeki kalıntıların simetrik yapıda ve referans çizgisi etrafında kümelenmesi, sistematik bir hata bulunmadığını ve modellerde aşırı öğrenme (overfitting) sorunu yaşanmadığını desteklemektedir. Genel olarak tüm modeller benzer hata dağılımı profiline sahip olmakla birlikte, Random Forest ve Decision Tree modellerinin kalıntı dağılımları daha dar ve dengeli bir görünüm sergilediğinden, genelleme açısından daha güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilir.

Şekil 7'de, tahmin hatalarının dağılımını değerlendirmek amacıyla XGBoost, Decision Tree (Karar Ağacı) ve Random Forest algoritmaları ile oluşturulan modellerin hata histogramları incelenmiştir. Her modelin tahmin hatalarının merkezi eğilimleri ve dağılım özellikleri bu grafikler üzerinden görselleştirilmiştir. Random Forest modelinin hata dağılımı oldukça dar bir bantta yoğunlaşmış olup, hataların büyük kısmı ± 15 aralığında toplanmıştır. Bu durum, modelin hem düşük hem de dengeli hatalarla tahmin yaptığını göstermektedir. Aynı zamanda bu gözlem, modelin en düşük MAE (4.546) ve RMSE (15.552) değerlerine sahip olmasıyla da örtüşmektedir. Decision Tree modeli de sıfır merkezli simetrik bir dağılım göstermekte olup, tahmin hataları genellikle ± 20 civarında dağılmıştır. Ancak uç değerlerde Random Forest'a göre biraz daha fazla sapma gözlenmiştir. XGBoost modelinin hata dağılımı da genel olarak sıfır çevresinde yoğunlaşmaktadır; ancak dağılımın daha yaygın ve uç değerlere daha açık olduğu görülmektedir. Bu modelin MAE (16.212) ve RMSE (47.394) değerleri diğer iki modele kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğundan, tahmin hatalarının

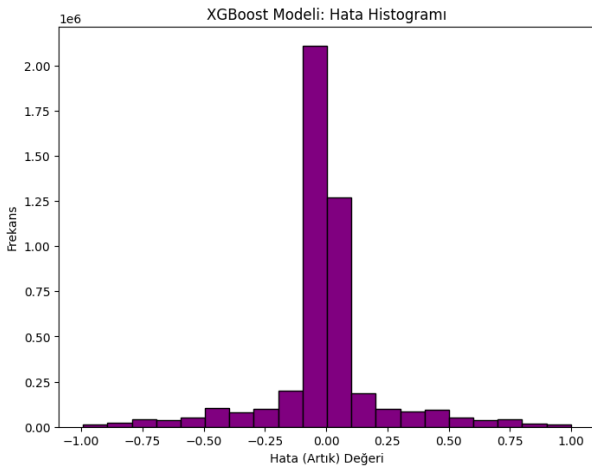
hem daha değişken hem de daha büyük olduğu söylenebilir.



(a)



(b)

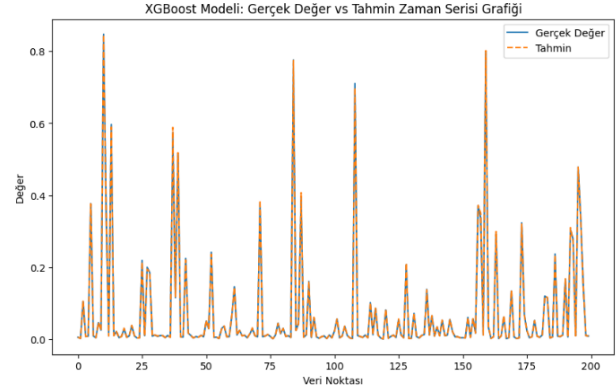


(c)

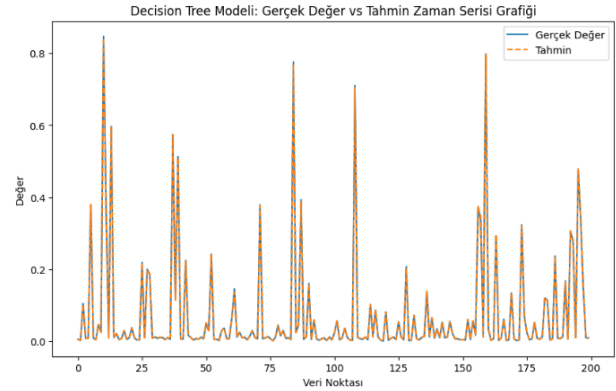
Şekil 7. Modellerin hata histogramları. (a) Decision Tree, (b) Random Forest, (c) XGBoost

Genel olarak, tüm modellerin hata dağılımları normal dağılıma yakın bir eğilim göstermektedir. Ancak, Random Forest modeli, en düşük hata değerleri ve en dar dağılımla en dengeli ve güvenilir tahmin performansını sergileyen model olmuştur. Bu

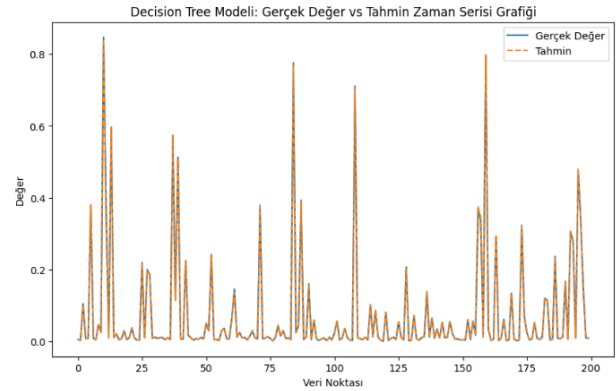
bulgular, özellikle bu çalışmada kullanılan veri seti bağlamında Random Forest algoritmasının en iyi genelleme yeteneğine sahip model olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)



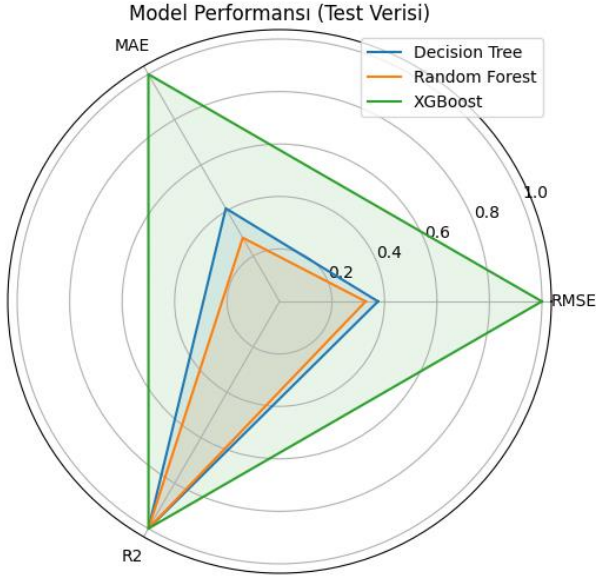
(c)

Şekil 8. Modellerin zaman serisi grafikleri. (a) Decision Tree, (b) Random Forest, (c) XGBoost

Şekil 8'de, XGBoost, Decision Tree ve Random Forest modellerinin tahmin performanslarını değerlendirmek amacıyla oluşturulan zaman serisi grafikleri incelenmiştir. Grafiklerde, modeller tarafından yapılan tahminler ile gerçek değerler karşılaştırılmıştır. Tüm modeller için tahmin değerlerinin zaman serisi boyunca gerçek değerlere oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 9'da farklı makine öğrenimi modellerinin (Random Forest, Decision Tree ve XGBoost) test verisi

üzerindeki performans metrikleri görselleştirilmiştir. Grafikte, R^2 skoru, MAE ve RMSE gibi temel performans göstergeleri kullanılarak modellerin karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 9. Modellerin radar grafiği ile performanslarının gösterimi

Elde edilen sonuçlara göre, Random Forest ve Decision Tree modelleri, $R^2 = 0.9999$ gibi oldukça yüksek bir doğruluk düzeyine ulaşmıştır. Özellikle Random Forest modeli, MAE = 4.546 ve RMSE = 15.552 ile hata metriklerinde en düşük değerlere ulaşarak en başarılı model olmuştur. Decision Tree, benzer bir R^2 değerine sahip olmasına rağmen, hata metriklerinde biraz daha yüksek değerler üretmiştir (MAE = 6.639, RMSE = 17.785).

Öte yandan, XGBoost modeli $R^2 = 0.9990$ ile görece olarak daha düşük bir doğruluk sağlamış ve hata metriklerinde de MAE = 16.212, RMSE = 47.394 gibi daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, XGBoost'un bu özel veri setinde diğer modellere kıyasla daha düşük bir genel performans sergilediğini göstermektedir.

Tablo 12. Performans Metriklerine Göre ANOVA Sonuçları.

Performans Ölçütü	F Değeri	p Değeri	İstatistiksel Yorum
RMSE	150.5844	0.000	RMSE değerleri arasında anlamlı fark var.
MAE	307.7429	0.000	MAE değerleri arasında anlamlı fark var.
R^2	189.3405	0.000	R^2 değerleri arasında anlamlı fark var.

Sonuç olarak, grafik ve sayısal veriler birlikte değerlendirildiğinde, Random Forest modelinin hem yüksek doğruluk hem de düşük hata oranları ile en başarılı model olduğu; Decision Tree modelinin makul performans gösterdiği, XGBoost modelinin ise

özellikle hata metrikleri açısından daha zayıf kaldığı görülmektedir. Bu da model seçiminde yalnızca R^2 skoru değil, hata ölçütlerinin de birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Modellerin doğruluk ve hata performansları arasındaki istatistiksel farklılıkların belirleyebilmek amacıyla, RMSE, MAE ve R^2 metriklerine yönelik olarak tek yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Her bir modelin 5 katmanlı çapraz doğrulama sürecinden elde edilen verileri üzerinden gerçekleştirilen analiz sonuçları, Tablo 12'de özetlenmiştir. Elde edilen F ve p-değerleri dikkate alındığında, hem hata metrikleri (RMSE ve MAE) hem de doğruluk metriği (R^2) açısından modeller arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğu görülmektedir ($p < 0.05$). Bu durum, yöntemlerin performans düzeylerinin sadece ortalama değerlerle değil, aynı zamanda varyans temelli istatistiksel kıyaslamalarla da farklılaştığını ortaya koymaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, dizel motorlarda silindir içi basıncı tahmin etmek için uygulanan veri odaklı makine öğrenimi modellerinin performansları karşılaştırılmıştır. Random Forest, Karar Ağacı ve XGBoost algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen analizler, her bir modelin farklı avantajlarını ve sınırlamalarını ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, Random Forest modelinin genelleme kapasitesinin üstün olduğunu ve en düşük hata oranlarıyla tahminlerde bulunduğunu göstermiştir. Bu modelin, çoklu karar ağaçlarını kullanarak genelleme kabiliyetini artırması ve hataları azaltması, motor performans analizi gibi yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kullanımını desteklemektedir. Öte yandan, modelin işlem süresi diğer algoritmalara göre daha uzun olsa da bu süre pratik kullanım için kabul edilebilir düzeydedir.

XGBoost modeli, özellikle hızlı tahmin süresi ve büyük veri setlerinde paralel hesaplama yeteneği ile öne çıkmıştır. Ancak, modelin doğruluk oranının diğer modellere kıyasla hafif bir düşüş göstermesi, genelleme başarısının sınırlı olabileceğini işaret etmektedir. Yine de bu model, gerçek zamanlı uygulamalar ve büyük ölçekli veri işleme gereksinimi olan projeler için uygun bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

Karar Ağacı modeli ise, basit yapısı sayesinde nispeten hızlı tahminler yapmış, ancak genelleme yeteneğinin yetersiz olması nedeniyle diğer modellere göre daha düşük performans sergilemiştir. Tek bir karar ağacı ile sınırlı olan bu model, veri setindeki varyans ve uç değerlerin tahmin doğruluğu üzerindeki etkilerine karşı daha duyarlıdır.

Bu çalışmada elde edilen yüksek R^2 skorları, ilk bakışta modellerin aşırı öğrenme (overfitting) yaptığı

izlenimini uyandırabilir. Ancak bu durum, kullanılan modelleme stratejileri ve doğrulama yöntemleri kapsamında sistematik olarak değerlendirilmiş ve kontrol altına alınmıştır. Modeller, yalnızca eğitim verisi üzerinde değil, aynı zamanda beş katmanlı çapraz doğrulama yöntemi ile doğrulama kümelerinde test edilmiş; ardından, bu süreçte kullanılmamış olan bağımsız %15'lik test veri seti üzerinde nihai değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Elde edilen yüksek test R^2 değerleri, modellerin yalnızca eğitim verisini ezberlemediğini, aynı zamanda genel veri yapısını başarılı şekilde öğrendiğini göstermektedir.

Buna ek olarak, model kalıntıları (residuals) grafiksel olarak incelenmiş; kalıntıların büyük oranda sıfır etrafında rastgele dağıldığı ve sistematik bir sapmanın bulunmadığı gözlemlenmiştir. Bu, modellerin aşırı öğrenme eğiliminde olmadığını ve genelleme yeteneğinin korunduğunu desteklemektedir. Ayrıca, normalize edilmiş kalıntı analizleri sonucunda büyük tahmin değerlerinde varyans artışı gözlenmiş olsa da bu durum, klasik overfitting tanımına karşılık gelmemektedir; aksine modelin bazı uç değerlerde doğal sapma eğilimi gösterdiğini, ancak genelde güvenilir tahminler sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, yüksek R^2 değerleri modelin öğrenme kapasitesini yansıtmaktadır ve overfitting'e işaret eden belirgin bir kanıt bulunmamaktadır. Bununla birlikte, modelin uç değerlerdeki davranışları ve tahmin kararlılığı ilerleyen çalışmalarda farklı test kümeleri ve alternatif düzenleme stratejileri ile daha ayrıntılı olarak incelenebilir.

Literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak, makine öğrenimi tabanlı yaklaşımlar, termodinamik modellere kıyasla hem hesaplama süresi hem de doğruluk açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, veri setindeki değişkenlerin dağılımı, normalizasyon süreçleri ve model hiperparametrelerinin optimizasyonu, elde edilen sonuçların başarısını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Özellikle, yüksek standart sapmaya sahip basınç değerleri gibi uç değerlere karşı modellerin duyarlılığı, tahmin performansı üzerinde belirleyici olmuştur.

Tüm modellerin R^2 değerlerinin oldukça yüksek olduğu ve doğrusal ilişkiyi güçlü biçimde yakalayabildiği görülmektedir. Ancak hata metrikleri (MAE ve RMSE) dikkate alındığında, modeller arasında belirgin farklılıklar mevcuttur. Random Forest Regressor modeli, en düşük MAE (4.546) ve RMSE (15.552) değerleri ile en başarılı tahmin performansını sergilemiştir. Bu sonuç, çoklu ağaç yapısının aşırı öğrenmeyi önlemede ve genelleme kapasitesini artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Decision Tree modeli de yüksek doğruluk göstermesine rağmen, tekil ağaç yapısı nedeniyle sınırlı genelleme kapasitesine sahiptir. XGBoost modeli ise teorik olarak gelişmiş bir algoritma olmasına rağmen bu çalışmada yüksek MAE

(16.212) ve RMSE (47.394) değerleriyle göreceli zayıf bir performans sergilemiştir. Bu durum, modelin hiperparametre hassasiyetine ve belirli veri dağılımlarında gösterdiği kararsızlığa işaret edebilir. Bu bulgular, literatüre önemli bir karşılaştırmalı katkı sunmakta olup, özellikle regresyon temelli kestirim problemlerinde doğru algoritma seçiminin model başarımı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonuçları, mühendislik uygulamalarında, özellikle sistem performansının tahmini, süreç optimizasyonu ve veri temelli karar destek sistemlerinin geliştirilmesi açısından pratik bir referans oluşturmaktadır.

Çalışmada kullanılan üç farklı makine öğrenmesi modelinin (Decision Tree, Random Forest, XGBoost), 5 katmanlı çapraz doğrulama sürecinde elde ettiği performans metrikleri (RMSE, MAE ve R^2) üzerinde tek yönlü ANOVA (One-Way ANOVA) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile modellerin hata ve doğruluk ölçütleri açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterip göstermediği test edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 12'de özetlenmiştir. RMSE ($F = 150.5844$, $p = 0.0000$), MAE ($F = 307.7429$, $p = 0.0000$) ve R^2 ($F = 189.3405$, $p = 0.0000$) metriklerinin tamamı için p-değerleri 0.05 anlamlılık düzeyinin oldukça altında bulunmuş; bu da modellerin performansları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, yalnızca ortalama hata ve doğruluk değerlerine değil, aynı zamanda varyans yapısına dayalı karşılaştırmalarla da modellerin birbirinden ayrıldığını ortaya koymaktadır. Özellikle Random Forest modelinin RMSE ve MAE açısından diğer yöntemlere göre daha düşük hata değerleriyle öne çıktığı ve bu başarımlarının istatistiksel olarak da desteklendiği görülmüştür. R^2 metriğindeki fark da anlamlı bulunmuş olup, modellerin doğruluk düzeylerinde de istatistiksel farklılıklar olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu analiz, yöntemler arası kıyaslamaların nesnel biçimde yapılmasını sağlamış ve çalışmanın bilimsel güvenilirliğini önemli ölçüde artırmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürde benzer amaçla gerçekleştirilen çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça başarılı bulunmuştur. Reimer (2024) tarafından Otto tipi içten yanmalı motorlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmada çok değişkenli lineer regresyon (MvLR) ve yapay sinir ağları (ANN) yöntemleri kullanılmış; ANN ile 0.9973 R^2 skoru ve 0.2126 Bar² MSE elde edilmiştir. Sontheimer et al. (2023) tarafından HCCI motorları üzerinde yapılan çalışmada ise uzun kısa süreli bellek (LSTM) mimarisi ile 0.20 MSE ve 0.37 MAE değerlerine ulaşılmıştır. Öte yandan Patil ve Theotokatos (2023), deniz dizel motorlarında Fourier serileri üzerinden ANN ile gerçekleştirilen modellemelerde ± 0.2 bar civarında RMSE elde etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan Random Forest ve Decision Tree modelleri ile test verisi üzerinde sırasıyla $R^2 = 0.9999$, MAE = 4.546 ve RMSE = 15.552 gibi oldukça düşük hata değerleri elde edilmiştir.

Tablo 13 Literatürde yapılan güncel çalışmalar.

Makale	Yöntem	Uygulama	MSE	R ²	MAE
[30]	MvLR, ANN	Otto (SI-ICE)	0.2126 Bar ² (ANN)	0.9973 (ANN)	-
[19]	LSTM, DNN	HCCI	0.20 (LSTM)	-	0.37 (LSTM)
[31]	Linear, Elastic, Polynomial, SVM, DT, ANN	Marine Diesel	±0.2 Bar (ANN)	-	-

Bu değerler, sadece doğruluk açısından değil, aynı zamanda genelleme yeteneği bakımından da Random Forest modelinin literatürdeki gelişmiş yapay zeka teknikleriyle kıyaslandığında oldukça rekabetçi ve hatta bazı açılardan üstün olduğunu göstermektedir. Ayrıca, modelin sade yapısı ve hesaplama maliyetinin düşük olması, onu özellikle gerçek zamanlı uygulamalar açısından güçlü bir aday haline getirmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, makine öğrenimi yöntemlerinin dizel motor performansı ve emisyon kontrolü gibi kritik alanlarda güçlü bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Ancak, modellerin daha geniş bir veri setiyle ve farklı motor tiplerinde test edilmesi, elde edilen bulguların genellenebilirliğini artıracaktır. Ayrıca, gelecekteki çalışmalar, derin öğrenme yöntemlerini ve daha karmaşık zaman serisi modellerini içerecek şekilde genişletilebilir. Bu sayede, dizel motorların yanma süreçlerini ve emisyon dinamiklerini daha iyi anlamaya yönelik daha kapsamlı tahmin sistemleri geliştirilebilir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

[1] E. Alptekin, “Metil ve Etil Ester Kullanılan Bir Common-Rail Dizel Motorda Performans, Yanma ve Enjeksiyon Karakteristiklerinin Karşılaştırılması”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., c. 21, sy 2, s. 578, Şub. 2017.

[2] J. F. Dunne ve C. Bennett, “A crank-kinematics-based engine cylinder pressure reconstruction model”, Int. J. Engine Res., c. 21, sy 7, ss. 1147-1161, Eyl. 2020.

[3] Y. Lee, S. Lee, ve K. Min, “Semi-empirical estimation model of in-cylinder pressure for compression ignition engines”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng., c. 234, sy 12, ss. 2862-2877, Eki. 2020.

[4] W. Jeon vd., “Accelerometer-Based Robust Estimation of In-Cylinder Pressure for Cycle-to-Cycle Combustion Control”, IEEE Trans. Instrum. Meas., c. 72, ss. 1-13, 2023.

[5] S. Kulah, A. Forrai, F. Rentmeester, T. Donkers, ve F. Willems, “Robust cylinder pressure estimation in heavy-duty diesel engines”, Int. J. Engine Res., c. 19, sy 2, ss. 179-188, Şub. 2018.

[6] R. Ristow Hadlich, J. Loprete, ve D. Assanis, “A Deep Learning Approach to Predict In-Cylinder Pressure of a Compression Ignition Engine”, J. Eng. Gas Turbines Power, ss. 1-12, Oca. 2024.

[7] C. Patil ve G. Theotokatos, “Comparative Analysis of Data-Driven Models for Marine Engine In-Cylinder Pressure Prediction”, Machines, c. 11, sy 10, s. 926, Eyl. 2023.

[8] J. Castresana, G. Gabiña, L. Martin, ve Z. Uriondo, “Comparative performance and emissions assessments of a single-cylinder diesel engine using artificial neural network and thermodynamic simulation”, Appl. Therm. Eng., c. 185, s. 116343, Şub. 2021.

[9] B. Lee ve D. Jung, “Thermodynamics-based mean-value engine model with main and pilot injection sensitivity”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng., c. 230, sy 13, ss. 1822-1834, Ağu. 2016.

[10] H. Cho, B. Fulton, D. Upadhyay, T. Brewbaker, ve M. van Nieuwstadt, “In-cylinder pressure sensor-based NOx model for real-time application in diesel engines”, Int. J. Engine Res., c. 19, sy 3, ss. 293-307, Nis. 2017.

[11] J. Höller vd., “Parameter Estimation Strategies in Thermodynamics”, ChemEngineering, c. 3, sy 2, s. 56, Haz. 2019.

[12] C. Mährle, S. Held, S. Huber, ve G. Wachtmeister, “A new method to determine the causes of deviation in cylinder pressure curves of motored reciprocating piston engines”, Int. J. Engine Res., c. 23, sy 2, ss. 243-261, Oca. 2021.

[13] C. Jorques Moreno, O. Stenlaas, ve P. Tunestal, “Cylinder Pressure-Based Virtual Sensor for In-Cycle Pilot Mass Estimation”, SAE Int. J. Engines, c. 11, sy 6, ss. 1167-1182, Nis. 2018.

[14] R. Ristow Hadlich, J. Loprete, ve D. Assanis, “A Deep Learning Approach to Predict In-Cylinder Pressure of a Compression Ignition Engine”, J. Eng. Gas Turbines Power, ss. 1-12, Oca. 2024.

[15] C. Patil ve G. Theotokatos, “Comparative Analysis of Data-Driven Models for Marine Engine In-

- Cylinder Pressure Prediction”, *Machines*, c. 11, sy 10, s. 926, Eyl. 2023.
- [16] R. Ristow Hadlich, J. Loprete, ve D. Assanis, “A Deep Learning Approach to Predict In-Cylinder Pressure of a Compression Ignition Engine”, *J. Eng. Gas Turbines Power*, ss. 1-12, Oca. 2024.
- [17] E. Aslan ve Y. Özüpak, “Comparison of machine learning algorithms for automatic prediction of Alzheimer disease”, *J. Chin. Med. Assoc.*, c. 88, sy 2, ss. 98-107, Şub. 2025.
- [18] E. Aslan, “Temperature Prediction and Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors Using Different Machine Learning Techniques for Early Failure Detection”, *Eksplot. Niezawodn. – Maint. Reliab.*, c. 27, sy 1, Ağu. 2024.
- [19] M. Sontheimer, A.-K. Singh, P. Verma, S.-Y. Chou, ve Y.-L. Kuo, “LSTM for Modeling of Cylinder Pressure in HCCI Engines at Different In take Temperatures via Time-Series Prediction”, *Machines*, c. 11, sy 10, s. 924, Eyl. 2023.
- [20] X. Jin, P. Cheng, W.-L. Chen, ve H. Li, “Prediction model of velocity field around circular cylinder over various Reynolds numbers by fusion convolutional neural networks based on pressure on the cylinder”, *Phys. Fluids*, c. 30, sy 4, Nis. 2018.
- [21] S. A. Ali ve S. Saraswati, “Cycle-by-cycle estimation of cylinder pressure and indicated torque waveform using crankshaft speed fluctuations”, *Trans. Inst. Meas. Control*, c. 37, sy 6, ss. 813-825, Eyl. 2014.
- [22] S. Trimby, J. F. Dunne, C. Bennett, ve D. Richardson, “Unified approach to engine cylinder pressure reconstruction using time-delay neural networks with crank kinematics or block vibration measurements”, *Int. J. Engine Res.*, c. 18, sy 3, ss. 256-272, Tem. 2016.
- [23] Q. Huang, J. Liu, C. Ulishney, ve C. E. Dumitrescu, “On the use of artificial neural networks to model the performance and emissions of a heavy-duty natural gas spark ignition engine”, *Int. J. Engine Res.*, c. 23, sy 11, ss. 1879-1898, Tem. 2021.
- [24] F. Zhao ve D. L. S. Hung, “Applications of machine learning to the analysis of engine in-cylinder flow and thermal process: A review and outlook”, *Appl. Therm. Eng.*, c. 220, s. 119633, Şub. 2023.
- [25] M. Henningsson, P. Tunestål, ve R. Johansson, “A Virtual Sensor for Predicting Diesel Engine Emissions from Cylinder Pressure Data”, *IFAC Proc. Vol.*, c. 45, sy 30, ss. 424-431, 2012.
- [26] D. P. Viana vd., “Diesel Engine Fault Prediction Using Artificial Intelligence Regression Methods”, *Machines*, c. 11, sy 5, s. 530, May. 2023.
- [27] E. Tian, G. Lv, ve Z. Li, “Evaluation of emission of the hydrogen-enriched diesel engine through machine learning”, *Energy*, c. 307, s. 132303, Eki. 2024.
- [28] W. N. Wan Mansor, S. Abdullah, M. N. K. Jarkoni, J. S. Vaughn, ve D. B. Olsen, “Data on combustion, performance and emissions of a 6.8 L, 6-cylinder, Tier II diesel engine”, *Data Brief*, c. 33, s. 106580, Ara. 2020.
- [29] E. Aslan, “Prediction and Comparative Analysis of Emissions from Gas Turbines Using Random Search Optimization and Different Machine Learning Based Algorithms”, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, ss. 151956-151956, Eyl. 2024.
- [30] G. Reimer, “Online in-cylinder pressure and temperature prediction using a modeling approach: Masters Thesis”.
- [31] C. Patil ve G. Theotokatos, “Comparative Analysis of Data-Driven Models for Marine Engine In-Cylinder Pressure Prediction”, *Machines*, c. 11, sy 10, s. 926, Eyl. 2023.

Bilişsel Haritalar ve Mekân Algısı: ODTÜ Kampüsü Üzerine Bir İnceleme

Neşe AYDIN^{*1}, Elvan KUMTEPE², Aynur Uluç KEÇİK³

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Isparta, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Ankara, Türkiye

³Bağımsız Araştırmacı - Stockholm, İsveç

(Alınış / Received: 06.03.2025, Kabul / Accepted: 24.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Bilişsel Harita,
Mekân Algısı,
ODTÜ Kampüsü,
Mekânsal Farkındalık

Öz: Bu çalışma, ODTÜ Şehir ve Bölge Planlama Bölümü öğrencilerinin ODTÜ kampüsüne dair bilişsel haritalarını inceleyerek, mekân algılarının nasıl şekillendiğini ve bu algıların duygusal bağlamlarla nasıl ilişkilendiğini anlamayı amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, öğrencilerin bilişsel haritalarında en sık vurgulanan mekânlar arasında Mimarlık Fakültesi, Devrim Stadyumu ve Çatı Kafe öne çıkmıştır. Bulgular, bu mekânların öğrenciler için hem fiziksel hem de duygusal bağlamda önemli olduğunu göstermektedir. Özellikle Devrim Stadyumu ve Çatı Kafe, genellikle olumlu duygularla ilişkilendirilirken, Mimarlık Fakültesi hem olumlu hem de olumsuz duygularla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, açık ve yeşil alanların öğrenciler tarafından rahatlatma ve sosyalleşme mekânları olarak algılandığı görülmüştür. Sınıf seviyelerine göre duygusal bağlamda farklılıklar gözlemlenmiş, birinci sınıf öğrencilerinin akademik mekânları daha çok stresle ilişkilendirdiği, dördüncü sınıf öğrencilerinin ise kampüsle daha nostaljik bir bağ kurduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, bilişsel haritalama yöntemiyle elde edilen mekânsal ve duygusal verilerin, kampüs tasarımı ve planlama süreçlerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Cognitive Maps and Spatial Perception: A Study on the METU Campus

Keywords

Cognitive Map,
Spatial Perception,
METU Campus,
Spatial Awareness

Abstract: This study aims to examine the cognitive maps of students from the Department of City and Regional Planning at METU, focusing on how their spatial perceptions of the METU campus are shaped and how these perceptions are related to emotional contexts. The findings reveal that the most frequently highlighted locations in students' cognitive maps are the Faculty of Architecture, Devrim Stadium, and Çatı Café. These locations hold significant importance for students both physically and emotionally. While Devrim Stadium and Çatı Café are generally associated with positive emotions, the Faculty of Architecture is linked to both positive and negative emotions. Additionally, open and green spaces are perceived as areas for relaxation and socialization. Emotional differences were observed across class levels, with first-year students associating academic spaces more with stress, while fourth-year students developed a more nostalgic connection to the campus. This study demonstrates that spatial and emotional data obtained through cognitive mapping can contribute to campus design and planning processes.

1. Giriş

Çalışma, ODTÜ İnsan Araştırmaları Etik Kurulu tarafından 06.06.2018 tarihinde 2018-FEN-031 protokol numarasıyla onaylanmıştır.

Mekân algısı, bireylerin çevreleriyle kurdukları ilişkilerin ve bu çevreye dair zihinsel temsillerinin bir yansımasıdır. Bu temsillerin oluşumunda morfoloji ve mekân kalitesi [1] önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, bilişsel haritalar (cognitive maps), bireylerin mekânsal çevrelerini nasıl algıladıklarını ve bu algıların duygusal bağlarla nasıl şekillendiğini anlamak için etkili bir araç olarak öne çıkar. Bilişsel harita, bireylerin günlük mekânsal çevrelerindeki nesnelerin, olayların ve ilişkilerin konumlarına dair bilgileri edinme, depolama, hatırlama ve çözümleme süreçlerine dayanan bir kavramdır. Kısaca, bilişsel haritalama, bireylerin mekânsal bilgiyi düşüncelerinde içselleştirip yeniden yapılandırma sürecidir. Bu tanım, Downs ve Stea (1973) tarafından önerilen geleneksel tanıma dayanmaktadır. Bilişsel haritalama, mekânsal biliş ve çevresel bilişin birleşimi olarak düşünülebilir. Mekânsal biliş, bir kişinin çevresindeki mekânların yapısı, varlıkları ve ilişkileri hakkında sahip olduğu içsel veya bilişsel temsili ifade ederken; çevresel biliş, bireylerin ortamlar hakkında sahip oldukları bilgi, imaj, izlenim ve inançları kapsar [2,3]. Bu iki kavramın birleşimi, bireylerin çevrelerini anlamlandırma ve yön bulma süreçlerini şekillendirir.

Bilişsel haritalama yöntemi, bireylerin çevrelerini nasıl algıladıklarını ve bu algıların mekânsal ve duygusal bağlarla nasıl şekillendiğini anlamak için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, bireylerin çevrelerine dair zihinsel temsillerini görselleştirmelerine olanak tanır. Bu temsillerin analizi, mekânsal algı, yön bulma, duygusal bağlar ve mekânın bireyler üzerindeki etkileri gibi konulara ışık tutar. Örneğin, Kevin Lynch (1960), "cognitive urban image" kavramıyla bireylerin kentlere dair zihinsel imgelerini beş temel fiziksel unsur (yollar, sınırlar, bölgeler, düğüm noktaları ve referans noktaları) üzerinden sınıflandırmıştır [4]. Bu unsurlar, bireylerin çevrelerini anlamlandırmalarında ve yön bulmalarında kritik bir rol oynar. Benzer şekilde, Tversky (2003), bilişsel haritaların bireylerin mekânsal algılarını ve yön bulma stratejilerini anlamada önemli bir araç olduğunu vurgulamıştır. Bilişsel haritalama yöntemi, yalnızca şehir planlama değil, çevresel psikoloji, mimarlık ve coğrafya gibi disiplinlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır [5,6,7]. Bu yöntem, bireylerin çevreyle kurdukları ilişkileri anlamak ve mekânsal algının nasıl şekillendiğini ortaya koymak için disiplinler arası bir yaklaşım sunar.

Bununla birlikte, çevreyle kurulan ilişki yalnızca fiziksel öğelerle sınırlı değildir; mekânın anlamı, deneyim ve kimlik bağlamında da şekillenmektedir.

Edward Relph'in "place and placelessness" (1976) kavramı, bireylerin yaşantılarla biçimlenen "yer" deneyimini vurgularken; Norberg-Schulz (1980), "Genius Loci" (yerin ruhu) yaklaşımıyla, mekânların sadece fiziksel biçimlerinden değil, sahip oldukları atmosfer ve anlam katmanlarından da beslendiğini ortaya koyar [8,9]. Bu kuramsal çerçevede, mekân deneyimi, yalnızca gözleme değil, çoklu duyuşal ve duygusal katmanlara dayalı bir algıya dönüşmektedir. Pallasmaa'nın (2005) "The Eyes of the Skin" adlı çalışmasında savunduğu gibi, bireylerin mekâna dair algıları görsel ötesine taşan, dokunsal ve işitsel öğeleri de içeren bütüncül bir deneyimle biçimlenir [10]. Bu bağlamda bireylerin mekâna ilişkin algı ve deneyimleri sadece fiziksel çevreyle değil sosyal, duygusal ve duyuşal bileşenlerle de şekillenmektedir, nitekim Mulrooney ve Kelly'nin çalışması (2020) üniversite kampüslerinin yalnızca yapılardan ibaret olmayıp aidiyet duygusunun gelişimine katkı sağlayan sosyal ve duygusal mekânlar sunduğunu ortaya koymaktadır [11].

Bu kapsamda yapılan bilişsel haritalama araştırmaları, çevresel algının zaman, deneyim ve mekânsal bağlamla birlikte nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Ülkeryıldız, Arsan ve Akış (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, 56 öğrenciye hiç bilmedikleri bir tarihi rota gezdirilmiş ve bu rotaya dair haritalar ilk gün ve beş gün sonra tekrar çizdirilmiştir [12]. Haritaların karşılaştırılması sonucunda, çevresel algının zamanla ve deneyimle geliştiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Ege Üniversitesi kampüsünde 100 kişiyle yapılan bir çalışmada, bilişsel haritalar öge sayısı, çizime başlama noktası ve stil gibi kriterlere göre değerlendirilmiştir. Bu çalışma, mekânsal fonksiyonların ve mekân kullanımının, bireylerin zihinsel temsillerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur [13]. Herman, Kail ve Siegel (1979) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, okula yeni başlayan 66 öğrenciye, kampüs alanında okulun ilk üç haftasında, üçüncü ayında ve altıncı ayında bilişsel haritalar çizdirilmiştir [14]. Çalışma, üç hafta gibi kısa bir sürede kampüsteki referans noktalarının, rotaların ve yapısal bilgilerin zihinde yüksek derecede oturduğunu göstermiştir. Selçuk Üniversitesi kampüsünde yapılan bir başka çalışmada ise 30 öğrencinin bilişsel haritaları değerlendirilmiş ve bu haritalar üzerinden kampüs tasarımı için ipuçları sunulmuştur [15]. Son olarak, Albayrak'ın (2023) ODTÜ Ankara Kampüsü ve Mimarlık Fakültesi özelinde gerçekleştirdiği yüksek lisans tezi, kolektif ve bireysel belleğin mekânsal katmanlarını hem kuramsal hem de ampirik düzlemde ele alarak, bilişsel haritalar ve yarı yapılandırılmış görüşmeler aracılığıyla kullanıcıların bellek odaklı mekânsal deneyimlerini çok boyutlu biçimde incelemiştir [16]. Bu örnekler, bireysel çevre algılarının yalnızca akademik bir konu değil, aynı zamanda mekânsal planlama ve tasarım süreçlerine

doğrudan katkı sağlayabilecek bir bilgi kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, ODTÜ Şehir ve Bölge Planlama Bölümü öğrencilerinin ODTÜ kampüsüne dair bilişsel haritalarını inceleyerek, mekân algılarının nasıl şekillendiğini ve bu algıların duygusal bağlarla nasıl ilişkilendiğini anlamayı amaçlamaktadır. Araştırma, öğrencilerin bilişsel haritalarında ODTÜ kampüsündeki hangi mekânların daha sık vurgulandığını, olumlu ve olumsuz duyguların mekânsal dağılımını ve sınıf seviyelerine göre duygusal bağlamda bir değişim olup olmadığını ortaya koymayı hedeflemektedir. Kampüs alanlarında gerçekleştirilen diğer bilişsel harita çalışmalarından farklı olarak, bu çalışmada mekânlara atfedilen duygular da detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca mekân tasarımı eğitimi alan farklı düzeylerdeki Şehir ve Bölge Planlama öğrencilerinin seçilmesi, sınıf seviyelerine göre mekânsal algı ve duygular ilişkisini inceleme açısından önemli bulgular sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, literatüre önemli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Araştırma kapsamında nitel bir yöntem olan bilişsel haritalama tekniği kullanılmıştır. Bu teknik, bireylerin fiziksel çevrelerini zihinsel temsiller aracılığıyla ifade etmelerine olanak sağlamaktadır. Öğrencilerden kampüsle ilgili algılarını, deneyimlerini ve bu mekânlara dair hissettikleri duyguları haritalar üzerinden ifade etmeleri istenmiştir. Böylece kampüs mekânlarının bireysel anlamları ve duygusal yansımaları görsel ve mekânsal olarak analiz edilebilir hâle getirilmiştir.

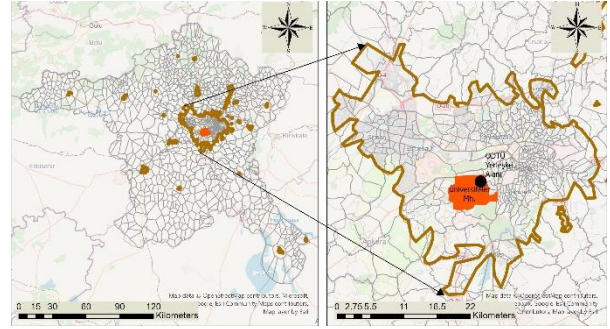
Araştırma, 2018 güz döneminde, ODTÜ Şehir ve Bölge Planlama Bölümü'nde öğrenim gören ve çalışmaya gönüllü olarak katılım sağlayan 120 öğrenci ile gerçekleştirilmiştir. Katılımcılar tamamen gönüllülük esasına göre belirlenmiş ve istedikleri zaman çalışmadan çekilme hakları olduğu açıkça belirtilmiştir.

2.1. Araştırma alanı: ODTÜ Kampüsü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) kampüsü, Ankara'da yaklaşık 4500 hektarlık geniş bir alan üzerine kurulmuş olup, Türkiye'nin en büyük üniversite kampüslerinden biridir. Bu çalışma kapsamında ele alınacak olan bölge, Üniversiteler Mahallesi sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1).

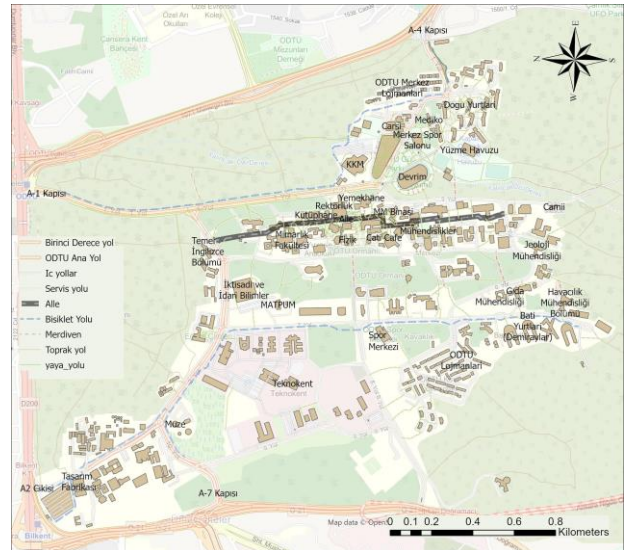
Kampüs, doğal ve yapı çevrenin uyum içinde bir araya geldiği hem akademik hem de sosyal yaşamı destekleyen bir mekânsal yapıya sahiptir. Yoğun yeşil alanları ve ormanlık bölgeleriyle dikkat çeken ODTÜ kampüsü, aynı zamanda modern mimariyle de öne çıkmaktadır. Kampüs içerisinde yer alan fakülteler, laboratuvarlar, kütüphane, spor tesisleri, yurtlar ve

sosyal alanlar, öğrencilerin akademik ve sosyal ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca hem öğrencilerin hem de akademik ve idari personelin konaklama ihtiyacını karşılamak amacıyla yurtlar, lojmanlar ve konukevleri bulunmaktadır.



Şekil 1. Araştırma alanının Ankara'daki konumu, mahalle sınırları ve ODTÜ Yerleşke Alanı (Not: Harita yazarlar tarafından ABB verileri kullanılarak hazırlanmıştır, ODTÜ Yerleşke Alanı temsili olarak belirtilmiştir.)

Kampüse iki metro durağından giriş yapılabilmektedir: ODTÜ istasyonu kampüsün A1 girişine, Bilkent istasyonu ise A2 girişine denk gelmektedir. Bunun yanı sıra, Yüzüncü Yıl Mahallesi'ne çıkış sağlayan A4 kapısı ve Teknokent çıkışı olarak bilinen A7 kapısı da sıkça kullanılmaktadır. Kampüsün merkezi bölgeleri, öğrencilerin yoğun olarak kullandığı yemekhane, kütüphane, Devrim Stadyumu ve Kültür ve Kongre Merkezi gibi önemli mekânları barındırırken, çevresel bölgelerde daha sakin ve doğal alanlar yer almaktadır. Fakülteleri birbirine bağlayan ve öğrenciler tarafından sıklıkla kullanılan yaya yolu "Alle" (Şekil 2), kampüsün önemli bir bağlantı aksını oluşturmaktadır. Kampüsün yolları ve açık alanları hem yaya hem de araç trafiğini kolaylaştıracak şekilde düzenlenmiştir.



Şekil 2. ODTÜ Kampüsü

Bu mekânsal çeşitlilik, ODTÜ kampüsünü yalnızca bir eğitim alanı değil, aynı zamanda öğrencilerin ve çalışanların günlük yaşamlarını şekillendiren bir çevre haline getirmektedir. Kampüsün bu özellikleri, bilişsel

haritalama çalışmaları için zengin bir bağlam sunmaktadır.

2.2. Veri toplama

Araştırma kapsamındaki veriler, katılımcılara dağıtılan A3 boyutundaki kağıtlara ODTÜ kampüsüne dair zihinsel temsillerini çizimleri istenerek toplanmıştır. Haritalama çalışması, belirli bir protokol çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Katılımcılardan, kampüsle ilgili hatırladıkları mekânları, bu mekânlara dair duygusal bağlamları ve kişisel deneyimlerini yansıtmaları talep edilmiştir. Çizimlerde, belirli mekânların neden hatırlandığı ve bu mekânların katılımcılar için ne ifade ettiğinin görselleştirilmesi teşvik edilmiştir. Haritaların, bina, yol, ağaç, heykel gibi fiziksel unsurların yanı sıra, duygusal ifadeler (örneğin, emoji) ve sembollerle zenginleştirilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, haritaların daha anlaşılır olması için katılımcılardan haritalarına lejant eklemeleri istenmiştir. Bu lejantın, haritada kullanılan sembollerin ve ifadelerin anlamlarını açıklaması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmanın maksimum 20 dakika içinde tamamlanması gerektiği ve haritalar çizilirken herhangi bir çevrimiçi kaynak ya da haritadan yararlanılmaması gerektiği açıkça belirtilmiştir.

Araştırmaya, birinci sınıftan 42, ikinci sınıftan 33, üçüncü sınıftan 23 ve dördüncü sınıftan 22 öğrenci katılmıştır. Toplamda 120 bilişsel harita elde edilmiştir. Katılımcıların sınıf seviyelerine göre dağılımı, mekânsal ve duygusal farklılıkların analizinde dikkate alınmıştır.

2.3. Verilerin analizi

Çizilen haritalar detaylı bir şekilde incelenmiş ve her bir haritada yer alan mekânlar kaydedilmiştir. Mekânların olumlu, olumsuz ya da nötr duygularla ilişkilendirilip ilişkilendirilmediği ve bu duyguların detayları (örneğin; yemek, doğa, sosyal etkileşim gibi) not edilmiştir. Ayrıca, sınıf seviyelerine göre duygusal bağlamlardaki değişimler de analiz edilmiştir. Haritalarda yer alan duygusal bağlamlar, çalışmanın önemli bir veri kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

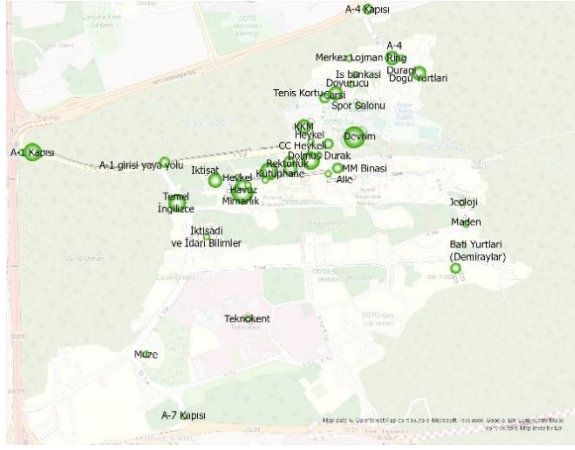
Toplanan veriler, nitel ve nicel analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. İlk olarak, haritalarda belirtilen tüm mekânlar bir Excel dosyasına aktarılmıştır. Bu dosyada, her bir mekânın haritalarda yer alma sıklığı, olumlu ve olumsuz duygularla ilişkilendirilme durumu ve bu duyguların detayları kaydedilmiştir. Ayrıca, sınıf seviyelerine göre mekânların dağılımı ve bu mekânlara yönelik duygusal bağlamdaki değişimler de dosyada düzenlenmiştir. Haritalarda mekânlara yönelik duyguları ifade eden cümleler varsa, bu ifadeler de nitel analize dahil edilmek üzere kaydedilmiştir.

Son olarak, hangi mekânların daha sık vurgulandığını, olumlu ve olumsuz duyguların mekânsal dağılımını ve sınıf seviyelerine göre duygusal bağlamda bir değişim olup olmadığını ortaya koymak amacıyla Excel dosyasındaki veriler ArcGIS ortamına aktarılmıştır. Bu veriler kullanılarak, her sınıf için bilişsel haritalarda sıklıkla yer verilen mekânlar ve bu mekânlarla ilişkilendirilen olumlu ya da olumsuz duyguların dağılımını gösteren sıklık haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar, mekânsal ve duygusal farklılıkların görselleştirilmesi ve analiz edilmesi için kullanılmıştır.

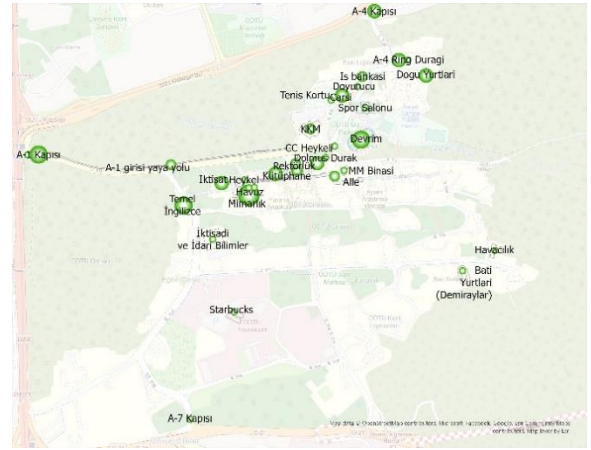
3. Bulgular

Araştırma kapsamında, birinci sınıf öğrencilerinin bilişsel haritalarında bahsi geçen mekânlar Şekil 4'te, ikinci sınıf öğrencilerin Şekil 5'te, üçüncü sınıf öğrencilerin Şekil 6'da ve dördüncü sınıf öğrencilerin Şekil 7'de sunulmaktadır. Genel olarak, en sık vurgulanan mekânlar arasında Mimarlık Fakültesi, Devrim Stadyumu ve Çatı Kafe öne çıkmıştır (Şekil 11). Özellikle Mimarlık Fakültesi, tüm sınıf seviyelerinde en çok hatırlanan mekânlardan biri olmuştur. Birinci sınıf katılımcılarının %48'i bu mekânı vurgularken, ikinci sınıftan itibaren bu oran %91'de sabitlenmiştir. Devrim Stadyumu ise birinci sınıf öğrencilerinin %36'sı tarafından vurgulanmış, bu oran ikinci sınıfta %70'e, üçüncü sınıfta %87'ye ve dördüncü sınıfta %91'e ulaşmıştır. Çatı Kafe, birinci sınıf öğrencilerinin %33'ü tarafından vurgulanırken, ikinci sınıfta %45'e, üçüncü sınıfta %43'e ve dördüncü sınıfta %41'e ulaşmıştır.

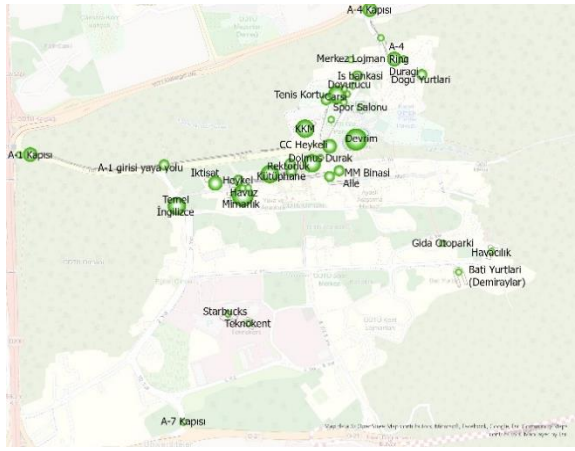
Sınıf bazında değerlendirildiğinde, birinci sınıf öğrencilerinin bilişsel haritalarında en çok bahsi geçen mekânlar sırasıyla Mimarlık Fakültesi (%48), Devrim Stadyumu (%36), Çatı Kafe (%33), A-1 Kapısı (%26), Yemekhane (%26), Temel İngilizce Bölümü (%21), Kütüphane (%21), İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi A Blok (%19) ve Fizik Çimlery (%19) olmuştur. İkinci sınıf öğrencilerinin bilişsel haritalarında ise en çok vurgulanan mekânlar sırasıyla Mimarlık Fakültesi (%91), Devrim Stadyumu (%70), A-1 Kapısı (%58), Temel İngilizce Bölümü (%53), Çatı Kafe (%45), Yemekhane ve Çarşı (%33), Kütüphane (%36), İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi A Blok, Doğu Yurtları ve A-4 Kapısı (%30), Sunshine ve Kocatepe Kafeleri (%27) ile Fizik Çimlery ve KKM (%24) olmuştur. Üçüncü sınıf öğrencilerinin bilişsel haritalarında en çok bahsi geçen mekânlar ise Mimarlık Fakültesi (%91), Devrim Stadyumu (%87), Yemekhane (%65), Kütüphane (%61), Çarşı (%57), Temel İngilizce Bölümü (%52), KKM (%48), Çatı, Sunshine ve Kocatepe Kafeleri (%43), A-1 Kapısı (%39), İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi A Blok, A-4 Kapısı ve Devrim Stadyumu'nun önünde yer alan (öğrenciler tarafından CC Heykeli olarak bilinen) heykel (%31), Doğu Yurtları, Rektörlük ve Kimya Bölümü (%26), Matematik ve Fizik Bölümleri, Merkez Mühendislik Binası, Tenis Kortları, Mediko ve Mimarlık girişinde bulunan sarı, kırmızı ve turuncu üç



Şekil 3. 1. Sınıf öğrencilerin bilişsel haritalarında bahsi geçen bütün mekânlar



Şekil 4. 2. Sınıf öğrencilerin bilişsel haritalarında bahsi geçen bütün mekânlar



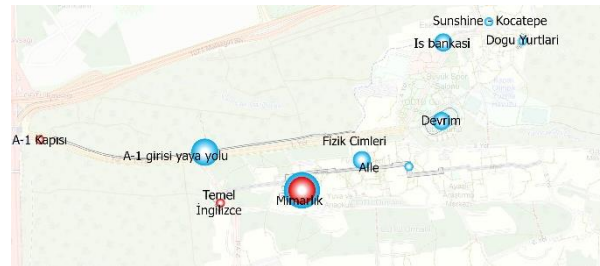
Şekil 5. 3. Sınıf öğrencilerin bilişsel haritalarında bahsi geçen bütün mekânlar



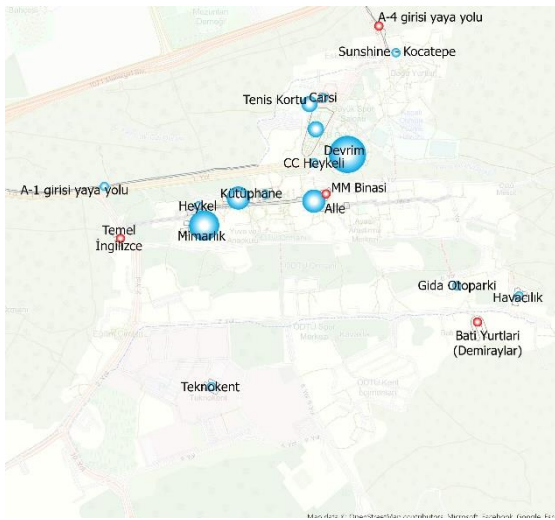
Şekil 6. 4. Sınıf öğrencilerin bilişsel haritalarında bahsi geçen bütün mekânlar



Şekil 7. 1. Sınıf bilişsel haritalarında olumlu (mavi) ve olumsuz (kırmızı) bahsi geçen mekânlar



Şekil 8. 2. Sınıf bilişsel haritalarında olumlu (mavi) ve olumsuz (kırmızı) bahsi geçen mekânlar



Şekil 9. 3. Sınıf bilişsel haritalarında olumlu (mavi) ve olumsuz (kırmızı) bahsi geçen mekânlar

çubuktan oluşan heykel (%24) olmuştur. Dördüncü sınıf öğrencilerinin bilişsel haritalarında ise en çok vurgulanan mekânlar Mimarlık Fakültesi ve Devrim Stadyumu (%91), Çarşı (%73), Kütüphane (%50), KKM (%45), Çatı Kafe (%41), Merkez Mühendislik Binası (%36), Temel İngilizce Bölümü, Yemekhane ve A-1 ve A-4 Girişleri (%32), Doğu Yurtları ve CC Heykeli (%23) ile Fizik Çimliği (%18) olarak sıralanmıştır.

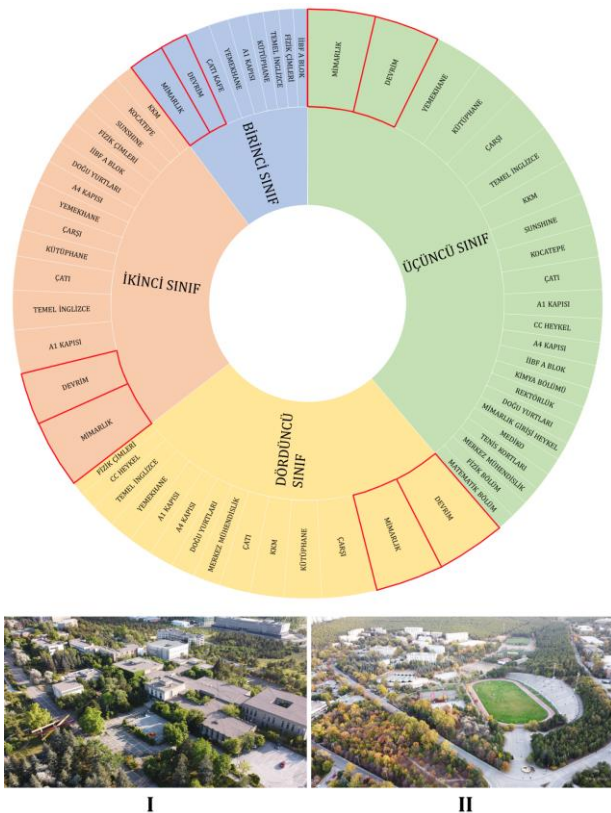


Şekil 10. 4. Sınıf bilişsel haritalarında olumlu (mavi) ve olumsuz (kırmızı) bahsi geçen mekânlar

Sınıf seviyeleri değiştikçe öğrencilerin bilişsel haritalarında bahsi geçen mekânların çeşitliliğinde ve sayısında artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 11). Birinci sınıf öğrencilerinin bilişsel haritalarında genellikle temel ihtiyaçlara yönelik mekânlar (örneğin, kendi fakülteleri, yemekhane, en yoğun kullanılan giriş kapıları) öne çıkarken, sınıf seviyeleri ilerledikçe sosyal, kültürel ve sanatsal mekânlara (örneğin, farklı fakülteler, yeşil alanlar, Kültür ve Kongre Merkezi, heykeller) yönelik farkındalıkların arttığı görülmektedir. Bu durum, öğrencilerin kampüsle kurdukları bağların zamanla genişlediğini ve mekânsal farkındalıklarının geliştiğini göstermektedir.

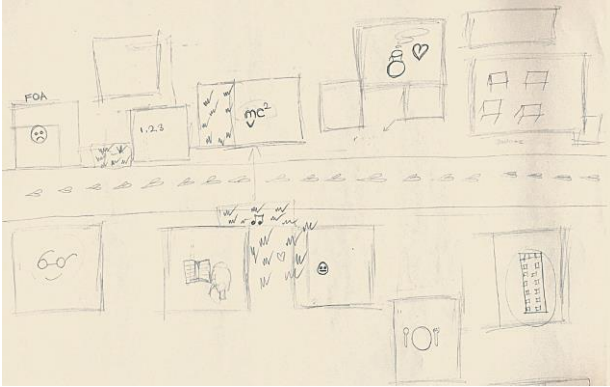
Mekânların duygusal bağlamda değerlendirilmesi, olumlu ve olumsuz duyguların mekânsal dağılımını ortaya koymuştur (Şekil 7, 8, 9, 10). Devrim Stadyumu, öğrenciler tarafından genellikle olumlu duygularla ilişkilendirilmiştir. Birinci sınıf öğrencileri bu mekânı 9 kez olumlu duygularla anarken, diğer sınıf seviyelerinde de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Stadyum, rahatlatma ve keyif alma mekânı olarak algılanmış ve öğrenciler tarafından genellikle boş zamanlarını geçirdikleri bir alan olarak tanımlanmıştır. Öğrencilerin bilişsel haritalarda Devrim Stadyumu ile ilgili yer verdikleri ifadeler arasında “pek gidemediğim ama gidip güneşte uzanmak istediğim bir yer” ve “kendimi özgür ve rahat hissettiğim yer” gibi tanımlamalar öne çıkmıştır. Benzer şekilde, Çatı Kafe de yemek ve sosyal etkileşim bağlamında olumlu duygularla ilişkilendirilmiştir. Öğrencilerin bilişsel haritalarda Çatı Kafe ile ilgili yer verdikleri ifadeler arasında “benim için arkadaşlarımla geçirdiğim uzun sohbetlerin mekânı” ve “yemek, sıcaklık” gibi tanımlamalar bulunmaktadır.

Buna karşın, Mimarlık Fakültesi, öğrencilerin hem sevdiği hem de özellikle jüri stresi ve yoğun çalışma temposu nedeniyle olumsuz duygularla ilişkilendirdiği bir mekân olarak karşımıza



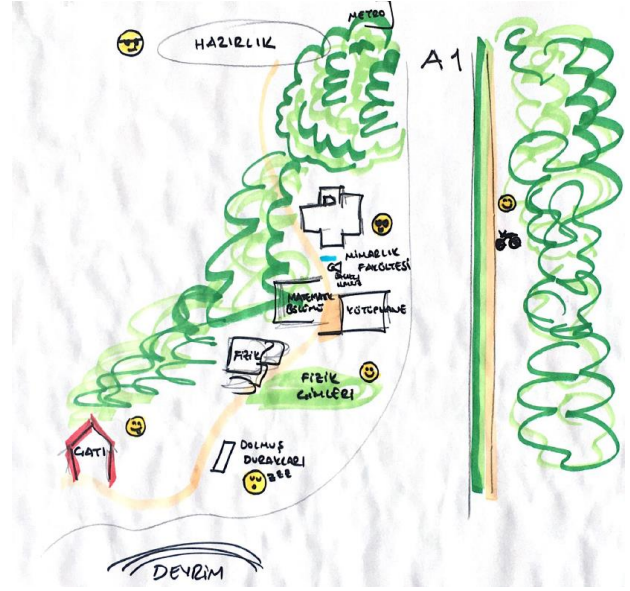
Şekil 11. Öğrencilerin Sınıf Seviyelerine Göre Bilişsel Haritalarında Sık Vurgulanan Mekânlar Dağılım Grafiği ve Tüm Sınıflar İçin En Sık Vurgulanan Mimarlık Fakültesi (I) ve Devrim (II) (Fotoğraflar https://erenefeoglu.tr/portfolio/adresinden_alinmistir) [17].

çıkılmaktadır. Burada dikkat çeken bir nokta, birinci sınıfta fakültenin daha çok olumsuz duygularla ilişkilendirilmesi (örneğin Şekil 12), ancak ikinci sınıftan itibaren bu oranın olumlu duygularla yer değiştirmesidir (örneğin Şekil 13). Birinci sınıf öğrencileri bu mekânı 9 kez olumsuz duygularla anarken, ikinci sınıf öğrencileri 3 kez ve dördüncü sınıf öğrencileri yalnızca 1 kez olumsuz duygularla anmıştır. Öğrencilerin bilişsel haritalarda Mimarlık Fakültesi ile ilgili yer verdikleri ifadeler arasında “stres, gerginlik”, “I feel very nervous there (Orada kendimi çok gergin hissediyorum)”, “kendimi özgür ve rahat hissettiğim yer” ve “home (ev)” gibi tanımlamalar bulunmaktadır. Ayrıca, Temel İngilizce Bölümü de yoğun ders temposu ve kalabalık nedeniyle olumsuz duygularla ilişkilendirilmiştir. Öğrencilerin bilişsel haritalarda Temel İngilizce Bölümü ile ilgili yer verdikleri ifadeler arasında “yoğun ders, kalabalık, toy insanlar” ve “sevmediğim yer” gibi tanımlamalar yer almıştır.



Şekil 12. 1.Sınıf haritalama çalışmasından bir örnek (FOA-Faculty of Architecture-Mimarlık Fakültesi)

Sınıf seviyelerine göre duygusal bağlamda belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Birinci sınıf öğrencileri, genellikle kampüsün sosyal alanlarına (örneğin, Çatı Kafe) ve merkezi mekânlarına (örneğin, Devrim Stadyumu) olumlu duygularla yaklaşmıştır. Ancak, akademik mekânlar (örneğin, Mimarlık Fakültesi) daha çok stres ve gerginlik gibi olumsuz duygularla ilişkilendirilmiştir. İkinci ve üçüncü sınıf öğrencilerinin kampüsle olan bağlarının daha dengeli olduğu görülmüştür. Örneğin, Mimarlık Fakültesi hem olumlu (kalp emoji) hem de olumsuz (stres) duygularla ilişkilendirilmiştir. Dördüncü sınıf öğrencileri ise kampüsle daha nostaljik ve olumlu bir bağ kurmuşlardır. Özellikle Devrim Stadyumu ve Çatı Kafe gibi mekânlar, genellikle keyifli anılar ve rahatlama ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 13. 2.Sınıf haritalama çalışmasından bir örnek

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, ODTÜ Şehir ve Bölge Planlama Bölümü öğrencilerinin ODTÜ kampüsüne dair bilişsel haritalarını inceleyerek, mekân algılarının nasıl şekillendiğini ve bu algıların duygusal bağlamlarla nasıl ilişkilendiğini anlamayı amaçlamıştır. Bulgular, öğrencilerin haritalarında bazı mekânların belirgin biçimde öne çıktığını ve bu mekânların hem olumlu hem de olumsuz duygularla ilişkilendirildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Mimarlık Fakültesi, Devrim Stadyumu ve Çatı Kafe gibi mekânlar, öğrencilerin zihinsel temsillerinde öne çıkmıştır. Bu durum, Lynch'in (1960) belirttiği gibi, bireylerin çevrelerini anlamlandırmalarında belirli referans noktalarının ve mekânsal unsurların kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Tüm sınıf seviyelerinde sıklıkla vurgulanan Mimarlık Fakültesi, Devrim Stadyumu, Çatı Kafe, Yemekhane ve Kütüphane gibi alanlar, öğrencilerin akademik ve sosyal yaşamlarının merkezi bileşenleri olarak dikkat çekmektedir. Özellikle Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama öğrencileri tarafından en yoğun kullanılan alanlardan biri olup hem olumlu hem de olumsuz duygularla ilişkilendirilmiştir. Birinci sınıf öğrencilerinde jüri baskısı ve yoğun çalışma temposu nedeniyle öne çıkan olumsuz duyguların, üst sınıflarda zamanla azalarak yerini daha olumlu ve nostaljik bir yaklaşıma bıraktığı gözlemlenmiştir.

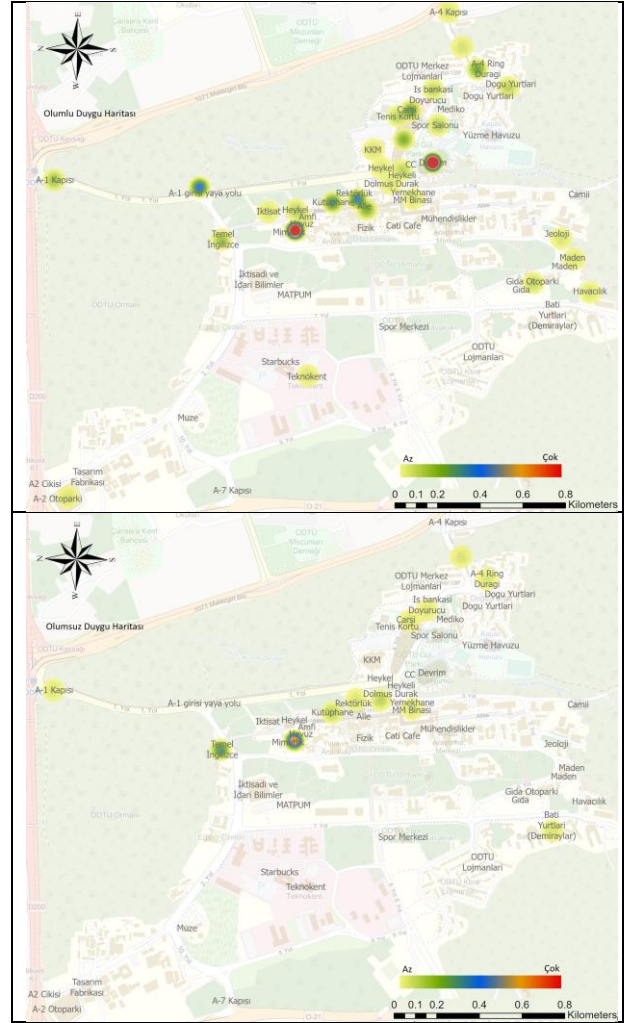
Öğrenciler tarafından sıkça vurgulanan bu alanlar, kullanıcı odaklı kampüs planlaması açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Örneğin, Devrim Stadyumu ve Çatı Kafe gibi açık ve yarı açık alanlar, sosyal etkileşim ve rahatlama bağlamında olumlu duygularla ilişkilendirilmiştir. Bu alanlar, kampüs yaşamının sosyal bileşenlerinin güçlendirilmesinde referans olarak ele alınabilir. Mulrooney ve Kelly'nin (2020) çalışmasında öğrenciler kampüsün açık yeşil alanlar ve sosyal mekânlar içermesinin kendilerini daha

güvende ve kabul edilmiş hissetmelerine katkı sağladığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, ODTÜ Kampüsü'nde de açık yeşil alanların —özellikle Fizik Çimleri, tenis kortları çevresi ve Çarşı bağlantısı— öğrencilerin zihinsel haritalarında pozitif izler bıraktığı görülmektedir. Bu bulgular hem bu alanların korunması hem de benzer nitelikte yeni mekânların tasarlanması açısından yol gösterici olabilir.

Mekânların yalnızca fiziksel değil, duygusal bağlamda da değerlendirilmesi, öğrencilerin kampüsle kurdukları çok katmanlı ilişkileri ortaya koymaktadır. Devrim Stadyumu'nun özgürlük ve rahatlatma hissi uyandıran bir alan olarak tanımlanması ya da Çatı Kafe'nin arkadaşlık ve sıcaklık gibi duygularla ilişkilendirilmesi, bireysel deneyimlerin mekân algısındaki belirleyici rolünü göstermektedir. Bu bulgular, Südaş ve Öz'ün (2018) çalışmalarında olduğu gibi, mekâna dair algının işlevsellik kadar bireysel deneyimlerle de şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Diğer yandan, Mimarlık Fakültesi ve Temel İngilizce Bölümü gibi alanların özellikle birinci sınıf öğrencileri tarafından stres, baskı ve yoğunluk gibi olumsuz duygularla ilişkilendirilmesi dikkat çekicidir. Bu bulgu, akademik yapıların sadece işlevselliğiyle değil, kullanıcıya hissettirdiği atmosfer ve deneyimle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda, öğrencilerin psikolojik yükünü azaltmaya yönelik fiziksel ve işlevsel müdahaleler planlanabilir. Örneğin, jüri ve stüdyo alanlarının daha açık, doğal ışık alan ve sosyal etkileşime izin veren mekânsal çözümlerle desteklenmesi düşünülebilir. Mulrooney ve Kelly'nin (2020) çalışması yeşil alanların öğrencilerin stres yönetimi ve genel ruh hali üzerindeki olumlu etkisini ortaya çıkarmıştır. Bu durum göz önünde bulundurularak bu bölümlerin acık alanlarla mekânsal ilişkisi güçlendirilmelidir.

Sınıf seviyelerine göre duygusal bağlamda gözlemlenen farklılıklar, çevresel algının zamanla ve deneyimle nasıl değiştiğini göstermektedir. Birinci sınıf öğrencileri, kampüsün sosyal alanlarına ve merkezi mekânlarına daha olumlu bir yaklaşım sergilerken, akademik mekânları daha çok stres ve gerginlik gibi olumsuz duygularla ilişkilendirmiştir. Buna karşın, dördüncü sınıf öğrencileri, kampüsle daha nostaljik ve olumlu bir bağ kurmuş, özellikle Devrim Stadyumu ve Mimarlık Fakültesi gibi mekânları keyifli anılarla ilişkilendirmiştir. Duygusal değerlendirmelerdeki farklılıklara ek olarak zamanla kampüs içindeki deneyimlenen mekân sayısında da artış olduğu görülmektedir. Bu durum, Herman, Kail ve Siegel'in (1979) çevresel algının zamanla geliştiğini ve bireylerin deneyim kazandıkça çevrelerini daha iyi anlamlandırdığını belirten çalışmasıyla paralellik göstermektedir.



Şekil 14. Tüm öğrencilerin haritalarında yer verdiği olumlu ve olumsuz mekânlar

Çalışma kapsamında elde edilen 120 bilişsel harita incelendiğinde, sınıf düzeylerinden bağımsız olarak olumlu ve olumsuz duygularla ilişkilendirilen ortak mekânların varlığı Şekil 14'te görselleştirilmiştir. Haritalarda genel olarak olumlu duygularla anılan mekânlar, olumsuz duygulara göre çok daha fazladır. Mimarlık Fakültesi, Devrim Stadyumu ve A1 Girişi yaya yolu olumlu duygularla öne çıkarken; Mimarlık Fakültesi ve Temel İngilizce Bölümü olumsuz duygularla en çok ilişkilendirilen alanlardır.

Çalışma bulguları, bilişsel haritalama yöntemiyle elde edilen mekânsal ve duygusal verilerin, kullanıcı deneyimlerini anlamaya yönelik önemli ipuçları sunduğunu ortaya koymaktadır. Öğrencilerin sıklıkla vurguladığı ve olumlu duygularla ilişkilendirdiği mekânlar, kampüsün sosyal ve fiziksel yapısının hangi alanlarda güçlü algılandığını ortaya koymakta; olumsuz duygularla ilişkilendirilen mekânlar ise kullanıcı deneyiminde iyileştirme ihtiyacı hissedilen alanlara işaret etmektedir. ODTÜ kampüsünde büyük ölçekli mekânsal müdahalelerin sınırlı olabileceği açıktır fakat bu tür analizler mevcut mekânsal yapının daha iyi anlaşılması ve kullanıcı odaklı, duyarlı planlama yaklaşımlarının geliştirilmesi açısından önemli bir zemin sunmaktadır. Nitekim Albayrak'ın

(2023) ODTÜ Ankara Kampüsü ve Mimarlık Fakültesi özelinde yürüttüğü çalışma da, kullanıcıların mekânsal belleklerini ve deneyimlerini çok katmanlı bir biçimde ele alarak bu yaklaşımı desteklemektedir. Ayrıca yeni kurulacak kampüsler için de kullanıcı deneyimini baz alan tasarım ve planlama süreçlerine yönelik değerli bir altlık oluşturmaktadır. Nitekim Topçu ve Topçu'nun (2012), Selçuk Üniversitesi kampüsünde yürüttüğü benzer çalışma da bu tür analizlerin kampüs tasarımına ilişkin somut değerlendirmeler üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, ODTÜ kampüsüne dair bilişsel haritaların ve duygusal bağlamların analiz edilmesi yoluyla, öğrencilerin mekân algılarındaki ortaklıkları ve farklılıkları ortaya koymuştur. Bulgular, bireylerin çevresel algılarının yalnızca fiziksel mekânlarla değil, aynı zamanda bu mekânlara atfedilen duygusal bağlarla şekillendiğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, bilişsel haritalama literatürüne önemli bir katkı sunmakta ve mekân algısının planlama süreçlerindeki önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

Bu çalışmanın verileri 2018 yılında toplanmış olup, öğrencilerin o dönemki sosyal ve mekânsal bağlam içerisindeki kampüs deneyimlerini yansıtmaktadır. Zaman içinde kampüs alanında fiziksel ve sosyal değişiklikler yaşanmış olabilir; ancak bilişsel haritalar, bireylerin belleğinde yer etmiş, tekrar eden deneyimlerin izlerini taşıyan güçlü temsillerdir. Bu bağlamda, çalışma dönemin kullanıcı algılarına dair değerli bir belge niteliğindedir. Gelecekte farklı kullanıcı gruplarıyla ve belirli periyotlarla gerçekleştirilecek benzer çalışmalar, kampüs algısındaki dönüşümlerin izlenmesine ve bu değişimlerin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak tanıyacaktır. Ayrıca bilişsel haritalama yönteminin stratejik planlar, kampüs master planları ve benzeri üst ölçekli belgelerde düzenli olarak kullanılması, üniversitelerin kullanıcı odaklı planlama ve tasarım yaklaşımlarını kurumsallaştırmasına katkı sağlayacaktır. Bu yaklaşım, diğer kampüslerde yürütülecek çalışmalar için de mekânsal aidiyetin nasıl üretildiğine dair karşılaştırmalı bir bakış açısı sunma potansiyeli taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yürütülmesine katkı sunan tüm öğrencilere ve ders saatlerinden zaman ayırarak süreci mümkün kılan öğretim üyelerimize teşekkür ederiz. Ayrıca, kampüs fotoğraf arşivini paylaşarak görsel materyallerin zenginleşmesine katkıda bulunan Eren Efeoğlu'na da özel olarak teşekkür ederiz.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında

uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çalışma, ODTÜ İnsan Araştırmaları Etik Kurulu tarafından 06.06.2018 tarihinde 2018-FEN-031 protokol numarasıyla onaylanmıştır.

Kaynakça

- [1] Cubukcu, E., Mensi, B., & Horoz, C. 2019. The Relation Between Urban Morphology and Physical Environmental Qualities: Comparing Walkability in Neighborhoods via Analyses of Spatial Statistics and Indices of Graph Theory and Space Syntax. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 658-665
- [2] Downs, R., & Stea, D. 1973. Image and environment: Cognitive mapping and spatial behavior. Chicago: IL: Aldine.
- [3] Kitchin, R. 1994. Cognitive maps: What are they and why study them? Journal of environmental psychology, 1-19.
- [4] Lynch, K. 1960. The image of the city, Cambridge: MIT Press.
- [5] Tversky, B. B. 2003. Structures of mental spaces: How people think about space. Environment and Behavior, 66-80.
- [6] Montello, D. 1993. Scale and multiple psychologies of space. A. Frank, & I. Campari içinde, Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS (s. 312-321). Berlin: Springer.
- [7] Gould, P., & White, R. 1974. Mental Maps. London: Penguin Books.
- [8] Relph, E. (1976). *Place and placelessness* (Vol. 67, p. 45). London: Pion.
- [9] Norberg-Schulz, C. (1980). Genius loci: Towards a phenomenology of architecture. *New York: Rizzoli*, 17, 22-23.
- [10] Pallasmaa, J. (2024). *The eyes of the skin: Architecture and the senses*. John Wiley & Sons.
- [11] Mulrooney, H. M. & Kelly, A. F. 2020. The university campus and a sense of belonging: what do students think? *New Directions in the Teaching of Physical Sciences*, 15-1.
- [12] Ülker, E., Arsan, Z., & Akış, T. 2009. Öğrenci zihin haritalarında kente ilişkin deneyimle değişen çevre algısı. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 72-82.
- [13] Südaş, İ., & Öz, İ. 2018. Davranışsal coğrafyada bilişsel haritalar: Ege Üniversitesi kampüsü örneği. *Türk Coğrafya Dergisi*, 81-92.

- [14] Herman, J., Kail, R., & Siegel, A. 1979. Cognitive maps of a college campus: A new look at freshman orientation. Bulletin of the Psychonomic Society, 183-186.
- [15] Topcu, K., & Topcu, M. 2012. Visual presentation of mental images in urban design education: cognitive maps. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 573-582.
- [16] Albayrak, A., 2023. Mapping Minds, Charting Memories: Spatial Dimensions of Collective Memory in the METU Ankara Campus and Faculty of Architecture, M.S. - Master of Science, Middle East Technical University.
- [17] <https://erenefeoglu.tr/portfolio>

Parsiyal Hepatektomi ile Tetiklenen Karaciğer Rejenerasyonunda Olası Mitokondriyal Fizyon Mekanizmasının Araştırılması

Ayşe ÖZMEN YAYLACI¹ , Mediha CANBEK² 

¹Hitit Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Çorum, Türkiye

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Eskişehir, Türkiye

(Alınış / Received: 01.08.2024, Kabul / Accepted: 26.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Mitofaji,
Mitokondriyal Fizyon,
Drp1,
Mul1,
Karaciğer Rejenerasyonu,
Sıçan

Öz: Karaciğer rejenerasyonu çok sayıda kompleksin görev aldığı karmaşık bir mekanizmadır. Rejenerasyon, karaciğerin %70'nin çıkarılmasıyla tetiklenir ve hücreler, 1-2 bölünmeden sonra tekrar G0 fazına geçer. Karaciğer rejenerasyonu sırasında mitokondrilerin şekilsel olarak bozulduğu, şiştiği, krista sayısının arttığı ancak; ilerleyen saatlerde normale döndüğü bilinmektedir. Karaciğer rejenerasyonu sırasında mitokondrilerin nasıl normale döndüğü ile ilgili moleküler mekanizmalar açık değildir. Mitokondriler, günümüzde, enerji üretimi dışında farklı mekanizmalarla da (mitofaji, mitokondriyal fizyon, kalsiyum homeostazisi Fe-S protein sentezi gibi) ilişkilidir. Bu nedenle çalışmamızda parsiyal hepatektomi ile tetiklenen karaciğer rejenerasyonunun 6, 12, 24. saatlerinde Drp1 gen ekspresyonu ve Drp1, Mul1 protein miktarları araştırıldı. Elde edilen veriler sonucunda; Mul1 protein miktarları, parsiyal hepatektomi ile tetiklenen rejenerasyon gruplarında, sham gruplarına göre düştü. *Drp1*'in, genel olarak, PH gruplarında düşmesine rağmen PH12. saatte hafif artış meydana geldi. Sonuç olarak; parsiyal hepatektomi ile tetiklenen karaciğer rejenerasyonu modelinde; rejenerasyonun 6, 12, 24. saatlerinde Mul1'in aktif olmadığı, Drp1'in Mul1'den ayrı olarak rol oynayabileceği belirlendi.

Investigation of Possible Mitochondrial Fission Mechanism in Liver Regeneration Triggered by Partial Hepatectomy

Keywords

Mitophagy,
Mitochondrial Fission,
Drp1,
Mul1,
Liver Regeneration,
Rat

Abstract: Liver regeneration is a complex mechanism in which a large number of complexes are involved. Regeneration is triggered by the removal of 70% of the liver, and the cells go back into the G0 phase after 1-2 divisions. It is known that during liver regeneration, mitochondria are deformed, swollen, increased crista. In the later hours of regeneration, it is observed that mitochondria return to normal. The molecular mechanisms involved in how mitochondria return to normal during liver regeneration are not clear. Mitochondria do not only produce energy; It is also associated with the mechanisms of mitophagy, mitochondrial fission, calcium homeostasis, Fe-S protein synthesis. In our study, Drp1 gene expression and Drp1, Mul1 protein amounts were examined according to 6, 12, 24 hours of regeneration. As a result of the data obtained; Mul1 protein amounts were decreased in the regeneration groups that triggered by partial hepatectomy compared to the sham groups. Drp1 expression and Drp1 protein quantities generally fall in PH groups, the slight increase in PH12 is interesting. As a result; In the liver regeneration model triggered by partial hepatectomy; it was determined that Mul1 was not active at 6, 12, and 24 hours of regeneration and Drp1 may play a role separately from Mul1.

1. Giriş

Karaciğerin 2/3'lük kısmının yani yaklaşık %70'inin cerrahi müdahaleyle çıkarılması (hepatektomi) yoluyla rejenerasyon mekanizmalarının tetiklendiği karaciğer rejenerasyon modeline 2/3 "Parsiyal (kısmi) Hepatektomi (PH) Modeli" ya da "%70 PH modeli" denir. 2/3 PH modeli ile tetiklenen karaciğer rejenerasyonu modelinde hücresel düzeyde çok sayıda karmaşık mekanizma görev alır [1]. Rejenerasyonun ilk saatlerinde salınan büyüme faktörleri aracılığıyla hepatositler ve diğer parankimal olmayan hücreler G0'dan G1 fazına geçer ve yaklaşık 4 saat sürer. Sonrasında hücreler S fazına geçer ve DNA replikasyonu başlar. 24. saatte en yüksek seviyesine ulaşır. Hepatositler bir veya iki mitoz geçirdikten sonra bölünme durur. Karaciğer farklılaşarak son halini alır ve rejenerasyon, sıçanlarda, 168 saatte tamamlanır [2, 3].

Hepatositler mitokondri bakımından zengindir. Mitokondrilerin yapı ve morfolojisinin rejenerasyon sırasında değiştiği bilinmektedir [4]. PH sonrası 24 saatlik rejenerasyon süresini kapsayan bir çalışmada; mitokondriler şişmiş, şekilsiz ve az kristaya sahip oldukları belirtilmiştir [4]. Başka bir çalışmada Karaciğer rejenerasyonu sırasında, DNA replikasyonu başlamadan önce mitokondri fonksiyonlarının bozulduğu belirlenmiştir [5]. PH sonrası 7-24 saatleri arasında ATP sentezinin düşük olduğu belirlenmiş ve mitokondrilerin fonksiyonlarının bozulmasıyla ilişkilendirilmiştir [6]. Bu literatürlere göre rejenerasyonun ilk saatlerinde mitokondrinin yapısı ve fonksiyonu bozulduğu belirtilmektedir. Ancak rejenerasyonun 96. saatinde mitokondri yapılarının düzeldiği ve oksidatif stresin azaldığı bilinmektedir [5]. Rejenerasyonun ilerleyen saatlerinde mitokondri yapısının düzelmesi ve oksidatif stres hasarının azalmasını sağlayan mekanizmalar literatürde yer almamaktadır.

Mitochondrial E3 ubiquitin protein ligase 1 (Mul1) aracılı mitofaji/mitondriyal fizyon mekanizmasıyla ilgili bilinenler oldukça sınırlıdır [7]. Mul1 aracılı mitofaji/mitokondriyal fizyon mekanizmasında, Dynamin Related Protein-1 (Drp1) başlıca düzenleyici olarak görev alır ve mitokondriyal fizyon markırı olarak da kullanılmaktadır. Mul1, Drp1'e Small ubiquitin like modifier (SUMO) molekülü ekleyerek mitokondriyal fizyonu tetikler. Mul1, Drp1'in SUMOlasyonu, mitokondriyal fizyonu tetiklerken; Drp1, mitofusin2 (Mfn2)'e ubiquitin ekleyerek Mfn2'nin yıkılmasını sağlar. Mfn2 yıkıldığı için mitokondriyal fizyon engellenir. Mul1-aracılı mitokondriyal fizyon ile mitokondri ikiye bölünür ve hasarlı kısım mitofaji yoluyla sindirilmiş olur [8,9]. Mul1 aracılı mitofajiden önce bilinen ve en iyi tanımlanmış yolak Parkin RBR E3 Ubiquitin Protein Ligase (PARKIN)/ PTEN Induced Kinase 1 (PINK1) aracılı mitofaji yolağıdır. Yapılan çalışmalar hücre içi sistemde öncelikli tercihin PARKIN/PINK1 aracılı

mitofaji mekanizmasının olduğunu göstermektedir. PARKIN/PINK1 aracılı mitofaji yolağının inaktif olduğu durumlarda Mul1 aracılı mitofaji yolağının tercih edilebileceği düşünülmektedir [10]. Özmen Yaylacı ve Canbek (2023)'in çalışmasında PH sonrası karaciğer rejenerasyonunun 0, 6, 12, 24, 48, 72. saatlerinde PARKIN ekspresyonunun olmadığı gösterilmiştir [11].

PH ile rejenerasyon modelinde bozulduğu bilinen mitokondriler, PARKIN/PINK1 aracılı mitofaji yolağına alternatif Mul1 aracılı mitofaji yoluyla ilişkili olabilir. Çalışmamızda parsiyal hepatektomi ile tetiklenen karaciğer rejenerasyonunun 6, 12, 24. saatlerinde Mul1 aracılı mitofaji/mitokondriyal fizyon mekanizmasının olası aktivitesi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Hayvan deneyleri

Çalışmada kullanılan dokular, daha önceki çalışmamıza [11] ait dokulardır. Özmen Yaylacı ve Canbek'e ait çalışmadan (2023) elde edilen PARKIN ve Mul1 ekspresyon verileri böyle bir çalışmanın kurgulanmasına yön vermiştir. Özmen Yaylacı ve Canbek'e ait çalışmanın (2023) yedek doku materyalleri kullanılarak bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla ayrı bir etik kurul kararı ESOĞU HADYEK'in 20.04.2022 tarihli 896 karar numaralı izni ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada 3 ana grup yer almaktadır. Grup I: Kontrol Grubu, Grup II: Sham (SH) Grupları (0, 6, 12, 24 saat), Grup III: PH Grupları (6, 12, 24 saat). Grup II ve Grup III de farklı rejenerasyon sürelerine göre alt gruplar (6, 12, 24 saat) oluşturulmuştur [11]. Grup I (kontrol) hayvanlarına herhangi bir cerrahi müdahale yapılmadan diseksiyonları gerçekleştirilmiştir (11). Grup II (SH)'de bulunan sıçanlara laparotomi ardından karaciğerin 2/3'lük kısmını oluşturan sol lob ve median loblar, hepatektomi yapılacak gibi dışarı çıkarılmış; ancak hepatektomi yapılmadan geri kapatılmıştır. Belirtilen sürelerin (0, 6, 12, 24 saat) sonunda diseksiyonları gerçekleştirilmiştir [11]. Grup-III (PH)'de bulunan hayvanlara Higgins ve Anderson (1931)'un tekniğine göre hepatektomi uygulanmıştır [11, 12]. Kısaca sıçan karaciğerinin median lobu ve sol lobu çıkarılarak 3/0 ipek sütür ile boğumlanmış ve keserek çıkarılmıştır. Geriye kalan karaciğerin 1/3'lük kısmı 6, 12, 24 saatlik sürelerle rejenerasyona bırakılmıştır. Belirtilen sürelerin sonunda diseksiyonları gerçekleştirilmiştir [11]. RT-PCR ve western blot analizleri için her grup/alt grup için 4 sıçan karaciğer dokuları kullanılmıştır.

2.2 RT-PCR analizi

Karaciğer Dokularından RNA İzolasyonu ve cDNA Sentezi:

Herbir sıçandan alınan karaciğer örneklerinden trizol (Thermo Fischer, Ref:15596026) kullanılarak RNA izole edilmiştir. Kısaca 0.5 gr tartılan dokular, ZrOB05-0,5mm RNase free boncuklar (Norgen P/N26231) ile trizol içerisinde homojenizatör (Next Advace Bullet Blender Storm 24) ile homojenizasyon gerçekleştirilmiştir. Kloroform eklenerek fazların oluşumu gözlenmiştir. En üstte yer alan RNA fazı ependorf tüplerine alınmıştır ve izopropanol eklenmiştir. Oluşan RNA çökeleği üzerine 1 ml %70'lik soğuk etanol eklenmiş ve santrifüjledikten sonra üstteki etanol atılmıştır. Örneklerdeki etanol 37°C'de etüvde bekletildikten sonra 100ul RNase free su eklenmiştir. RNA miktarları nanodropta ölçülmüştür (Thermo Scientific™ NanoDrop 2000). RNA örnekleri 200 ng/ul'ye eşitlenmiştir. Örnekler üretici firmanın kit protokolü takip edilerek cDNA'ya çevrilmiştir (RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit, Cat No:K1621, Thermo Fischer).

Drp1 Gen ekspresyonu analizleri, FastStart Essential DNA Green Master kit (Roche, 06402712001) kullanılarak Step One Plus RT-PCR cihazı (Applied BioScience) kullanılarak kit protokolüne uygun gerçekleştirilmiştir. Endojen kontrol geni olarak Gapdh kullanılmıştır. Gapdh ve Drp1'e ait primer dizileri Tablo 1.1'de verilmiştir.

Gen	Forward (5'-3')	Reverse (5'-3')
Gapdh	AGACAGCCGCATCTTCTTGT	CTTGCCGTGGGTAGAGTCAT
Drp1	CGTGATCCCGTCATCAAT	TCAACTCCATTTCTTCTCCTGT

Tablo1.1. Çalışmada kullanılan GAPDH ve Drp1 gen primerlerinin forward ve reverse dizileri

RT-PCR analizleri sonrası gen ekspresyonu farklılıklarının hesaplanmasında Livak metodu kullanılmıştır [13]. Referans gen GAPDH kullanılmıştır.

2.3 Western blot analizleri

Drp1 ve Mul1 protein miktarları western blot ile analiz edilmiştir. Yaklaşık 350 mg tartılan karaciğer örnekleri proteaz inhibitör kokteyli (CST, 5871) ve PMSF (CST, 8553) eklenmiş RIPA buffer (CST, 9806)da homojenize edildi. Protein miktarları her bir örnek için 20 µg a eşitlenmiştir.

Denatürasyon ve numune yüklemek için Blue Loading Buffer Pack (CST, 7722) kullanılmıştır. Örnekler 100 °C'de denatüre edilmiştir.

Örnekler SDS jele yüklenerek 70V'da yaklaşık 2 saat 30 dk yürütülmüştür. Yarı kuru sistem kullanılarak proteinler jelden nitroselüloz membrana (Biorad, 1620114) aktarılmıştır (Biometra Fasblot cihazı,

Analytik jena, Almanya). Membran +4°C'de bir gece bloklama solüsyonu içerisinde (%5 yağsız süt tozu TBST Solüsyonu) bekletilmiştir. Daha sonra membran 1:1000 oranında sulandırılmış Mul1 primer antikoru (ProteinTech, 16133-1-AP-20UL) veya Drp1 primer antikoru (Cell Signaling, 8520S) solüsyonu eklenerek 1 gece +4 °C'de bekletilmiştir. Membran, 3 kez yıkama işleminden sonra 1:2000 oranında seyreltilen sekonder antikoru (CST, 7074S) ile 1 saat muamele edilmiştir. Bantlar, ECL (Biorad, 1705061) ile Gel Logic Imaging system (Kodak) kullanılarak görüntülenmiştir. Her bir membranda bulunan bandın sinyal yoğunluğu (signal intensity) GelQuant.NET programı kullanılarak ölçülmüş ve bu değerler grafikte gösterilmiştir.

2.4 İstatistiksel değerlendirme

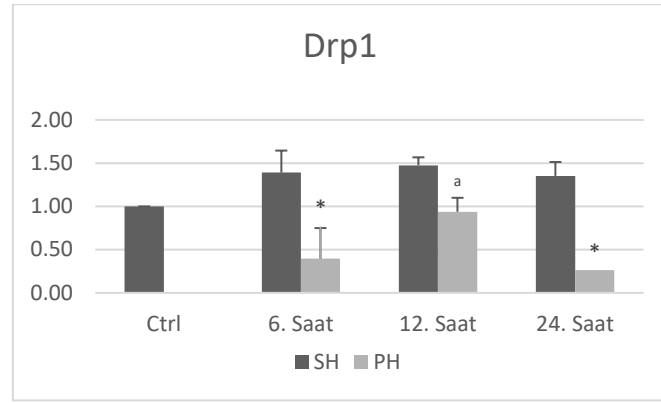
Çalışmalarımız sonucunda; RT-PCR verilerinin istatistiksel analizlerinde "GraphPad Prism 8" yazılımı kullanılmıştır ve ΔC_t değerleri kullanılarak ANOVA Bonferonni Testi uygulanmıştır [14]. Tüm analiz sonuçlarında $p \leq 0.05$ göre anlamlı kabul edilmiş ve $\pm SD$ kullanılmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışmada kullanılan karaciğer dokularına ait rejenerasyon ve proliferasyon oranları saatlere göre önceki çalışmamızda verilmiştir [11].

Drp1 ekspresyonları, PH sonrası rejenerasyon saatlerine göre (6, 12, 24 saat) analiz edilmiş ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. SH grupları kendi içinde kontrol grubuyla birlikte değerlendirildiğinde; SH grupları ve kontrol grupları arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır (Şekil 3.1). PH grupları kendi içinde kontrol grubuyla birlikte Drp1 ekspresyonu bakımından değerlendirildiğinde; kontrol, PH6 ve PH12 arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Ancak PH12 grubunda meydana gelen Drp1 gen ekspresyonu artışı PH24'e göre istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Şekil 3.1).

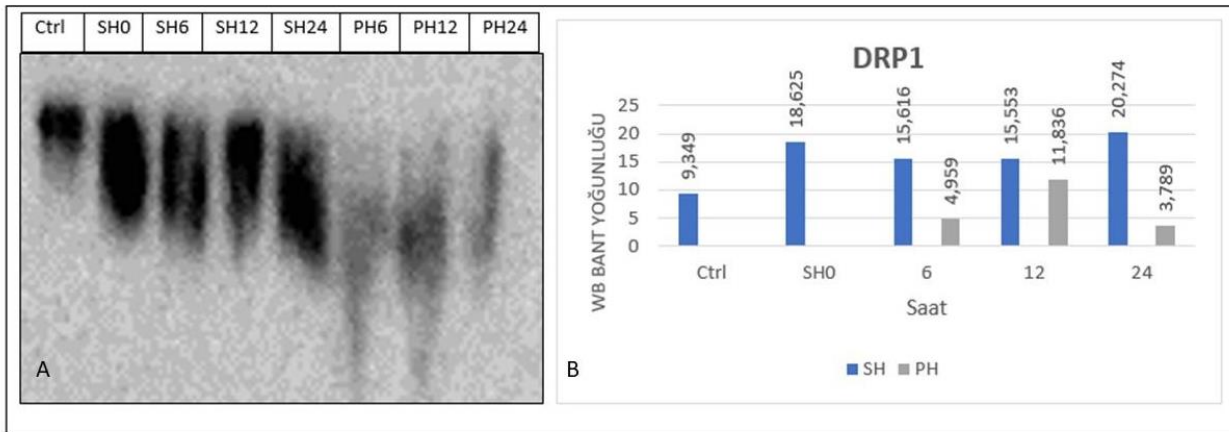
Ayrıca aynı saatteki PH grupları ile SH grupları birbirleri ile karşılaştırıldığında; tüm PH gruplarında, aynı saatteki SH gruplarına göre Drp1 ekspresyonlarında düşüş gözlenmiştir. PH gruplarının 6. ve 24. saatlerinde meydana gelen Drp1 ekspresyonları düşüşü, aynı saate denk gelen SH gruplarına göre istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Şekil 3.1).



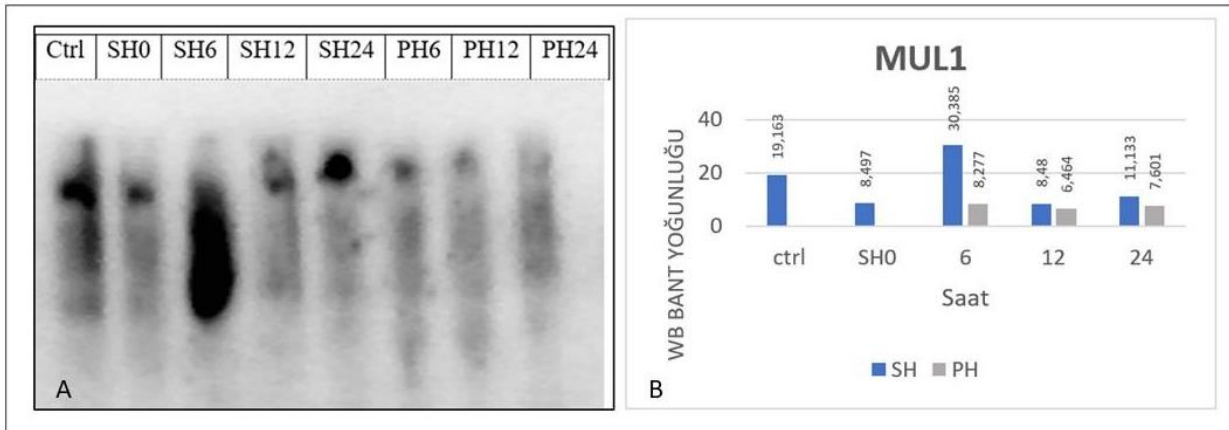
Şekil 3.1. Drp1 geninin saatlere göre ekspresyonu (n=4) (PH grupları, aynı saatteki SH gruplarına göre* P<0.05). (PH grupları kendi içinde karşılaştırıldığında; PH24'e göre; ^a p<0.05). ANOVA Bonferonni testi kullanıldı.

Drp1 western blot analiz sonuçları değerlendirildiğinde; PH gruplarında, SH gruplarına göre Drp1 protein miktarının düştüğü gözlenmiştir (Şekil 3.2). Drp1 protein miktarları, PH grupları arasında değerlendirildiğinde; PH12'de hafif artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.2). Drp1 western blot analiz sonuçlarıyla gen ekspresyonu analiz sonuçları birbiriyle uyumludur (Şekil 3.2).

Mul1'in western blot analiz sonuçları değerlendirildiğinde; SH grubu ile karşılaştırıldığında, PH gruplarında Mul1 protein miktarında düşüş belirlendi. Tüm gruplar içinde SH6 grubunda Mul1 miktarı en fazla bulundu (Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Drp1 saatlere göre protein miktarları. PH: Parsiyal Hepatektomi A. Jel Görüntüsü B.Bant yoğunluklarına göre oluşturulan grafik



Şekil 3.3. Mul1 proteininin saatlere göre miktarları. PH: Parsiyal Hepatektomi A. Jel Görüntüsü B. Bant yoğunluklarına göre oluşturulan grafik

4. Tartışma ve Sonuç

Mitokondriyal fizyon, intra-mitokondriyal membranın (IMM) takibinde dış (outer) mitokondriyal membranın (OMM) ayrılmasıyla, mitokondrinin boğumlanmasıdır. IMM boğumlanması ile ilgili bilgiler oldukça sınırlıdır; ancak OMM boğumlanmasında Drp1'in görev aldığı bilinmektedir. Drp1 GTPaz proteinlerindendir. Drp1 dışında Drp1 adaptör proteinleri olan FIS1, MFF, ve MiDler de rol oynamaktadır [15].

Çalışmamızda Drp1 ekspresyonunun SH gruplarında kontrol gruplarına benzer olduğu ancak PH gruplarında düşük olduğu gözlenmiştir. PH grupları, kontrol grubuyla birlikte kendi içinde değerlendirildiğinde PH12 grubunda Drp1 artışı anlamlı bulunmuştur. Yapılan literatür taramalarında; karaciğer rejenerasyonu üzerine benzer bir bildiriye rastlanmıştır. Söz konusu çalışmada; %70 PH sonrası rejenerasyon sürecinde Drp1, Fis1 ve Mfn1 ekspresyonlarının arttığı belirtilmiş ancak; rejenerasyonun hangi saatinde olduğu açıklanmamıştır [16].

Mul1 aracılı mitofaji/mitokondriyal fizyon mekanizmasında Mul1, Drp1 ile birlikte görev almaktadır [8, 9]. Ancak son yapılan araştırmalar Drp1'in Mul1 aktivasyonunun baskılandığı farklı mitofaji mekanizmasıyla da ilişkili olduğunu göstermektedir [17].

Çalışmamızda SH grupları ve PH grupları değerlendirildiğinde; Mul1 ve Drp1 miktarları, SH gruplarında kontrol gruplarına yakın iken; PH gruplarında düşüktür. Son yapılan çalışmalar normoksi koşullarının aksine hipoksi koşullarında Mul1'in ters yönde etki gösterebileceğini vurgulamaktadır. Hipoksi koşullarında Mul1'in ubiquitinasyon yoluyla yıkıldığı ve Drp1'in hipoksik koşullar için gerekli olduğu belirtilmektedir [17].

Başka bir çalışmada; PC12 hücrelerinde iskemik koşullar taklit edilerek ve Mul1 ekspresyonunun RNAi aracılığıyla artması sağlanarak; artmış Mul1 miktarının, hipoksik koşullardaki olası etkisi değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada; hipoksi koşullarında arttırılmış Mul1 ekspresyonunun proliferasyonu durdurucu yönde etki ettiği, hücrelerin G0/G1 geçişinde durduğu ve apoptozun teşvik edilmesiyle açıklanmıştır. Doayısıyla hipoksi koşullarında Mul1 miktarının azalması proliferasyon için ve G0/G1 kontrol noktasının aşılabilmesi için gerekli görünmektedir [18]. Bu durum PH gruplarında Mul1'in niçin düştüğünü açıklamaktadır.

Karaciğer rejenerasyonu sırasında hipoksiye işaret eden çok sayıda makaleye rastlanmıştır [19; 20]. Bu makalelerde hepatektomi işlemi ile birlikte karaciğerin kalan loblarında arteriyel kan basıncının

artmasına rağmen portal basıncın azalmasından kaynaklı hipoksi olabileceği beyan edilmektedir [20].

Bazı araştırmalar hipoksinin karaciğer rejenerasyonunu artırdığı yönündeyken [21]; bazı çalışmalar da hiperbarik oksijenin karaciğer rejenerasyonunu artırdığı yönündedir. Karaciğer rejenerasyonu sırasında hipoksi mekanizmalarının aktivasyonu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olmasıyla birlikte; 2005 yılında yapılan bir çalışmada %70 PH sonrası, Hypoxia Inducible Factor-1 α (Hif1 α)'nın ekspresyonunun ve proteinin miktarının arttığı gösterilmiştir [22]. Hif1 α , normokside, hücre içinde sürekli yıkılırken, hipoksida stabil hale geçmektedir [22]. Çalışmamızda Mul1 miktarının PH gruplarında düşmesi; rejenerasyon sırasında meydana geldiği düşünülen hipoksik koşullarda [19, 20] Mul1'in olası antiproliferatif etkisini [17] bastırmak için olabilir. Rejenerasyon sırasında hepatositlerin proliferasyona devam etmesi gerekir ve hipoksik ortamda antiproliferatif özellik kazanan Mul1 ekspresyonunun düşürülmesi hücreler için mantıklı bir tercih gibi görünmektedir. Bununla birlikte; PH sonrası 12. saatte Mul1 miktarı düşükken; Drp1'in artması ise hipoksik koşullarda Mul1 inhibisyonu ile ilişkili Drp1 aktivasyonu ile ilişkili farklı bir mitofaji mekanizmasıyla [17] ilişkilendirilebilir. Ancak elimizdeki sınırlı veriyle kesin bir sonuca ulaşmak mümkün değildir ve daha ileri araştırmalara ihtiyaç vardır.

Çalışmamızda PH ile tetiklenen karaciğer rejenerasyonunun 6, 12, 24. saatlerinde Mul1'in aktif olmaması, Mul1 aracılı mitofaji/mitokondriyal fizyon mekanizmasının bu sürelerde etkili olmadığına işaret etmektedir. Ancak Drp1'in PH12. saatteki hafif artışı, karaciğer rejenerasyonunda Drp1 ile ilişkili farklı mekanizmaların aktif olabileceğini düşündürmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: FEF19001.22.005)

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Bu çalışmanın etik kurul kararı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi HADYEK'in 20.04.2022 tarihli 896 karar numaralı izni ile alınmıştır.

Kaynakça

- [1] Chen, S., Zheng, J., Hao, Q., Yang, S., Wang, J., Chen, H., Chen, L., Zhou, Y., Yu, C., Jiao, B., Cai, Z., 2010. p53-insensitive PUMA down-regulation is essential in the early phase of liver regeneration after partial hepatectomy in mice. *Journal of Hepatology*, 52, 864–71.
- [2] Fausto, N. 2000. Liver regeneration. *Journal of Hepatology*, 32, 19–31.
- [3] Starkel, P., De Saeger, C., Sempoux, C., Legrand, E., Leclercq, I., Horsmans, Y., 2005. Blunted DNA synthesis and delayed S-phase entry following inhibition of Cdk2 activity in the regenerating rat liver. *Laboratory Investigation*, 85(4), 562–571.
- [4] Viragh, S., Bartok, I., 1966, An electron microscopic study of the regeneration of the liver following partial hepatectomy. *The Journal of Laryngology & Otology*, 549(5), 825-839.
- [5] Ferri, D., Moro, L., Mastrodonato, M., Capuano, F., Marra, E., Liquori, G.E., Greco, M., 2005. Ultrastructural zonal heterogeneity of hepatocytes and mitochondria within the hepatic acinus during liver regeneration after partial hepatectomy. *Biology of the Cell*, 97(4), 277–288.
- [6] Guerrieri, F., Vendemiale, G., Grattagliano, I., Cocco, T., Pellicchia, G vd., 1999, Mitochondrial Oxidative Alterations Following Partial Hepatectomy, *Free Radical Biology and Medicine*, 26(1-2), 34–41.
- [7] Choubey V., Zeb A, Kaasik A., 2022. Molecular mechanisms and regulation of mammalian mitophagy. *Cells* 11(1):1-38.
- [8] Peng, J., Ren, K. Di., Yang, J., Luo, XJ., 2016. Mitochondrial E3 ubiquitin ligase 1: A key enzyme in regulation of mitochondrial dynamics and functions, *Mitochondrion*, 28, 49–53.
- [9] Youle, R. J., Van Der Bliek, A. M., 2012. Mitochondrial fission, fusion and stress. *Science*, 337(6098):1062–1065.
- [10] Villa, E., Marchetti, S., Ricci, J. E., 2018. No Parkin zone: Mitophagy without Parkin. *Trends in Cell Biology*, 28(11), 882–895.
- [11] Ozmen Yaylaci A, Canbek M., 2023. The role of ubiquitin signaling pathway on liver regeneration in rats. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 478, 131e47.
- [12] Higgins, GM, Anderson, RM, 1931. Experimental pathology of liver. I. Restroation of liver white rat following partial surgical removal. *Arch. Pathol.*, 12, 186–202.
- [13] Livak, K. J., Schmittgen, T. D., 2001. Analysis of relative gene expression data using Real-Time Quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCt} Method. *Methods*, 25, 402–408.
- [14] Fernandes, K. A., Harder, J. M., Kim, J., Libby, R. T., 2013. JUN regulates early transcriptional responses to axonal injury in retinal ganglion cells. *Experimental Eye Research*, 112, 106–117.
- [15] Yang D., Ying J., Wang X., Zhao T., Yoon, S., Fang, Y., Zheng, Q., Liu, X., Yu, W., Hua, F., 2021. Mitochondrial Dynamics: A Key role in neurodegeneration and a potential target for neurodegenerative disease. *Frontiers in Neuroscience*, 15 (654785), 1-13.
- [16] Zhong Z., Rehman H., Krishnasamy Y., Liu, Q., Shi, Y., Schnellmann, RG., 2011. Alterations of mitochondrial homeostasis after ischemia/reperfusion (IR) and partial hepatectomy (PHX) in mice. *Experimental Biology 2011 Meeting Abstracts*, 25(S1).
- [17] Chen CW, Su C, Huang CY, Huang XY, Cuili X, Chao T, Fan CH, Ting CW, Tsai YW, Yang KC, Yeh TY, Hsieh ST, Chen YJ, Feng Y, Hunter T, Chang ZF., 2024. NME3 is a gatekeeper for DRP1-dependent mitophagy in hypoxia, *Nature Communications*,
- [18] Liu Q, Dong Q 2020. NR4A2 Exacerbates cerebral ischemic brain injury via modulating microRNA-652/Mul1 pathway, *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 16:2285-2296.
- [19] Michalopoulos GK, 2007. Liver regeneration, *Journal of Cellular Physiology*, Mini Review.
- [20] He S, Atkinson C, Qiao F, Cianflone K, Chen X, Tomlinson S, 2009. A complement-dependent balance between hepatic ischemia/reperfusion injury and liver regeneration in mice, *The Journal of Clinical Investigation*, The Journal of Clinical Investigation, 19(8):2304-2316.
- [21] Schadde E, Tsatsaris C, Swiderska-Syn M, Breitenstein Urner M, Schimmer R, Booya C, Z'graggen BR, Wenger RH, Spahn DR, Hertl M, Knechtle S, Diehl AM, Schläpfer M, Beck-Schimmer B, 2016. Hypoxia of the growing liver accelerates regeneration, *sURGERY*, 161(3):671-678.
- [22] Maeno H, Ono T, Dhar DK, Sato T, Yamanoi A, Nagasue N. 2005. Expression of hypoxia inducible factor-1a during liver regeneration induced by partial hepatectomy in rats, *Liver International*, 25:1002-1009.

Innovative Bioactive Zirconia Glass Ceramics: Combining Radiation Protection and Biocompatibility

Özge KILIÇOĞLU*¹

¹Marmara Üniversitesi, SHMYO, Tıbbi Görüntüleme Bölümü, 34865, İstanbul, Türkiye

(Alınış / Received: 03.05.2025, Kabul / Accepted: 27.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Zirconia,
Glass Ceramics,
Radiation Shielding,
Mass attenuation coefficient,
Biocompatibility

Abstract: This study assesses the γ -ray shielding performance of zirconia-doped transparent glass-ceramics (TGCs) derived from the $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-P}_2\text{O}_5$ system over 0.015–15 MeV. Four compositions (BG1–BG4, 0–6 mol % ZrO_2) were analysed using the Phy-X/PSD software and the PHITS-3.22 Monte Carlo code, which agreed closely; the largest deviation was 1.47 % for BG1 at 3 MeV while largest deviation is only 1.39 % for BG4 at 8 MeV. For BG4, the mass attenuation coefficient declined from 8.040 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ at 0.015 MeV to 0.022 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ at 15 MeV, while the half-value layer changed 0.0030–10.649 cm. BG4 also recorded the highest linear attenuation coefficient, 23.398 cm^{-1} at 0.015 MeV, and its HVL at 0.1 MeV was 16.7 % lower than BG1. Replacing CaO with 6 mol % ZrO_2 raised density from 2.535 to 2.910 g cm^{-3} (+14.8 %) and reduced molar volume, enhancing structural compactness and attenuation. Zirconia-rich TGCs—especially BG4—thus present environmentally benign, lead-free, and biocompatible options for radiation-shielded dental and orthopaedic implants.

Yenilikçi Biyoaktif Zirkonya Cam Seramikleri: Radyasyon Zırhlama ve Biyouyumluluğun Birleşimi

Anahtar Kelimeler

Zirkonya
Şeffaf cam seramik,
Radyasyon zırhlama,
Kütle zayıflatma katsayısı,
Biyouyumluluk

Öz: Bu çalışma, $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-P}_2\text{O}_5$ sisteminden türetilen zirkonya katkılı şeffaf cam-seramiklerin (TGC) 0,015–15 MeV aralığındaki γ -ışını zırhlama performansını değerlendirmektedir. Dört bileşim (BG1–BG4, %0–6 mol ZrO_2) Phy-X/PSD yazılımı ve PHITS-3.22 Monte Carlo kodu kullanılarak analiz edilmiş olup sonuçlar büyük ölçüde uyumludur; en büyük sapma BG1 için 3 MeV’de %1,47 iken BG4 için 8 MeV’de yalnızca %1,39’dur. BG4 numunesinde kütle zayıflatma katsayısı 0,015 MeV’de 8,040 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ’den 15 MeV’de 0,022 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ’ye düşmüş, yarı değer kalınlığı 0,0030–10,649 cm aralığında değişmiştir. BG4 ayrıca 0,015 MeV’de 23,398 cm^{-1} ile en yüksek doğrusal zayıflatma katsayısını kaydetmiş ve 0,1 MeV’deki HVL değeri BG1’den %16,7 daha düşüktür. CaO’nun %6 mol ZrO_2 ile ikamesi yoğunluğu 2,535’ten 2,910 g cm^{-3} ’e (+%14,8) yükseltmiş ve molar hacmi azaltarak yapısal sıkılığı ve zayıflatmayı artırmıştır. Zirkonya açısından zengin TGC’ler—özellikle BG4—bu nedenle radyasyon zırhlamalı diş ve ortopedik implantlar için çevre dostu, kurşunsuz ve biyouyumlu seçenekler sunmaktadır.

1. Introduction

Radiation shielding is essential in healthcare settings like radiology, dentistry, and oncology to safeguard patients and staff from harmful ionizing radiation. Lead has been the primary shielding material because of its high density and radiation attenuation capabilities. Nevertheless, its toxicity, environmental risks, and poor biocompatibility underscore the

urgent need for safer, non-toxic, and eco-friendly alternatives.

Transparent glass ceramics (TGCs) doped with zirconia (ZrO_2) present a promising alternative material[1], [2]. They offer advantages by merging the optical transparency of glass with the enhanced density and strength achieved through controlled nanocrystallization. This combination results in beneficial physical, structural, and biological

characteristics. Consequently, transparent glass ceramics (TGCs) provide a compelling alternative [3]. Their bioactivity, mechanical robustness, transparency, and exceptional biocompatibility make them particularly suitable for biomedical contexts where radiation protection must align seamlessly with patient safety and tissue compatibility.

Zirconium dioxide (ZrO_2) is a valuable addition to glass ceramics due to its high atomic number ($Z = 40$) and flexible structure[4]. This allows for a denser silicate network without compromising clarity or chemical stability. Additionally, Zr^{4+} acts as a nucleating agent, promoting the formation of tiny tetragonal nanocrystals that improve the glass's resistance to cracking. While some have highlighted these various advantages, they pointed out that information regarding the radiation shielding capabilities of zirconium-containing materials is still limited and varies based on the specific material composition[5].

Innovative bioactive zirconia glass ceramics show considerable promise for use in medical implants, especially in dentistry and orthopedics. Their unique combination of biocompatibility, mechanical strength, and bioactivity makes them suitable for a range of implant applications. Modifying zirconia with hydroxyapatite can enhance its bioactivity, leading to improved integration with natural bone and gum tissues [6], [7]. Composite materials with optimized hydroxyapatite levels can achieve a balance of strong mechanical properties and enhanced bioactivity, making them particularly well-suited for dental implants [7].

In bone repair and regeneration contexts, zirconia composites, especially those enhanced with hydroxyapatite, significantly facilitate early cell adhesion and promote effective osseointegration[8]. Additionally, additively manufactured zirconia tools provide dual functionality as surgical instruments and scaffold structures, improving recovery through targeted drug delivery and mechanical support [9]. Furthermore, zirconia ceramics offer superior aesthetic outcomes in dental restorations, closely mimicking natural tooth appearance and ensuring durability [10].

Despite these promising characteristics, the inherent brittleness of zirconia ceramics poses challenges, emphasizing the necessity for ongoing research to optimize their mechanical properties for high-stress biomedical applications. The continued exploration and development of bioactive zirconia glass ceramics represent significant advancements towards safer, sustainable, and more effective radiation shielding solutions specifically tailored for medical and healthcare settings. There is an increasing number of studies investigating different materials for shielding purposes [11].

This study investigates zirconia (ZrO_2)-doped transparent glass ceramics (TGCs), originally developed and characterized by Mishra et al. to evaluate their potential as advanced radiation shielding materials in biomedical applications, particularly within dental and orthopedic contexts[12]. Based on the $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-P}_2\text{O}_5$ composition, Mishra et al. incrementally substituted calcium oxide (CaO) with varying molar percentages of ZrO_2 (0 to 6 mol%) to examine how this substitution affects critical physical, structural, and biological properties relevant to radiation protection.

The TGCs synthesized using the conventional melt-quench method exhibited increases in density and structural compactness proportional to the ZrO_2 content. Structural characterizations conducted through X-ray diffraction (XRD) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) revealed significant network modifications, higher density, and reduced particle sizes, indicating enhanced radiation attenuation potential. Further optical characterization and morphological assessments through Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) provided deeper insights into structural improvements and optimized optical properties.

Biological evaluations via in vitro cytotoxicity and cell viability assays demonstrated excellent biocompatibility and safety, reinforcing the suitability of these TGCs as effective, environmentally friendly alternatives to traditional lead-based radiation shielding. Building upon the investigation conducted by Mishra et al. (2024), this research elucidates zirconia-doped transparent glass-ceramics (TGCs) as highly promising candidates for sustainable and biocompatible radiation shielding applications within the realm of medical implantology[12]. The aim of this study is to systematically evaluate the radiation shielding characteristics of zirconia-doped transparent glass-ceramics (TGCs) synthesized from the $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-P}_2\text{O}_5$ compositional framework.

2. Materials and Methods

2.1. Synthesis of Glass Ceramics

Transparent glass ceramics (TGCs) with the specific formulations of $55\text{SiO}_2\text{-}25\text{Na}_2\text{O-(}15\text{-x)CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5\text{-xZrO}_2$ (where $x = 0, 2, 4$, and 6 mol%) were synthesized utilizing the conventional melt-quench methodology, in accordance with previously delineated protocols (Mishra et al., 2024). High-purity chemical precursors—including silicon dioxide (SiO_2 , 99%, Sigma Aldrich), disodium oxide (Na_2O , 80%, Sigma Aldrich), calcium oxide (CaO, 95%, Himedia), phosphorus pentoxide (P_2O_5 , 98%, Sigma Aldrich), and zirconium dioxide (ZrO_2 , ~99%, Sigma Aldrich)—were meticulously weighed, comprehensively mixed utilizing an agate mortar in conjunction with acetone

to ensure uniformity, melted at a temperature of 1350°C for a duration of 1 hour, quenched onto stainless steel molds, subjected to annealing at 450°C for 4 hours, and subsequently cooled gradually to ambient temperature.

Sample Classification:

TGC-BG1: $55\text{SiO}_2 + 25\text{Na}_2\text{O} + 15\text{CaO} + 5\text{P}_2\text{O}_5 + 0\text{ZrO}_2$, density = 2.535 g/cm^3

TGC-BG2: $55\text{SiO}_2 + 25\text{Na}_2\text{O} + 13\text{CaO} + 5\text{P}_2\text{O}_5 + 2\text{ZrO}_2$, density = 2.633 g/cm^3

TGC-BG3: $55\text{SiO}_2 + 25\text{Na}_2\text{O} + 11\text{CaO} + 5\text{P}_2\text{O}_5 + 4\text{ZrO}_2$, density = 2.769 g/cm^3

TGC-BG4: $55\text{SiO}_2 + 25\text{Na}_2\text{O} + 9\text{CaO} + 5\text{P}_2\text{O}_5 + 6\text{ZrO}_2$, density = 2.910 g/cm^3

The detailed characterization of these materials, including density, molar volume, optical, structural, and biological properties, were adopted implicitly from Mishra et al. (2024) [12].

2.2. Theoretical expectations and Monte Carlo simulations

The parameters governing the photon interaction were simulated via the PHITS 3.22 Monte Carlo code, which offered detailed elucidation of the time-dependent, continuous-energy transport of particles and photons within a three-dimensional geometry. The geometry employed in the PHITS 3.22 simulations is depicted in Figure 1.

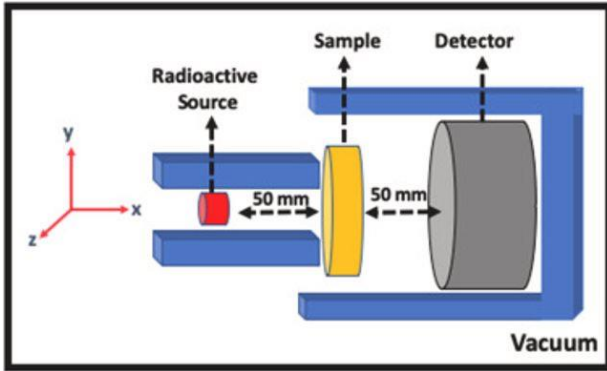


Figure 1. Schematic representation Monte Carlo geometry

In the framework of the simulation configuration, lead blocks were implemented to provide shielding for both the gamma-ray source and the detection apparatus. The detection system was assigned the responsibility of quantifying the photon flux, which was articulated in the units of $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. These empirical observations were subsequently integrated into the Beer-Lambert law to determine the linear attenuation coefficient, taking into account the specific photon energy and the thickness of the material. For the simulation processes, T-Track tally was employed in the PHITS platform[13]. The particle histories were calibrated to a value of 10^7 . The attenuation parameters that were computed were then juxtaposed with those derived from the Phy-X/PSD software. The

compositions and densities of the samples were introduced into the Phy-X/PSD system, gamma energy ranges were selected, and computational methods were set accordingly to analyze the shielding performance of TGCs comprehensively across the energy range of 0.015–15 MeV. The Phy-X/PSD software (Şakar et al., 2020), accessible as open-source and online, was specifically designed for radiation shielding and dosimetry calculations. This software was developed using NodeJS v8.4.0, secured with Nginx 1.15.8, and built upon a 256-bit PositiveSSL certification. Detailed information and access to the software are available at: <https://phy-x.net/PSD>.

The software's versatility enables analysis across a broad gamma photon energy spectrum (0.015–15 MeV), making it suitable for diverse biomedical applications. Its capability to handle a wide variety of materials, coupled with its integration with complementary analytical tools like EPICS2017, XCOM, and MCNPX, ensures reliable and accurate results. Furthermore, Phy-X/PSD's user-friendly interface, customizable reporting options, and comprehensive documentation facilitate straightforward interpretation and dissemination of research findings. Consequently, this software played an essential role in confirming the potential of zirconia-doped TGCs as effective, environmentally friendly radiation shielding materials in medical implantology.

In brief, the software has been shown to produce accurate and reliable results, with good agreement between theoretical and experimental data. This high level of accuracy makes it a trusted tool for radiation shielding analysis[14]. The software calculations required accurate input of the chemical compositions and densities as detailed above and in the referenced work[12].

The gamma photon energy spectrum optimized to 0.015–15 MeV; and within this energy range the LAC, MAC, HVL, TVL, MFP, Zeff and Neff are assessed. The MAC of multi-element materials—such as alloys, minerals, or compounds—can be theoretically estimated using the mixture rule method. The mass attenuation coefficients were determined by the theoretical mixture-rule method, represented mathematically by the following equation:

$$(\mu/\rho)_{\text{material}} = \sum_i W_i (\mu/\rho)_i \quad (1)$$

Where respectively W_i and $(\mu/\rho)_i$ represent the weight-fraction and the MAC of the i^{th} element. Elemental weight fractions were calculated as follows:

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum_j n_j A_j} \quad (2)$$

where n_i and A_i denote the element-number and the atomic-weight of the i^{th} element, respectively.

The mass attenuation coefficient is an intrinsic material parameter that is independent of both the material's density and its physical state[15]. The LAC is a parameter that is contingent upon density and is affected by the physical state of the material; it is determined by the product of the mass attenuation coefficient and the density of the material in question. The following radiation shielding parameters were computed by utilizing the LAC (μ):

$$\text{Half-value layer (HVL): } HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3)$$

$$\text{Tenth-value layer (TVL): } TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (4)$$

$$\text{Mean free path (MFP): } MFP = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Further, molecular ($\sigma_{t,m}$), atomic ($\sigma_{t,a}$), and electronic cross-sections ($\sigma_{t,e}$) were determined using mass attenuation coefficients, following these relations:

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{N} (\mu/\rho)_{\text{mater}} \sum_i (n_i A_i) \quad (6) \text{ and}$$

$$\sigma_{t,a} = \frac{\sigma_{t,m}}{\sum_i n_i} \quad (7) \text{ and}$$

$$\sigma_{t,e} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu/\rho)_i \quad (8)$$

The effective atomic number (Z_{eff}) was calculated as[16]:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}} \quad (9)$$

Finally, the effective-electron-density can be calculated through the equation below:

$$N_{\text{eff}} = \frac{Z_{\text{eff}}}{A_{\text{tot}}} (N n_{\text{tot}}) \quad (10)$$

where A_{tot} and n_{tot} represent the total-atomic-weight and total-number of elements in the material, respectively.

3. Result and Discussion

This study evaluates the gamma radiation attenuation characteristics of various bioactive zirconia (ZrO_2)-doped transparent glass ceramics (TGCs) formulations, each distinguished by their chemical composition and density as outlined in Table 1. The photon interaction properties were examined over an extensive energy range—from 0.015 MeV to 15 MeV—utilizing the The Phy-X/PSD software and PHITS 3.22 Monte Carlo simulation code.

Table 1. Sample code, chemical composition of the investigated TGC (mol %) in SiO_2 - Na_2O - CaO - P_2O_5 - ZrO_2 system

Sampl e Name	SiO 2	Na2 O	Ca O	P2O 5	ZrO 2	Density (g/cm ³)
BG1	55	25	15	5	0	2.535
BG2	55	25	13	5	2	2.633
BG3	55	25	11	5	4	2.769
BG4	55	25	9	5	6	2.910

The initial phase of the analysis focused on determining the mass attenuation coefficients (MACs) for the zirconia (ZrO_2)-doped transparent glass ceramics (TGCs) by using the software and simulation codes.

Figure 2 illustrates the variation in mass attenuation coefficients (MACs) of the ZrO_2 -doped transparent glass-ceramics (TGCs) against photon energy, while Table 2 lists the corresponding values computed with the Phy-X/PSD software and the PHITS-3.22 Monte Carlo code. The two datasets agree closely. For the best-performing BG4 sample, the MAC drops from $8.040 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ at 0.015 MeV to $0.022 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ at 15 MeV, a 99.7 % reduction. At 0.015 MeV, BG4's half-value layer is 0.0030 cm, 16.7 % thinner than BG1 (0.0036 cm), while its density is 2.910 g cm^{-3} , 14.8 % higher than BG1 (2.535 g cm^{-3}), underscoring how ZrO_2 enrichment yields a more compact and efficient shield.

Table 2. μ/ρ ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) results for the glass ceramics.

Energy (MeV)	BG1			BG2			BG3			BG4		
	Phy- X/PSD	PHITS	Dev. %	Phy- X/PSD	PHITS	Dev. %	Phy- X/PSD	PHITS	Dev. %	Phy- X/PSD	PHITS	Dev. %
0.015	7.533	7.526	0.09	7.709	7.716	0.09	7.878	7.882	0.04	8.040	8.044	0.05
0.02	3.309	3.302	0.19	5.104	5.106	0.03	6.828	6.835	0.10	8.483	8.490	0.08
0.03	1.106	1.108	0.15	1.728	1.726	0.15	2.326	2.324	0.10	2.900	2.898	0.05
0.04	0.564	0.569	0.91	0.849	0.849	0.03	1.123	1.123	0.02	1.385	1.384	0.07
0.05	0.369	0.372	0.81	0.522	0.524	0.38	0.669	0.670	0.17	0.810	0.810	0.01
0.06	0.280	0.283	1.01	0.372	0.372	0.22	0.459	0.461	0.33	0.544	0.545	0.21
0.08	0.205	0.206	0.39	0.245	0.245	0.05	0.284	0.284	0.02	0.321	0.321	0.28
0.1	0.174	0.175	0.48	0.195	0.195	0.10	0.215	0.215	0.07	0.234	0.234	0.12
0.15	0.141	0.142	0.39	0.147	0.148	0.54	0.153	0.154	0.42	0.159	0.160	0.28
0.2	0.125	0.126	0.31	0.128	0.128	0.26	0.130	0.131	0.45	0.133	0.133	0.55
0.3	0.107	0.107	0.52	0.108	0.108	0.49	0.108	0.109	0.58	0.109	0.109	0.23
0.4	0.095	0.095	0.31	0.095	0.096	0.65	0.096	0.096	0.43	0.096	0.096	0.32
0.5	0.087	0.087	0.14	0.087	0.087	0.41	0.087	0.087	0.23	0.087	0.087	0.49
0.6	0.080	0.081	0.58	0.080	0.080	0.54	0.080	0.080	0.49	0.080	0.080	0.60
0.8	0.070	0.070	0.20	0.070	0.070	0.35	0.070	0.070	0.29	0.070	0.070	0.44
1	0.063	0.063	0.17	0.063	0.063	0.31	0.063	0.063	0.39	0.063	0.063	0.29
1.5	0.051	0.052	0.93	0.051	0.052	1.34	0.051	0.052	0.87	0.051	0.051	0.29
2	0.044	0.045	0.87	0.044	0.044	0.56	0.044	0.045	1.38	0.044	0.045	1.36
3	0.036	0.037	1.47	0.036	0.036	0.91	0.036	0.037	1.28	0.036	0.036	0.73
4	0.032	0.032	0.19	0.032	0.032	0.85	0.032	0.032	0.93	0.032	0.032	0.82
5	0.029	0.029	1.02	0.029	0.029	0.91	0.029	0.029	0.36	0.029	0.029	0.57
6	0.027	0.027	0.66	0.027	0.027	0.67	0.027	0.027	1.30	0.027	0.027	0.25
8	0.024	0.024	0.28	0.024	0.024	0.15	0.025	0.025	0.78	0.025	0.025	1.39
10	0.023	0.023	0.51	0.023	0.023	0.58	0.023	0.023	0.39	0.024	0.024	1.09
15	0.021	0.021	0.91	0.022	0.022	0.75	0.022	0.022	0.40	0.022	0.022	0.16

Figure 2 presents how the MACs evolve with increasing photon energy. A clear exponential decline is observed, reflecting the inherent relationship between photon energy and attenuation efficiency. The observed behavior is intrinsically dependent on the elemental constituents of the glass ceramics (TGCs) matrices.

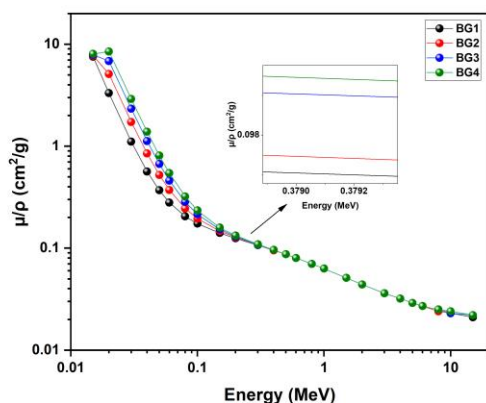


Figure 2. Mass attenuation coefficient of the zirconia doped transparent glass ceramics system with photon energy 0.015 MeV to 15 MeV

At lower photon energies, a pronounced drop in MACs is evident, which becomes more gradual in the intermediate (0.5 – 2 MeV) and higher energy domains (2 – 15 MeV). This phenomenon is associated with the primary mechanisms of photon interactions: photoelectric absorption occurring at lower energy levels, Compton scattering manifesting in the intermediate energy range between 0.5 – 2 MeV, and pair production taking place at elevated energy levels.

The dependencies of these mechanisms are governed by the photon energy (E) and atomic number (Z) of the constituent elements. Specifically, the photoelectric cross-section varies approximately as $E^{-3.5}$ and Z^{4-5} ; Compton scattering exhibits E^{-1} and Z dependence; and pair production increases with E and Z^2 .

In light of these proportional relationships, the exponential decline in mass attenuation coefficients with increasing photon energy becomes more comprehensible.

As illustrated in Figure 2, the glass-ceramic sample labeled BG4, which contains a high concentration of ZrO_2 in place of a lower CaO content, exhibits higher MACs, particularly in the low-energy region between 0.015 – 0.5 MeV. A more important gamma radiation shielding parameter is the LAC, which combines the MAC with the physical density of the material. Figure 3 illustrates the LACs for each glass ceramic's a function of incident photon energy.

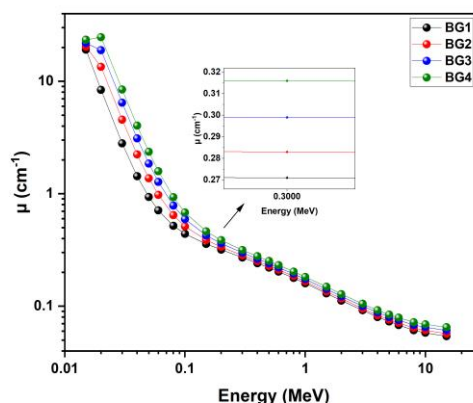


Figure 3. Linear attenuation coefficient of the zirconia doped transparent glass ceramics system with photon energy 0.015 MeV to 15 MeV

The energy-dependent behavior of LACs show that of the MACs, demonstrating an exponential decline as energy increases. For instance, at 0.015 MeV, the LACs for BG1 through BG4 are calculated to be 19.096, 20.298, 21.815, and 23.398 cm^{-1} , respectively. At 0.6 MeV, these values diminish to 0.203, 0.211, 0.221, and 0.232 cm^{-1} .

It is noted that the disparity between the LACs decreases as the photon energy escalates. This phenomenon can be ascribed to the prevailing mechanisms of photon-matter interactions, as evidenced by the characteristics of the MACs throughout the low, medium, and high energy domains between 2 – 15 MeV. Although all investigated bioactive glasses exhibit effective gamma radiation shielding in the low-energy region between 0.015 – 0.5 MeV, the BG4 sample—characterized by its high LAC and density—demonstrates superior shielding capacity compared to the other compositions. Among the selected glass ceramics, BG4 consistently exhibits the highest LACs, affirming its enhanced gamma shielding capability.

Material thickness plays a critical role in shielding calculations. The thickness required to reduce the intensity of incident photons by 50% is referred to as the HVL, whereas the thickness needed to attenuate the intensity to one-tenth of its original value is known as the TVL. The layer-thickness for reducing the intensity of incident photons to approximately 36.8% of its initial value is termed the MFP. These parameters presents the details of the penetration capabilities of various types of radiation and their interaction with specific materials. Consequently, they are among the most commonly employed metrics for evaluating shielding effectiveness and material performance in radiation protection design. These parameters, plotted in Figures 4 through 6, are inversely related to the LAC.

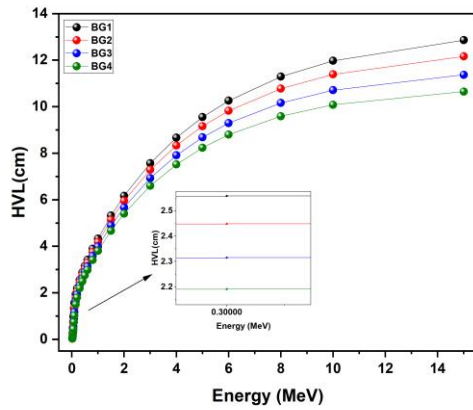


Figure 4. Half value layer (HVL) of the zirconia doped transparent glass ceramics system with photon energy 0.015 MeV to 15 MeV

Across the photon energy spectrum ranging from 0.015 to 15 MeV, HVL-TVL and MFP parameters are elucidated in this inquiry. Figure 4 delineates the HVL measurements of the chosen samples as a function of both photon energy and doping concentration. In a parallel manner, Figures 5 and 6 depict the TVL and MFP values, respectively, for the identical samples under fluctuating photon energies and doping concentrations[17].

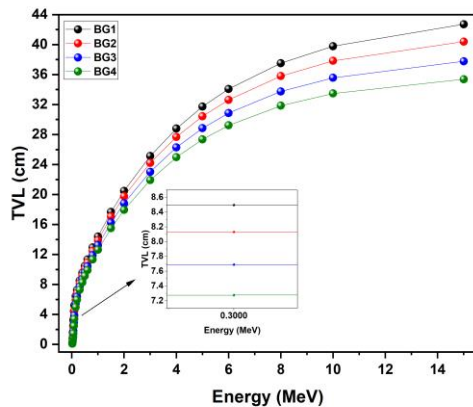


Figure 5. Tenth value layer (TVL) of the zirconia doped transparent glass ceramics system with photon energy 0.015 MeV to 15 MeV

In the range of energies between 0.015-15 MeV, HVL values for BG1 are 0.0036–12.858 cm, 0.0034–12.161 cm for BG2, 0.0032–11.371 cm for BG3, 0.0030–10.649 cm for BG4. The above Figure 4 shows these values. Figure 5 shows that TVL values for BG1, BG2, BG3, and BG4 are 0.121–42.713, 0.113–40.397 cm, 0.106–37.773 cm, and 0.098–35.377 cm in the energy range 0.015-15 MeV. In the energy range between 0.015 to 15 MeV, MFP values for BG1 are 0.052–18.550 cm, 0.049–17.544 cm for BG2, 0.046–16.405 cm for BG3 and 0.043–15.364 cm for BG4. These values can be seen in Figure 6. Lower values of MFP, HVL, and TVL correspond to greater radiation attenuation efficiency. Figure 6 specifically illustrates the MFP values of the

glass samples across the photon energy range of 0.015 to 15 MeV.

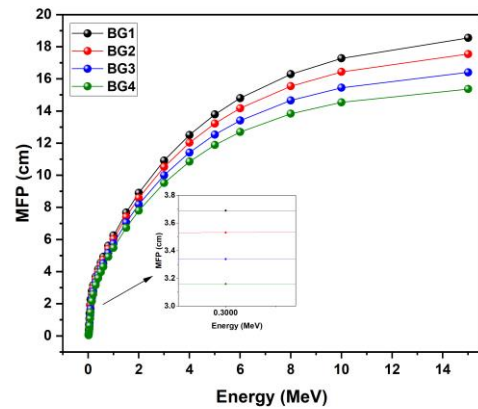


Figure 6. Mean free path (MFP) of the zirconia doped transparent glass ceramics system with photon energy 0.015 MeV to 15 MeV

Among the analyzed specimens, BG4 demonstrates the minimum values for MFP, HVL, and TVL, signifying an exceptional performance in radiation attenuation. The fluctuations in HVL and TVL values across varying photon energies are depicted in Figures 4 and 5. Based on the graphical representations, it is evident that HVL and TVL values exhibit a direct correlation with photon energy, exhibiting an increase concomitant with rising energy levels. Conversely, as photon energy diminishes, the MFP values—conceptually linked to HVL and TVL—also experience a decrease.

Nevertheless, the linear correlation between photon energy and the metrics of MFP, HVL, and TVL alters at energy levels of 10 MeV and beyond. Within this elevated energy spectrum, the values of HVL, TVL, and MFP demonstrate minor variances, as illustrated in Figures 4, 5, and 6.

In the medium to high photon energy domains between 2 – 15 MeV, the impact of chemical composition on shielding efficacy becomes increasingly pronounced. Specifically, the BG1 alloy reveals the highest HVL values, suggesting diminished attenuation efficiency, while the BG4 alloy displays the lowest HVL values, indicative of its superior capability in radiation attenuation. At lower photon energies, variations in energy exert minimal influence on the chemical structure of the shielding materials, contrasting with the more significant effects observed at heightened energies. Consequently, BG4 persistently showcases the lowest HVL, TVL, and MFP values among all specimens. In terms of material density, a higher density is directly correlated with reduced HVL, TVL, and MFP values, thereby indicating an enhanced capability for radiation attenuation.

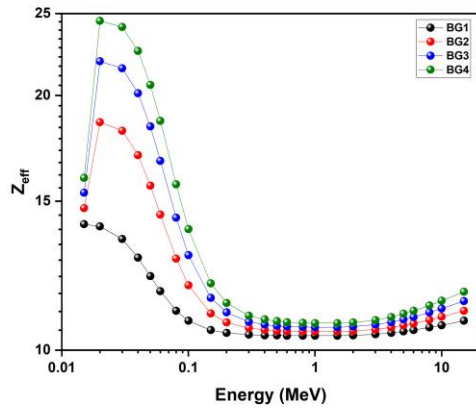


Figure 7. Effective atomic numbers of the zirconia doped transparent glass ceramics system with photon energy 0.015 MeV to 15 MeV

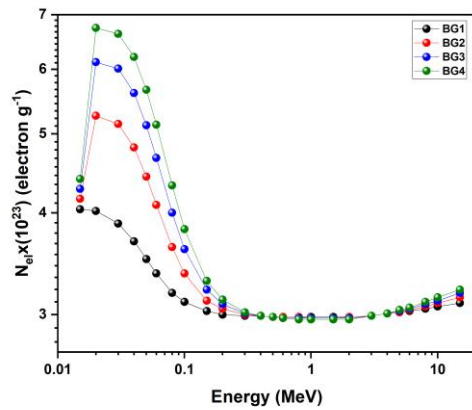


Figure 8. The variation of N_{eff} values with photon energy for the zirconia doped transparent glass ceramics system

Complementing these parameters, Figures 7 and 8 present the theoretical profiles of the Z_{eff} and N_{eff} over the full range of photon energies. Both Z_{eff} and N_{eff} decrease with increasing energy, displaying trends analogous to the MACs[18]. As illustrated in the figure, the Z_{eff} 's of the bioactive glass samples follow the order $BG4 > BG3 > BG2 > BG1$. Given the direct proportionality between Z_{eff} and N_{eff} , similar trends were observed for both parameters with respect to photon energy and the concentration of the dopant. Among all tested compositions, BG4—reinforced with ZrO_2 —demonstrates the most favorable combination of high Z_{eff} and electron density, reinforcing its position as the most effective gamma radiation shielding material within the investigated group.

4. Discussion and Conclusion

This investigation scrutinized the gamma radiation attenuation traits of transparent glass-ceramics blended with zirconia (ZrO_2) across a diverse photon energy spectrum spanning from 0.015 to 15 MeV. Importantly, no previous investigations have systematically evaluated how incremental increases

in ZrO_2 concentration—while preserving complete transparency—impact the entire array of photon interaction parameters (MAC, LAC, HVL, TVL, MFP, Zeff, Neff) within this extensive spectrum that spans from diagnostic to therapeutic energy ranges.

The Phy-X/PSD software in conjunction with the PHITS 3.22 Monte Carlo simulation code was utilized for this research. The results indicated that for the glass-ceramics analyzed, the mass attenuation coefficients (MACs), linear attenuation coefficients (LACs), effective atomic number (Z_{eff}), and effective electron density (N_{eff}) exhibited a decrement with the augmentation of photon energy. In contrast, the half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), and mean free path (MFP) manifested an increment with elevated photon energies. A comprehensive assessment of all computed gamma radiation shielding parameters elucidated that all glass-ceramic specimens exhibited commendable shielding capabilities in the low-energy spectrum, with the BG4 specimen showcasing the most exceptional performance among the evaluated samples.

References

- [1] Hussein, K. I., et al. 2022. Optical and radiation shielding properties for novel glass material: $TeO_2/Nb_2O_5/Ta_2O_5/La_2O_3$. *CL*, 19(6), 417-427.
- [2] Usman, I., Mohd Sanusi, M. S., Ahmad, N. E., Thabit, H. A. 2024. Optical, thermal, and radiation shielding characterization of bismuth-modified zinc-lithium-tungsten-borate glass. *Physica Scripta*, 99(12), 125972.
- [3] Ruengsri, S. 2014. Radiation shielding properties comparison of Pb-based silicate, borate, and phosphate glass matrices. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014, 1-5.
- [4] Beall, G. H., et al. 2017. Zirconia-toughened glass ceramics. Patent WO2017223561A1. <https://patents.google.com/patent/WO2017223561A1/en> (Erişim Tarihi: 03.05.2025).
- [5] Pasiut, K., Partyka, J. 2017. The influence of ZrO_2 addition on the thermal properties of glass-ceramic materials from $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-K_2O-CaO$ system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 130(1), 343-350.
- [6] Xing, Z., Pang, Y., Li, Q. B. E., Zhang, J. Y., Xu, D. 2024. Modification of zirconia with hydroxyapatite for bioactive enhancement as dental implants. *Research Square* Preprint.
- [7] Xing, Z., Pang, Y., Li, E., Zhang, J. Y., Xu, D. 2024. Preparation and characterisation of zirconia/hydroxyapatite bioactive composites as potential dental implants. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19(1), 43.
- [8] Sivasankar, M. V., Chinta, M. L., Rao, P. S. 2024. Zirconia based composite scaffolds and their

- application in bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 558.
- [9] Wang, B., et al. 2024. 3D printed zirconia ceramic tool for bone repair with multifunction of drug release, drilling and implantation. *Ceramics International*, 50(18), 33143-33152.
- [10] Han, M.-K. 2024. Advances and challenges in zirconia-based materials for dental applications. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 61(5), 783-799.
- [11] Kılıçoğlu, O., Mehmetcik, H. 2021. Science mapping for radiation shielding research. *Radiation Physics and Chemistry*, 189, 109721.
- [12] Mishra, R. K., et al. 2024. Fabrication of bioactive transparent glass ceramics $55\text{SiO}_2\text{-}25\text{Na}_2\text{O-(15-x)CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5\text{-xZrO}_2$ ($0 \leq x \leq 6$): physical, structural and in-vitro cell viability insights for biomedical applications. *Ceramics International*, 50(9), 14550-14570.
- [13] Özdoğan, H., Kacal, M. R., Kılıçoğlu, O., Polat, H., Ögöl, H., Akman, F. 2025. Experimental, simulation, and theoretical investigations of gamma and neutron shielding characteristics for composites reinforced with boron carbide and titanium oxide. *Radiation Physics and Chemistry*, 226, 112167.
- [14] Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., Kurtuluş, R., Javier-Hila, A. M. V., Kaky, K., Kavas, T. 2021. X-ray shielding characteristics of $\text{P}_2\text{O}_5\text{-Nb}_2\text{O}_5$ glass doped with Bi_2O_3 by using EPICS2017 and Phy-X/PSD. *Applied Physics A*, 127(4), 243.
- [15] Kılıçoğlu, O. 2019. Characterization of copper oxide and cobalt oxide substituted bioactive glasses for gamma and neutron shielding applications. *Ceramics International*, 45(17), 23619-23631.
- [16] Kılıçoğlu, O., Tekin, H. O. 2020. Bioactive glasses with TiO_2 additive: behaviour characterization against nuclear radiation and determination of buildup factors. *Ceramics International*, 46(8), 10779-10787.
- [17] Kılıçoğlu, O., Tekin, H. O. 2020. Bioactive glasses and direct effect of increased K_2O additive for nuclear shielding performance: a comparative investigation. *Ceramics International*, 46(2), 1323-1333.
- [18] Kılıçoğlu, O., et al. 2022. Micro Pb filled polymer composites: theoretical, experimental and simulation results for γ -ray shielding performance. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110039.

Isparta Işıkkent Mahallesi Pomzalı Zeminin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi

Kutay GÜLER*¹ , S. Nilay KESKİN*² 

^{1,2}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 09.04.2025, Kabul / Accepted: 30.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Pomza zemini,
Dinamik basit kesme deneyi,
Sıvılaşma potansiyeli,
Hacimsel deformasyon

Öz: Bu çalışmada, Isparta'nın Işıkkent Mahallesi'nde bulunan inşaat sahasından alınan pomza içeren zemin numunesinin doymun haldeki drenajsız ve drenajlı dinamik davranışları incelenmiştir. Çalışmada, VJ Tech DSS-C dinamik basit kesme cihazı kullanılarak gerilme kontrollü deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 0.2, 0.25 ve 0.3 olmak üzere üç farklı dinamik gerilme oranında, 1 Hz frekansta tekrarlı yüklemelere tabi tutulmuştur. Drenajsız deneylerde numunelerin sıvılaşma eğilimleri ve aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi değerlendirilirken, drenajlı deneylerde hacimsel deformasyon ve düşey efektif gerilme değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar, dinamik gerilme oranının artışıyla kayma deformasyonlarının büyüdüğünü ve drenajsız koşullarda numunelerin sıvılaşma potansiyelinin arttığını göstermektedir. Drenajlı deneylerde ise zeminlerin hacimsel deformasyona uğradığı belirlenmiştir. Çalışma, pomza içeren zeminlerin dinamik özelliklerinin mühendislik açısından değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Determination of Dynamic Properties of Pumice Soil in Isparta Işıkkent District

Keywords

Pumice soil,
Dynamic simple shear test,
Liquefaction potential,
Volumetric strain

Abstract: In this study, the saturated undrained and drained dynamic behaviors of a pumice-containing soil sample collected from a construction site located in the Işıkkent District of Isparta were investigated. Stress-controlled tests were conducted using the VJ Tech DSS-C dynamic simple shear device. The samples were subjected to cyclic loading at a frequency of 1 Hz under three different cyclic stress ratios: 0.2, 0.25, and 0.3. In the undrained tests, the liquefaction tendency of the samples and the development of excess pore water pressure were evaluated, while in the drained tests, volumetric deformation and changes in vertical effective stress were examined. The results indicate that an increase in cyclic stress ratio leads to greater shear deformations and a higher liquefaction potential under undrained conditions. In the drained tests, the soils were observed to undergo volumetric deformation. This study contributes to the engineering evaluation of the dynamic properties of pumice-containing soils.

1. Giriş

Depremlerin yeryüzünde oluşturacakları etkiler, depremin karakteristiğine, bölge zemininin özelliklerine, doğru temel tipinin seçimine ve uygun yapı dizaynına göre değişmektedir. Özellikle depremin gerçekleştiği zeminlerin, mühendislik özelliklerinin önceden belirlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu duruma örnek olarak 27.06.1998 tarihinde gerçekleşmiş 6,2 büyüklüğündeki Ceyhan depremi, 17.08.1999 tarihinde gerçekleşmiş 7,8

büyüklüğündeki Gölcük depremi ve 01.05.2003 tarihinde gerçekleşmiş 6,4 büyüklüğündeki Bingöl depremi gösterilebilir. Bu depremlerde en çok hasar, genellikle dolgu gibi zayıf, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu vb. zeminlerde görülmüştür. Bu durum, deprem dalgalarının oluşturdukları etkilerin, geçtikleri zeminin özelliklerine göre değişime uğradığını göstermektedir. Verilen örneklerden de görüleceği üzere bir bölgenin yerel zemin özellikleri ile depremin oluşturduğu etkiler arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır [1].

*Sorumlu yazar: kutayguler81@gmail.com

Öncelikle temellerin üzerine inşa edildiği zeminin mühendislik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. İyi tasarlanmış bir temel tasarımı, zeminin olumsuz koşullarında bile üst yapı yükünü zemin tabakasına güvenle aktarmalıdır. Bir yapı ve temeli çeşitli afet durumlarında hasar görmeden görevini devam ettirebildiği sürece başarılı bir tasarım ve uygulama yapıldığı söylenebilir. Bu da zeminin statik davranışının yanında, deprem yükleri altındaki dinamik davranışının da iyi bilinmesini gerektirmektedir [2].

Pomza bakımından zengin zeminler, bir kısmı Isparta il merkezinin yerleşim alanı altında, Isparta'nın batı, kuzey batı ve güney batısında yaklaşık 150 m² alana yayılmıştır [3]. Pomza parçacıkları, gözenekli yapıları nedeniyle son derece ezilebilir, sıkıştırılabilir ve hafiftir [4-7]. Bu özellikler nedeniyle pomza içeren zeminler, taşıma gücü ve dinamik şartlar altındaki davranışı açısından sorunlu olabilmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda karbonat kumu, Shirasu volkanik kumu, kireçli kum, Masado, granüle kömür külü ve ticari olarak temin edilebilen saf pomza gibi kırılabilir malzemelerin dinamik davranışı araştırılmış olsa da pomza içeren doğal zeminlerin sismik tepkisi hakkında pek fazla çalışma bulunmamaktadır [8].

Literatürde pomzanın dinamik davranışını inceleyen çalışmaların büyük çoğunluğu, drenajsız koşullara ve sıvılaşma potansiyeline odaklanmaktadır. Ancak, Isparta ilinde yeraltı su seviyesinin yüzeyden oldukça derinde bulunması, pomzanın drenajlı koşullardaki davranışının da araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, Isparta ilinin Işıkkent Mahallesi'nden alınan örselenmiş pomza numuneleri üzerinde drenajsız ve drenajlı dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları karşılaştırılarak, pomzanın drenajlı ve drenajsız koşullardaki dinamik davranışı arasındaki farklılıklar değerlendirilmiştir.

2. Literatür Özeti

Bu bölümde, literatürde ince ve iri danelerle gerçekleştirilen dinamik deneyler ile pomza zeminine üzerine yapılan çalışmaların özetleri sunulmaktadır.

1998 yılında Marks vd. Yeni Zelanda pomza kumunun dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Pomzanın sıvılaşma tepkisinin kuvars kumlarına benzediği ancak düşük şekil değiştirme kayma modülünün daha da düşük olduğu belirlenmiştir. Pomza kumunun orta şekil değiştirme aralığında doğrusal davrandığı, ancak büyük şekil değiştirmelerde hızla doğrusal olmayan davranış sergilediği tespit edilmiştir [9].

2002 yılında Teachavorasinskun vd. tarafından yapılan çalışmada örselenmemiş Bangkok kil numunelerinin kayma modülü ve sönüm oranı dinamik üç eksenli cihaz ile ölçülmüştür. Kayma modülü literatürdeki benzer killerle uyumlu

bulunmuş, sönüm oranlarının küçük deformasyonlarda %4-5; büyük deformasyonlarda %25-30 arasında değiştiği belirlenmiştir. Deney frekansının kayma modülü üzerinde etkisi olmadığı, ancak sönüm oranını azalttığı gözlemlenmiştir [10].

2003 yılında Altun ve Ansal suya doymuş kumların dinamik yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, çevre gerilmesi, çevrim sayısı ve boşluk oranı gibi faktörlerin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, çevre basıncı ve çevrim sayısının kayma modülünü artırdığını, ancak sönüm oranını azalttığını göstermiştir [11].

2003 yılında Okada vd. Yeni Zelanda'daki pomza zeminlerde sismik tasarım uygulamalarını incelemişlerdir. Geleneksel sıvılaşma analiz yöntemlerinin güvenilir olmadığı belirlenmiştir. Pomza zeminlerde bazı arazi testleri güvenilir bulunurken, koni penetrasyon deneyi (CPT) ve Scala penetrometresinin düşük güvenilirlik gösterdiği belirlenmiştir. Zeminin sıklığı artırılarak sıvılaşma riskinin azaltıldığı belirlenmiştir [12].

2004 yılında Sitharam vd. Ahmedabad bölgesinden alınan zemin numunelerinin dinamik zemin özelliklerini ve sıvılaşma potansiyelini incelemişlerdir. Farklı sıklıklardaki kum numunelerine 1 Hz frekansta yükleme uygulanmış ve sıklık arttıkça kayma modülünün yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca, sıklığın artması sıvılaşma potansiyelini azaltmıştır [13].

2005 yılında Elibol ve Erken doymuş, kısmi doymuş ve kuru kum numunelerinin dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmada, Skempton-B parametresi, elastisite modülü ve göçme direnci ilişkisini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, doymuşluk derecesi düşük numunelerin sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir [14].

2006 yılında Pender vd. Yeni Zelanda pomza kumunun geoteknik özellikleri araştırmışlardır. Pomzanın yüksek boşluk oranı ve kırılabilir taneleri nedeniyle sıkıştırılabilir bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Normal gerilme seviyelerinde bile taneli kırılma görülmüş, bu durumun kayma mukavemeti ve sertliği üzerinde büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir [5].

2008 yılında Meidani vd. çakıl-kil karışımlarının dinamik yükler altındaki davranışlarını inceleyerek çakıl içeriği ve şeklinin kayma modülü ile sönüm oranına etkisini araştırmışlardır. Yuvarlak çakılların daha iyi sıkıştığı ve daha yüksek kayma modülüne sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, yuvarlak çakılların sönüm oranlarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [15].

2008 yılında Salvati ve Anhdan yükleme frekansının kumların dinamik davranışına etkisini

incelemişlerdir. Düşük frekanslı yüklemelerde daha büyük eksenel şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir. Özellikle ilk birkaç döngüde şekil değiştirme hızının frekansa bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir [16].

2015 yılında Cai vd. kum numunelerinde bender eleman (BE) deneyleri yaparak kayma dalgası hızlarını araştırmışlardır. BE deneyleri ile rezonant kolon (RC) ve burulmalı kesme (TS) deneylerinden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. İnce dane içeriğinin kayma dalgası hızını etkilediği ve Biot teorisinin BE deneylerinde daha uygun olduğu belirlenmiştir [17].

2016 yılında Karakan ve Altun Bayraklı bölgesinden alınan siltli kumların sıvılaşma davranışını incelemişlerdir. Silt içeriği %40'ın altında ise sıvılaşmaya yatkınlık artarken, %40'ın üzerinde direnç sağladığı tespit edilmiştir. Silt içeriği arttıkça hacimsel deformasyonların arttığı belirlenmiştir [18].

2017 yılında Monkul vd. kuru kum numunelerinin sıvılaşma potansiyelini dinamik basit kesme deneyleriyle incelemişlerdir. Çalışmada, çevrimsel kayma gerilmesi oranı azaldıkça sıvılaşma direncinin arttığını gösterilmiştir. Rölatif sıkılığın artırılmasının sıvılaşma direncini yükselttiği belirlenmiştir [19].

2018 yılında Asadi vd. pomza kumlarının sıvılaşma direnci, kayma dalgası hızı (V_s) bazlı yöntemle araştırmışlardır. Pomzanın düşük (V_s) ve yüksek çevrimsel direnç oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Mevcut çevrimsel dayanım oranı (CRR)- V_s korelasyonlarının pomza kumları için güvenilir olmadığı, bu ilişkilerin yeniden değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [20].

2018 yılında Hubler vd. çakıllı zeminlerin monotonik ve tekrarlı kayma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, çakıl-kum karışımlarının rölatif sıkılık, karışım yüzdesi ve başlangıç düşey gerilmesine bağlı olarak sıvılaşma direnci değerlendirilmiştir. Sonuçlar, belirli karışım oranlarının en yüksek sıvılaşma direncine sahip olduğunu göstermiştir [21].

2019 yılında Sönmezer kumların sıvılaşma davranışını farklı dane çaplarına ve silt içeriklerine göre incelemiştir. Silt içeriği arttıkça sıvılaşma direnci azalmış, ancak rölatif sıkılığın artışı sıvılaşma enerjisini arttırdığı belirlenmiştir. Kum türüne bağlı olarak ince dane içeriğinin etkisi değişiklik göstermiştir [22].

2020 yılında Rui vd. tane şeklinin kireçli kumların sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Köşeli ve düzensiz tanelerin sıvılaşmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiği ve boşluk suyu basıncı oluşumunu geciktirdiği belirlenmiştir [23].

2021 yılında Zhu vd. yükleme frekansının kum zeminlerin sıvılaşma davranışına etkisini

incelemişlerdir. Gerilme kontrollü deneylerde, yükleme frekansı arttıkça sıvılaşma dayanımının arttığı belirlenmiştir [24].

2022 yılında Marzuni vd. dinamik gerilme oranı ve ince dane içeriğinin sıvılaşma potansiyeline etkisini araştırmışlardır. %30 ince dane içeriğine kadar sıvılaşma direncinin azaldığı, ancak bu seviyeden sonra direncin tekrar arttığı belirlenmiştir. Drenaj kapasitesinin azalması sıvılaşma eğilimini artırırken, yüksek silt içeriği zeminin sıvılaşma potansiyelini düşürdüğü sonucuna varılmıştır [25].

2024 yılında Chaneva vd. pomza ve ince dane içeriğinin sıvılaşma ve tane kırılması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüksek pomza içeriği tane kırılmasını artırırken, ince dane içeriği arttıkça kırılma azaldığı tespit edilmiştir. Pomza içeriğinin boşluk suyu basıncını artırdığı ve sıvılaşmayı erken başlattığı belirlenmiştir [26].

2024 yılında Gardiner vd. pomza içeriğinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Pomza oranı arttıkça sıvılaşma direncinin azaldığı belirlenmiştir. %40'tan %80 pomza içeriğine kadar dirençte belirgin bir düşüş gözlemlenmiş, yüksek pomza içeriğinde aşırı boşluk suyu basıncının daha hızlı arttığı elde edilmiştir [27].

3. Materyal ve Metot

3.1. Materyal

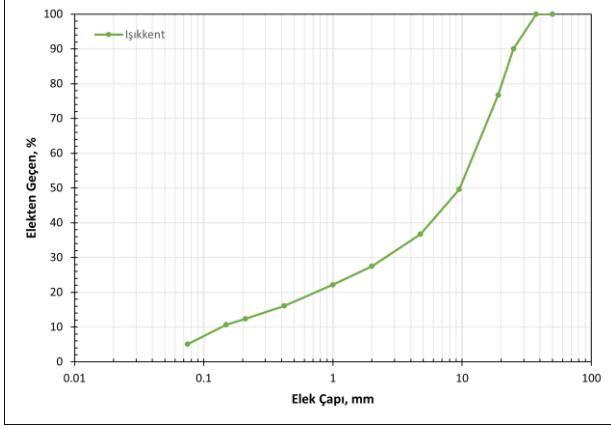
Bu çalışmada kullanılan zemin numuneleri; Isparta İli, Merkez İlçesi, Işıkkent Mahallesi'nden örselenmiş olarak alınmıştır. Araziden alınan zemin numunelerinin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM C117-23 ve C136/136M-19' göre elek analizi, D4318-17e1' göre plastik limit, D854-23'e göre piknometre, C127-24'e göre su emme ve D4253-16e1'e göre maksimum/minimum boşluk oranı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen zemin indeks özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [28-33]. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Işıkkent numunesine ait zemin indeks özellikleri

Zemin indeks özellikleri	Işıkkent
D_{60}	12.27
D_{30}	2.55
D_{10}	0.13
C_u	94.38
C_c	4.08
İnce Dane (%)	5.04
ω_L	32
ω_P	NP
Zemin sınıfı	GP
γ_s (g/cm ³)	2.44

$e_{\max}$	0.98
$e_{\min}$	0.71

Burada; D_{60} , D_{30} , D_{10} , sırasıyla zeminin %60, %30 ve %10'unun geçebildiği elek açıklığına karşılık gelen tane çapı; C_u , üniformluk katsayısı; C_c , eğrilik katsayısı; ω_L , likit limit; ω_p , plastik limit; γ_s , dane birim hacim ağırlık; $e_{\max}$, maksimum boşluk oranı; $e_{\min}$, minimum boşluk oranıdır.



Şekil 1. Araziden alınan numuneye ait granülometri eğrisi

3.2. DSS-C deney sistemi

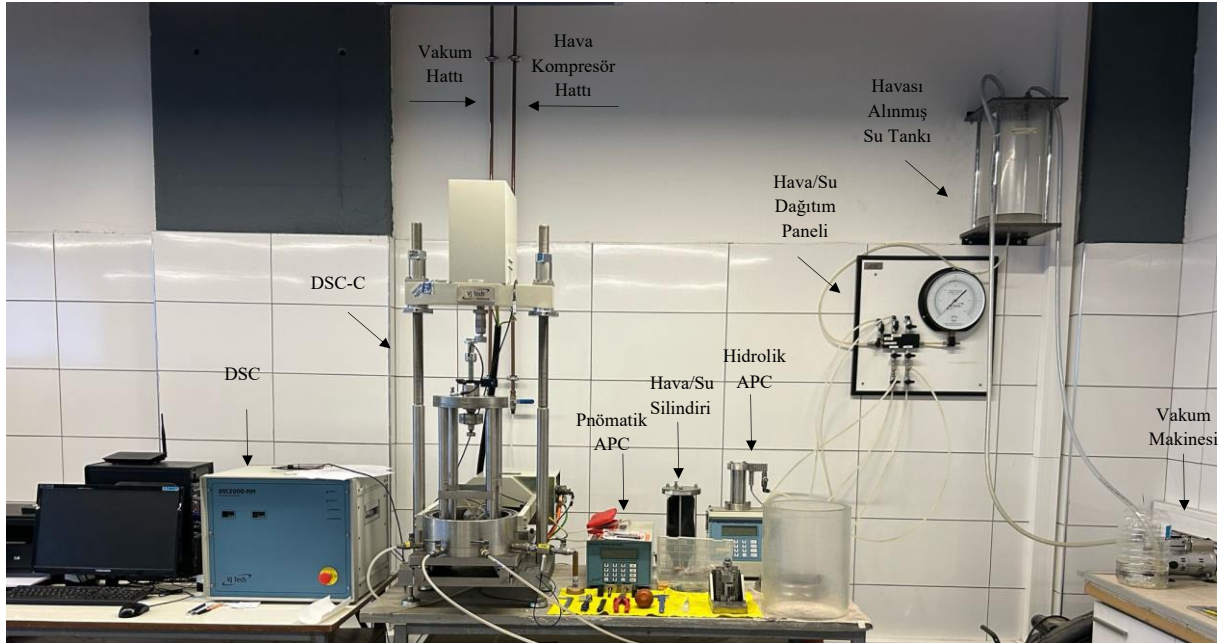
Bu çalışmada pomza içeren zeminin drenajlı ve drenajsız dinamik davranışı, İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Dinamiği Laboratuvarı'nda bulunan VJ Tech DSS-C cihazında incelenmiştir. Deney sistemi, DSS-C cihazı, DSC ünitesi (Dynamic Servo Controller), pnömatrik otomatik basınç kontrolörü (APC), hidrolik otomatik basınç kontrolörü (APCH),

hava kompresörü, hava-su silindiri, vakum makinesi ve su tankından oluşmaktadır (Şekil 2). Deney aleti zeminlerin doymuş veya kısmi doymuş olarak drenajlı ve drenajsız biçimde test edilmesine olanak sağlamaktadır. Deney sistemi, Clisp Studio yazılımı kullanılarak kontrol edilmektedir. Deney prosedürü doyurma, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Doyurma aşamasında numunelerin doymuşluğu Skempton (1954) tarafından önerilen B parametresi ile kontrol edilmektedir [34]. B değeri ≥ 0.95 ise numuneler doymuş kabul edilmektedir. Doyurma aşamasında ilk olarak numunelere 50 kPa hücre basıncı uygulanmakta ve başlangıç doymuşluğu Denklem 1 ile kontrol edilmektedir.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (1)$$

Burada; Δu , boşluk suyu basıncındaki değişimi; $\Delta \sigma_3$, hücre basıncındaki değişimi temsil etmektedir.

Doymuş olmayan numunelere artan hücre basıncı ve ters basınç uygulanarak su girişi yapılarak numune doymuş hale getirilmeye çalışılmaktadır. Konsolidasyon aşamasında numuneler; izotropik, anizotropik ve K_0 koşullarda konsolide edilebilmektedir. Tekrarlı yükleme aşamasında, numuneler gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olarak test edilebilmektedir. Bu aşamada numunelere istenilen dinamik gerilme oranında (DGO) ve yükleme frekansında drenajlı veya drenajsız koşullarda tekrarlı yüklemeler uygulanmaktadır.



Şekil 2. Hücre basınçlı dinamik basit kesme deney düzeneği (DSS-C)

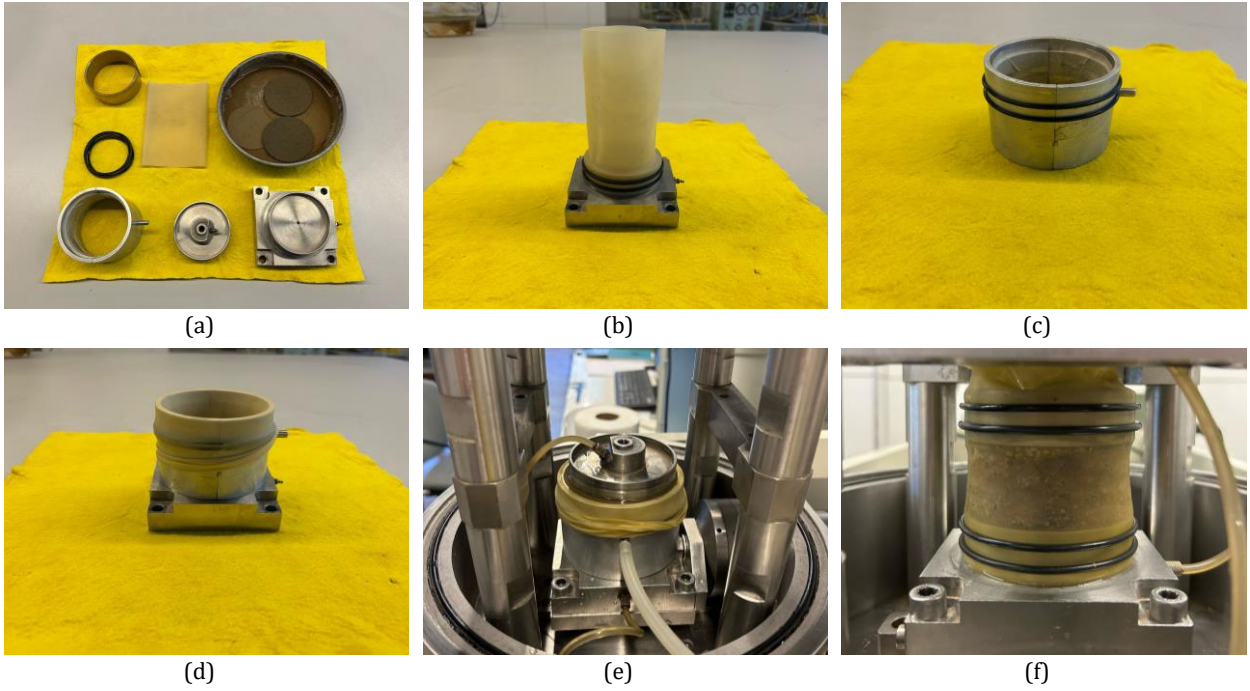
3.3. Numune hazırlanması

Dinamik basit kesme deneyi için numune hazırlanırken öncelikle numuneler No 4 eleğinden elenerek 4.75mm çapından küçük daneler kullanılmıştır. Ardından Tablo 1'de verilen

e_{max} , e_{min} ve γ_s değerleri kullanılarak, hedeflenen %30 rölatif sıklık değeri için gerekli numune miktarı ve su miktarı hesaplanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan numuneler, gerilme kontrollü olarak tam doygun halde test edilmiştir. DSS-C cihazında numune hazırlamak için öncelikle doygun halde bulunan poroz taşlar ve filtre kağıtları numune alt ve üst başlığı içerisine yerleştirilmiştir. Daha sonra lateks membran alt başlık üzerine yerleştirilmiş ve 2 adet O-ring ile sabitlenmiştir. 2 parçadan oluşan 35 mm yüksekliğinde ve 70 mm çapındaki mıkmatıslı kalıp, O-ringler ile alt başlık üzerine yerleştirilmiştir. Membranın fazlalık kısmı numune kalıbı üzerine gergin şekilde kıvrılmıştır. Hazırlanan kalıp, DSS-C'nin numune hazırlama bölümüne yerleştirilmiştir. Membranın daha gergin hale getirilmesi için vakum uygulanmıştır. Doğru ölçüm alınabilmesi için boşluk suyu basınç ölçer içerisindeki hava çıkarılmış ve kalıp ile bağlantıyı sağlayan hortum takılmıştır. Hazırlanan kalıp içerisine önceden ağırlığı belirlenmiş olan havası

alınmış su dökülmüştür. Ardından ağırlığı belirlenmiş olan kuru numuneler kalıp içerisine dökülerek sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numunenin yüksekliği 5 ayrı noktasından ölçülmüştür. Ters basıncın sağlandığı hatta bağlı olan hortum üst başlığa takılmış ve üst başlık dikkatli şekilde numune üzerine yerleştirilmiştir. Üst platform, DSS-C cihazına yerleştirilmiş ve vidalanarak sabitlenmiştir. Üst platformun üst başlık ile bağlantısı yapıldıktan sonra kalıp üzerine kıvrılmış olan membran ve O-ringler üst başlık üzerine geçirilmiştir. Daha sonra mıkmatıslı kalıp çıkarılmış ve numunenin 3 ayrı noktasından çap ölçümü kumpas yardımıyla yapılmıştır. Yükseklik ve çap ölçümü yapılan numunenin rölatif sıklığı hesaplanmıştır. DSS-C hücresi deney aletine yerleştirilerek üst kapak yerine monte edilmiştir. Hücre içerisi havası alınmış su ile doldurulmuştur. Son olarak düşey ve yatay gerilmeleri uygulayacak olan kolların DSS-C'ye bağlantısı yapılmıştır. Şekil 3'te genel numune hazırlama aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Numune hazırlama bileşenleri; (b) O-ringler ile alt tabana sabitlenmiş membran; (c) O-ringler ve mıkmatıslı kalıp; (d) kalıp üzerine kıvrılmış membran; (e) kalıp üzerine yerleştirilen üst başlık; (f) membran içerisindeki numune

3.4. Doygun pomza numunelerinde drenajlı ve drenajsız dinamik basit kesme deneyleri

Bölüm 3.2'de anlatılan yöntemle doygun hale getirilen pomza numunelerinin drenajlı ve drenajsız durumdaki dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla 6 adet dinamik basit kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler, ıslak yağmurlama yöntemiyle, çoğunlukla %30-40 rölatif sıklılarda hazırlanmıştır. Numuneleri doygun hale getirmek amacıyla, doyurma aşamasında numunelere artan ters basınç uygulanmıştır. Her ters basınç uygulanması sonunda deney aletine bağlı olan ters basınç vanası kapatılarak numuneye 50 kPa hücre basıncı

uygulanmış ve B kontrolü yapılmıştır. Numuneler doygun hale geldikten sonra 100 kPa düşey efektif gerilme altında izotropik olarak konsolide edilmişlerdir. Konsolidasyon sonrasında numunenin rölatif sıklığı tekrar hesaplanmıştır. Numunelerin son rölatif sıklıkları çoğunlukla %45-%55 olarak bulunmuş ve orta sıkı olarak tanımlanmışlardır.

Son olarak, gerilme kontrollü dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler 1 Hz frekansta ve farklı dinamik gerilme oranlarında (0.2, 0.25, 0.3) sinüzoidal yüklemelere tabi tutulmuştur. Drenajsız deneyler, aşırı boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 1$ değerine ulaştığında sonlandırılmıştır. Drenajsız

deneylerde oluşan aşırı boşluk suyu basıncı ve birim kayma deformasyonu; drenajlı deneylerde hacimsel deformasyon ve birim kayma deformasyonu belirlenmiştir.

4. Bulgular

4.1. Doygun pomza numuneleri üzerinde yapılan gerilme kontrollü drenajsız dinamik basit kesme deneyleri

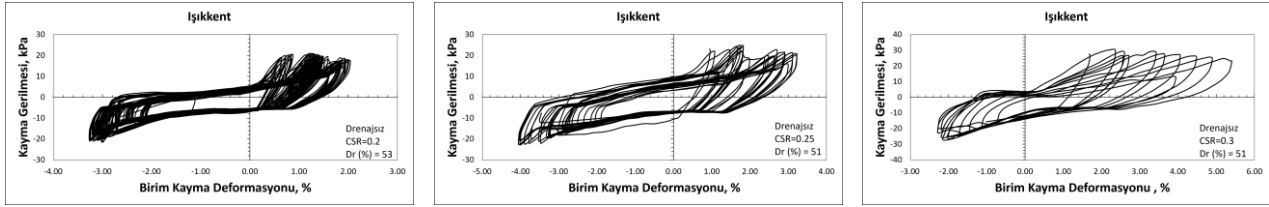
İnceleme alanından örselenmiş olarak alınan zemin numunelerinin, dinamik basit kesme deney aletinde ilk olarak drenajsız davranışları incelenmiştir. 3 farklı dinamik gerilme oranında drenajsız deney yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tekrarlı yüklemeler, numuneler sıvılaşıp dek uygulanmıştır. Uygulanan tekrarlı yüklemeler sonucunda numunelere ait histerezis eğrileri çizilmiştir. Farklı dinamik gerilme oranlarındaki histerezis eğrileri Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 2. Drenajsız dinamik basit kesme deney sonuçları

Test No	DGO	S (%)	D _r (%)	σ'_v (kPa)	$r_{u\max}$	γ (%) @ N=5	γ (%) @ N=10
I-1	0.2	100	53	100	1.02	1.70	1.90
I-2	0.25	100	51	100	1.12	2.28	2.98
I-3	0.3	100	51	100	1.15	2.60	2.87

Burada; S, doyumluk oranı; D_r, rölatif sıkılık; σ'_v , düşey efektif gerilme; γ (%) @ N=5, 5. çevrimdeki birim kayma deformasyonu; γ (%) @ N=10, 10. çevrimdeki birim kayma deformasyonudur.



(a)

(b)

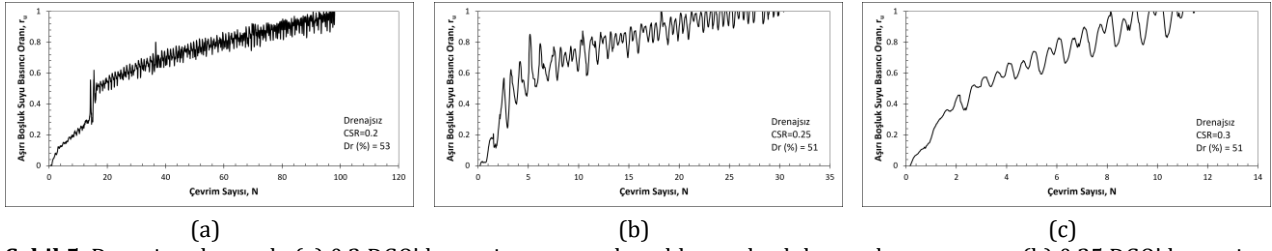
(c)

Şekil 4. Drenajsız Işıkkent deney numuneleri; (a) 0.2 DGO histerezis eğrileri; (b) 0.25 DGO histerezis eğrileri; (c) 0.3 DGO histerezis eğrileri

Drenajsız deney sonuçları incelendiğinde, DGO=0.2 seviyesinde elde edilen eğriler, ± 1.0 - 1.5% birim deformasyon aralığında sınırlı kalmıştır. Bu durum, zemin örneğinin düşük dinamik gerilme seviyelerinde yapısal bütünlüğünü ve rijitliğini koruduğunu, dolayısıyla önemli bir dayanım kaybı ya da büyük deformasyon göstermediğini ortaya koymuştur. DGO=0.25 seviyesinde ise histerezis eğrileri belirgin şekilde büyümüş, deformasyon aralığı artarak ± 2.0 - 2.5% seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, zeminde kalıcı deformasyonların oluştuğunu ve dinamik yükleme altında plastisite davranışının başladığını göstermektedir. DGO=0.3 seviyesi için elde edilen eğrilerde, zeminin dinamik yüklemeye karşı gösterdiği dayanımın önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Histerezis eğrileri çok daha geniş hale gelmiş ve kayma deformasyonları ± 3.0 - 3.5% seviyesini aşmıştır. Dinamik gerilme oranının artmasıyla birlikte numunelere ait histerezis eğrilerinin, büyümesi ve yatık hale gelmesi, numunelerin daha fazla birim kayma deformasyonuna maruz kaldığı açıkça belirlenmiştir. Ayrıca, drenajsız

deneyler numuneler sıvılaştığında sonlandırıldığından, düşük dinamik gerilme oranlarında çevrim sayısının daha fazla olması histerezis eğrilerinin sayısının da artmasına neden olmuştur. Birim kayma deformasyonu-kayma gerilmesi grafikleri de bu durumu açıkça ortaya koymaktadır.

Dinamik gerilme oranının aşırı boşluk suyu basıncı oranı üzerindeki etkisi Şekil 5’te gösterilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncı, çevrim sayısı cinsinden kaydedilmiştir.

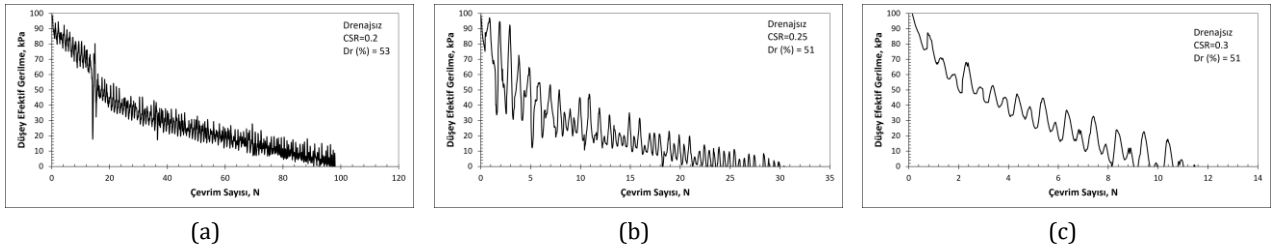


Şekil 5. Drenajsız durumda (a) 0.2 DGO'da çevrim sayısına karşılık aşırı boşluk suyu basıncı oranı; (b) 0.25 DGO'da çevrim sayısına karşılık aşırı boşluk suyu basıncı oranı; (c) 0.3 DGO'da çevrim sayısına karşılık aşırı boşluk suyu basıncı oranı

Çevrim sayısı-aşırı boşluk suyu basıncı grafikleri incelendiğinde, 0.2 dinamik gerilme oranı altında gerçekleştirilen deneyde, r_u değerinin çevrim sayısı ile birlikte düzenli ve kontrollü bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 90 çevrim sonunda $r_u = 1.0$ seviyelerine ulaşılmıştır. Bu durum, DGO=0.2 seviyesinde, zemin yapısının dinamik yüklemeye karşı dirençli olduğunu göstermektedir. Eğrideki düşük eğim, boşluk suyu basıncı birikiminin yavaş gerçekleştiğini ve zemin dayanımının büyük ölçüde korunduğunu ortaya koymaktadır. DGO=0.25 seviyesinde ise r_u değeri daha kısa sürede artış göstererek yaklaşık 22 çevrimde 1.0 seviyesine

ulaşmıştır. 0.3 dinamik gerilme oranında, r_u değeri yalnızca 9 çevrim içerisinde 1.0 seviyesine ulaşarak en hızlı artışı göstermiştir. Eğrinin eğimi oldukça dik olup, zeminde çok kısa sürede aşırı boşluk suyu oluştuğu ve sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum, zeminin yüksek çevrimsel yüklemelere karşı dayanımının yetersiz olduğunu ve sıvılaşma açısından kritik bir davranış sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Numunelerin, çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

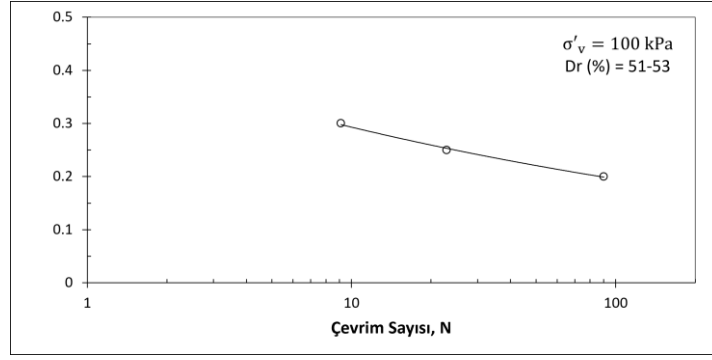


Şekil 6. Drenajsız durumda (a) 0.2 DGO'da çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme; (b) 0.25 DGO'da çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme; (c) 0.3 DGO'da çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme

Çevrim sayısı-düşey efektif gerilme grafikleri incelendiğinde, numuneler başlangıçta 100 kPa efektif gerilmeye sahipken DGO değerinin 0.20 olduğu durumda, düşey efektif gerilmede çevrim sayısına bağlı olarak kademeli bir azalma gözlemlenmiştir. Yaklaşık 90 çevrim boyunca efektif gerilme sürekli olarak azalmıştır. Bu durum, düşük dinamik gerilme altında zemin yapısının daha uzun süre stabil kaldığını, boşluk suyu basıncının artış hızının görece olarak düşük olduğunu ve zemin yapısının taşıma kapasitesinin aşamalı olarak azaldığını göstermiştir. DGO'nun 0.25'e yükseltilmesiyle birlikte, düşey efektif gerilmede daha hızlı ve belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Efektif gerilme yalnızca 22 çevrim içerisinde sıfıra ulaşarak zemin yapısının taşıma gücünü tamamen kaybettiğini göstermiştir. Bu durum, boşluk suyu basıncının daha kısa sürede kritik seviyelere ulaştığını ve sıvılaşma koşullarının hızla

gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. En yüksek çevrimsel gerilme oranı olan DGO=0.30 durumunda, düşey efektif gerilme yalnızca 9 çevrim sonunda sıfıra ulaşmıştır. Bu durum, zemin numunesinin çok kısa sürede boşluk suyu basıncındaki artış nedeniyle tamamen taşıma kapasitesini kaybettiğini ve sıvılaşmanın hızlı bir şekilde meydana geldiğini göstermektedir. Eğrinin daha dik bir eğime sahip olması, boşluk suyu basıncındaki hızlı artışa bağlı olarak efektif gerilmenin çok daha kısa sürede sıfırlandığını göstermektedir. Bu davranış, zemin numunesinin yüksek sismik gerilmelere karşı düşük çevrimsel dayanım sergilediğini ortaya koymaktadır.

Yapılan drenajsız deneylerde aşırı boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 1$ değerine ulaşması için gereken çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. farklı DGO değerlerine karşılık Işıkkent numunesinin sıvılaşması için gereken çevrim sayısı

4.2. Doygun pomza numuneleri üzerinde yapılan gerilme kontrollü drenajlı dinamik basit kesme deneyleri

Drenajlı deneylerin doyurma ve konsolidasyon aşamaları drenajsız deneyler ile aynı şekilde

gerçekleştirilirken tekrarlı yüklemeler öncesinde deney aletine bağlı ters basınç vanası açılarak drenaja izin verilmiştir. Drenajlı deneyler de drenajsız deneylerde olduğu gibi 3 farklı dinamik gerilme oranında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

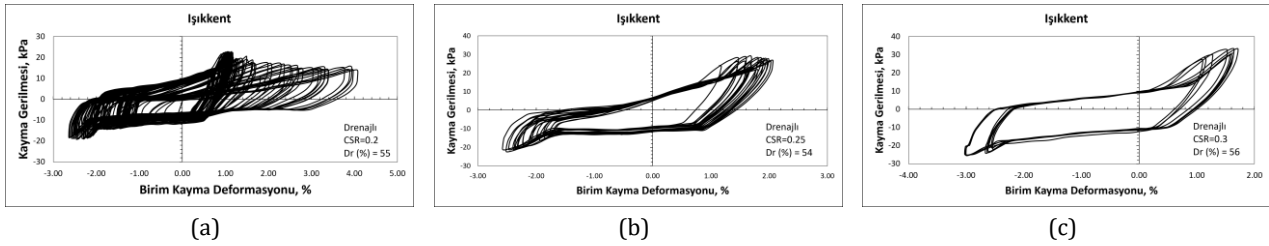
Tablo 3. Drenajlı dinamik basit kesme deney sonuçları

Test No	DGO	S (%)	Dr (%)	σ'_v (kPa)	ε_{vmax} (%)	γ (%) @ N=5	γ (%) @ N=10
I-1	0.2	100	55	100	0.86	1.03	1.20
I-2	0.25	100	54	100	1.46	2.01	1.92
I-3	0.3	100	56	100	2.24	2.12	2.21

Burada; ε_{vmax} , maksimum hacimsel deformasyonu temsil etmektedir.

Drenajlı deneylerdeki çevrim sayısı, drenajsız deneylerde numunelerin sıvılaştığı çevrim sayısına eşit olarak uygulanmıştır. Uygulanan tekrarlı yüklemeler sonucunda numunelere ait histerezis

eğrileri çizilmiştir. Drenajlı deneyler sonucunda numunelerin 3 farklı dinamik gerilme oranındaki histerezis eğrileri Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Drenajlı Işıkkent deney numuneleri; (a) 0.2 DGO histerezis eğrileri; (b) 0.25 DGO histerezis eğrileri; (c) 0.3 DGO histerezis eğrileri

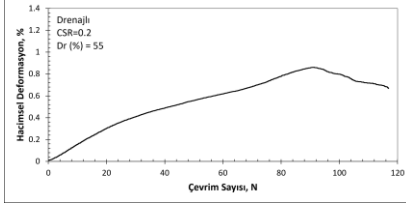
Drenajlı deneylerin sonuçlarını drenajsız deneyler ile karşılaştırmak amacıyla numunelere uygulanan çevrim sayısı, drenajsız deneylerde sıvılaşmanın gerçekleştiği çevrim sayısı ile aynı tutulmuştur.

Drenajlı deney sonuçları incelendiğinde, DGO=0.2 yükleme seviyesinde kayma deformasyonu yaklaşık $\pm 0.5-1.0\%$ aralığında sınırlı kalmıştır. Çevrimler boyunca deformasyonların yavaş ve kontrollü bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Drenajlı koşulların etkisiyle boşluk suyu basıncı oluşmadığı için kayma gerilmesi değerleri kararlılığını korumuş, zemin numunesinde belirgin bir hasar ya da ani rijitlik kaybı meydana gelmemiştir. Bu durum, zemin iskeletinin

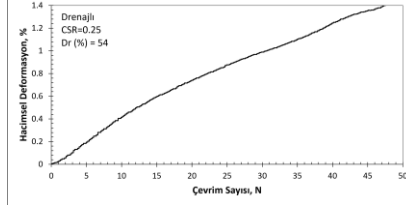
yükleme boyunca yapısal stabilitesini koruduğunu göstermektedir. DGO oranının 0.25'e yükseltilmesiyle birlikte kayma deformasyonlarının aralığı $\pm 1.0-1.5\%$ seviyelerine ulaşmıştır. Çevrim sayısı arttıkça histerezis eğrilerinde belirgin genişleme gözlemlenmiştir. Bu, zemin içinde plastik deformasyonların başladığını göstermektedir. Drenaj koşulları sayesinde sıvılaşmaya neden olabilecek boşluk suyu basıncı oluşumu önlenmiş olsa da yapı içi sürtünme kayıpları ve yeniden düzenlenmeler deformasyon davranışına yansımıştır. Zemin, bu yükleme düzeyinde artık daha fazla kalıcı deformasyon üretmekte ve elastik sınırlardan uzaklaşmaktadır. En yüksek dinamik gerilme oranı

olan $DGO=0.30$ değerinde, kayma deformasyonları artarak $\pm 1.5-2.0\%$ seviyelerine ulaşmıştır. Histerezis eğrilerinin yapısı belirgin şekilde genişlemiş ve zemin plastikleşmiştir. Bu durum çevrimsel yüklemeye birlikte zemin yapısının ilerleyici deformasyonlar ürettiğini ortaya koymaktadır. Artan çevrim sayısı ile birlikte deformasyon maksimum düzeyine ulaşmıştır.

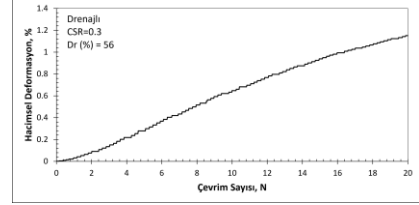
Drenajlı deneylerde dinamik gerilme oranının numunelerde oluşan hacimsel deformasyon üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı dinamik gerilme oranlarındaki çevrim sayısına karşılık hacimsel deformasyon grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



(a)



(b)

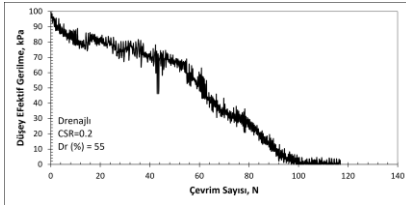


(c)

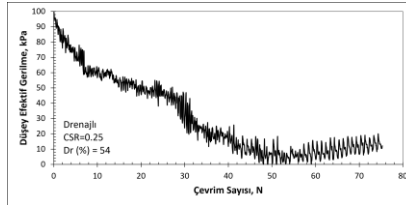
Şekil 9. Drenajlı durumda (a) 0.2 DGO'da çevrim sayısına karşılık hacimsel deformasyon; (b) 0.25 DGO'da çevrim sayısına karşılık hacimsel deformasyon; (c) 0.3 DGO'da çevrim sayısına karşılık hacimsel deformasyon

Drenajlı deneylerde, numunelerde hacimsel deformasyon meydana geldiği belirlenmiştir. Çevrim sayısı-hacimsel deformasyon grafikleri incelendiğinde dinamik gerilme oranı ve çevrim sayısı arttıkça numunelerde oluşan hacimsel deformasyonlar da artmaktadır. En fazla hacimsel deformasyon 0.2 DGO değerinde

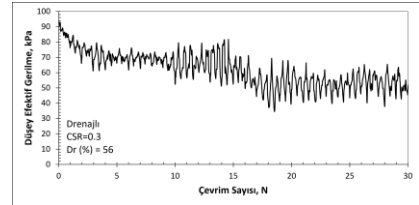
Drenajlı deneyler boyunca çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme grafikleri çizilmiş ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. Drenajlı durumda (a) 0.2 DGO'da çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme; (b) 0.25 DGO'da çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme; (c) 0.3 DGO'da çevrim sayısına karşılık düşey efektif gerilme

Çevrim sayısı-düşey efektif gerilme grafikleri incelendiğinde çevrim sayısı arttıkça numunelerin efektif gerilmelerinin de azaldığı açıkla görülmektedir. Ayrıca aynı çevrim sayısında, 0.3 dinamik gerilme oranındaki düşey efektif gerilme en düşük, 0.2 dinamik gerilme oranındaki düşey efektif gerilme en büyük değeri almıştır. Bu durum drenajsız deneylerin bulguları ile uyum göstermektedir.

4.3. Drenajsız ve drenajlı dinamik basit kesme deney sonuçlarının kayma modülü açısından karşılaştırılması

Drenajsız ve drenajlı dinamik basit kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırması için öncelikle numunelere ait sekant kayma modülü G_{sec} Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$G_{sec} = \frac{\tau_{cyc}}{\gamma_{cyc}} \quad (2)$$

Burada; τ_{cyc} , tekrarlı kayma gerilmesi, γ_{cyc} , tekrarlı birim kayma şekil değiştirmesidir.

Işıkkent numunesinin alındığı bölgeye ait yapılan arazi çalışmalarında, pomza zemininin bulunduğu derinlikteki kayma dalgası hızı (V_s), yüzey dalgası analizi (MASW) ile belirlenmiştir. Elde edilen V_s , Kanai (1966), Shibata (1970), Ohta ve Goto (1978), Imai ve Tonouchi (1982), Seed vd. (1983), Sykora ve Stokoe (1983), Seed vd. (1986), Yoshida vd. (1988), Lee (1992), Dickenson (1994), Pitilakis vd. (1999), Piratheepan (2002), Hasncebi ve Ulusay (2007) tarafından önerilen bağıntılar kullanılarak V_s hesaplanmıştır [35]. Elde edilen V_s değerleri arasında, MASW analizinden elde edilene en yakın değer, Sykora ve Stokoe (1983) tarafından önerilen bağıntıyla hesaplanmıştır. İlgili V_s değeri Denklem 3 ile belirlenmiştir.

$$V_s = 100.6 N_{60}^{0.29} \quad (3)$$

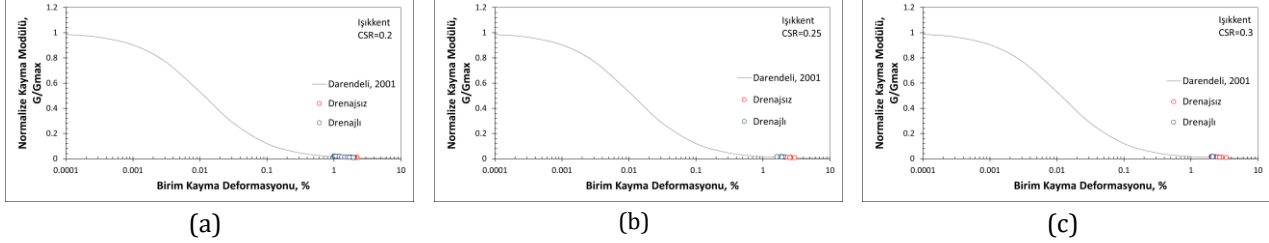
Burada; N_{60} , teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısıdır.

Zemin numunelerine ait V_s değeri hesaplandıktan sonra Denklem 4 kullanılarak zemine ait maksimum kayma modülü (G_{max}) tahmin edilmiştir.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (4)$$

Burada; ρ , yoğunluk, V_s , kayma dalgası hızıdır. Drenajsız ve drenajlı durum için elde edilen G_{sec} ve G_{max} kullanılarak normalize kayma modülü

(G_{sec}/G_{max}) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan G_{sec}/G_{max} değerlerine karşılık logaritmik birim kayma deformasyonu grafikleri çizilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amacıyla Darendeli (2001) tarafından temiz kumlar için önerilen logaritmik birim kayma deformasyonu-normalize kayma modülü eğrisi de eklenmiş ve Şekil 11'de gösterilmiştir [36].

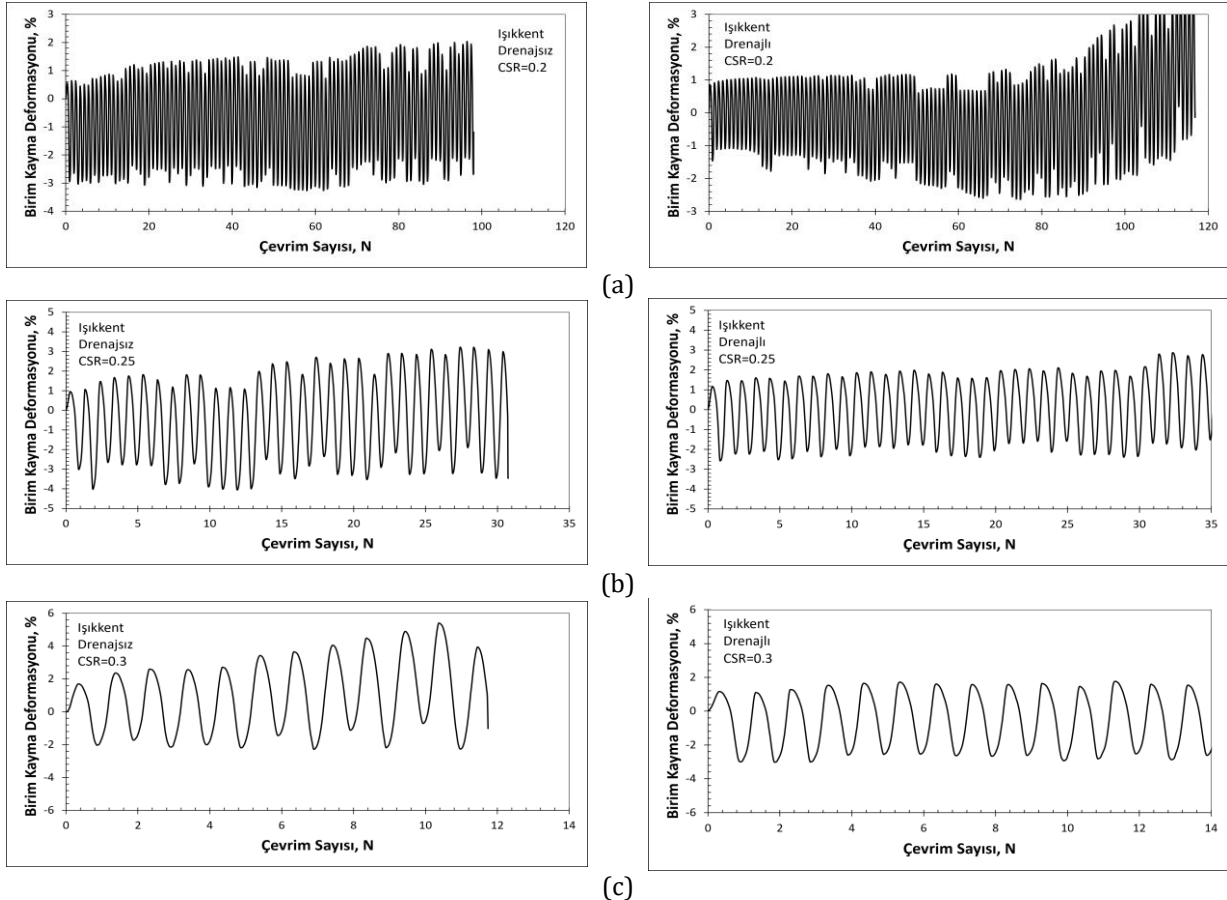


Şekil 11. (a) 0.2 DGO değerinde kayma modülü eğrileri; (b) 0.25 DGO değerinde kayma modülü eğrileri; (c) 0.3 DGO değerinde kayma modülü eğrileri

Drenajsız ve drenajlı deneylere ait birim kayma deformasyonu-normalize kayma modülü grafikleri incelendiğinde, deney numunelerine ait G_{sec}/G_{max} değerinin oldukça küçük değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu durum, deneylerde uygulanan DGO değerlerinin yüksek olması ve deney aletinin küçük deformasyonları uygulayamayışından kaynaklanmaktadır.

4.4. Drenajsız ve drenajlı dinamik basit kesme deney sonuçlarının birim kayma deformasyonu açısından karşılaştırılması

Yapılan drenajsız ve drenajlı deneyler sonucunda, çevrim sayısına bağlı olarak numunelerde oluşan birim kayma deformasyonları belirlenmiş ve çevrim sayısı-birim kayma deformasyonu grafikleri Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. (a) 0.2 DGO'da drenajsız ve drenajlı birim kayma deformasyonu; (b) 0.25 DGO'da drenajsız ve drenajlı birim kayma deformasyonu; (c) 0.3 DGO'da drenajsız ve drenajlı birim kayma deformasyonu

Şekil (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler, farklı DGO değerleri altında (0.2, 0.25 ve 0.3) drenajlı ve drenajsız koşullarda elde edilen birim kayma deformasyonu (%) ile çevrim sayısı (N) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Drenajsız deneylerde, çevrim sayısı ilerledikçe deformasyon genliğinde artış gözlenmiş ve bu durum özellikle CSR=0.3 için belirgin hale gelmiştir. CSR=0.2 durumunda deformasyonlar yaklaşık $\pm 1.0-1.5\%$, CSR=0.25 için $\pm 2.0-2.5\%$, CSR=0.3 için ise $\pm 3.0-3.5\%$ seviyelerine ulaşmıştır.

Drenajlı koşullarda ise benzer DGO değerlerine rağmen deformasyon genlikleri daha sınırlı kalmış, bu durum drenajın boşluk suyu basıncı oluşumunu engellemesi ile açıklanabilir. DGO=0.2 için deformasyonlar $\pm 0.5-1.0\%$, CSR=0.25 için $\pm 1.0-1.5\%$ ve CSR=0.3 için $\pm 1.5-2.0\%$ seviyelerinde kalmıştır. Drenajlı deneylerde çevrim sayısına bağlı olarak deformasyonların kararlı seyrettiği gözlenmektedir.

Genel olarak, artan DGO değerleri deformasyon genliğinde belirgin bir artışa neden olmuş, bu etki drenajsız koşullarda daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, numunelerin rijitlik kaybı ve plastik deformasyon gelişimi açısından değerlendirilmesinde drenaj koşullarının kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu araştırmada, Isparta'nın Işıkkent Mahallesi'nden alınan pomza içeren zeminlerin doymun durumdaki drenajsız ve drenajlı dinamik davranışları DSS-C deney aleti ile incelenmiştir. Deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm numuneler aynı rölatif sıklıkta ıslak yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış ve doymun hale getirildikten sonra 100 kPa efektif gerilme değerinde konsolide edilmiştir. Konsolide olan numuneler, deney kriterine göre drenajsız veya drenajlı olarak 1 Hz frekansta tekrarlı yüklemelere tabi tutulmuştur. Deneyler 0.2, 0.25 ve 0.3 olmak üzere 3 farklı dinamik gerilme oranında gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen dinamik deneyler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Drenajsız ve drenajlı koşullarda gerçekleştirilen dinamik deneylerde, histerezis eğrileri incelendiğinde, dinamik gerilme oranı ve çevrim sayısındaki artışın numunelerde daha büyük kayma deformasyonlarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Drenajlı deneylerde histerezis eğrileri daha simetrik ve küçük kalarak zemin davranışının daha kararlı olduğunu ortaya koymuştur.
2. Drenajsız deneylerde, DGO'nun artmasıyla birlikte dinamik yüklemelere karşı zemin dayanımı belirgin biçimde azalmıştır. DGO=0.2 seviyesinde $r_u = 1.0$ değerine 90 çevrimde ulaşırken, CSR=0.3 için bu sayı yalnızca 9 çevrim

olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, pomza içeren zeminlerin drenajsız koşullarda düşük DGO seviyelerinde dahi çevrimsel yüklemeye karşı sınırlı direnç gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

3. Drenajlı deneylerde dinamik gerilme oranı ve çevrim sayısı arttıkça hacimsel deformasyonun da arttığı görülmüştür.
4. Drenajsız koşullarda yapılan deneylerde, DGO'nun artışıyla birlikte efektif gerilme değerlerinde daha hızlı ve ani düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durum, artan çevrim sayısı ile boşluk suyu basıncındaki hızlı artıştan kaynaklanmaktadır.
5. Drenajlı koşullarda ise çevrim sayısına karşı efektif gerilme kayıpları daha yavaş gerçekleşmiş ve deformasyonlar daha dengeli bir seyir izlemiştir. Bu davranış, drenajın sağlanması ile birlikte boşluk suyu basıncı oluşmaması sayesinde efektif gerilmenin korunmasına bağlanmaktadır. Bu durum özellikle kayma gerilmesi-birim deformasyon eğrilerinde belirginleşmiştir.
6. Drenajsız ve drenajlı deney sonuçlarından elde edilen G_{sec}/G_{max} değerleri, uygulanan yüksek DGO değeri sebebiyle düşük değer almıştır. Daha düşük DGO değerlerinde dinamik deneyler gerçekleştirilerek daha büyük G_{sec}/G_{max} değerleri elde edilebilir.
7. Drenajlı ve drenajsız deneylerde, uygulanan çevrim sayısına bağlı olarak numunelerde oluşan birim kayma deformasyonları belirlenmiştir. Drenajsız deneylerde oluşan birim kayma deformasyonu, aynı çevrim sayısındaki drenajlı duruma kıyasla daha büyük olmuştur.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, literatürde üzerine çok fazla çalışma bulunmayan pomza zeminin dinamik davranışını anlaşılması için değerli bulgular olarak kabul edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Laboratuvarı'nda bulunan VJ Tech DSS-C cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yazarlar, İstanbul Teknik Üniversitesi'ne ve araştırma süresince sağladıkları destekler için Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN ve Doç. Dr. E. Ece BAYAT'a teşekkür eder.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine

Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Korkmaz, H. 2006. Antakya’da Zemin Özellikleri ve Deprem Etkisi Arasındaki İlişki. Coğrafi Bilimler Dergisi, 4(2), 49-66.
- [2] Balyemez, S., Berköz, L., 2010. Hasar Görebilirlik ve Kentsel Deprem Davranışı. İtühergisi/a, 4(1).
- [3] Kuşçu, M., Gedikoğlu, A., 1990. Isparta-Gölcük Yöresi Pomza Yataklarının Jeolojik Konumu. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 14(2), 69-78.
- [4] Wesley, L. D. 2001. Determination of Specific Gravity and Void Ratio of Pumice Materials. Geotech. Test. J., 24 (4), 418-422.
- [5] Pender, M. J., Wesley, L., Larkin, T., Pranjoto, S. 2006. Geotechnical Properties of a Pumice Sand. Soils and Foundations, 46(1), 69-81.
- [6] Kikkawa, N., Pender, M. J., Orense, R. P., StGeorge, J. D., Matsushita, E. 2012. K_0 Compression and Stress Relaxation of Pumice Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(5), 625-628.
- [7] Kikkawa, N., Orense, R. P., Pender, M. J. 2013. Observations on Microstructure of Pumice Particles Using Computed Tomography. Canadian Geotechnical Journal, 50(11), 1109-1117.
- [8] Asadi, M. S., Asadi, M. B., Orense, R. P., Pender, M. J. 2018. Undrained Cyclic Behavior of Reconstituted Natural Pumiceous Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(8), 04018045.
- [9] Marks, S., Larkin, T. J., Pender, M. J. 1998. The Dynamic Properties Of A Pumiceous Sand. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 31(2), 86-102.
- [10] Teachavorasinskun, S., Thongchim, P., Lukunaprasit, P. 2002. Shear Modulus and Damping of Soft Bangkok Clays. Canadian Geotechnical Journal, 39(5), 1201-1208.
- [11] Altun, S., ve Ansal, A. 2003. Tekrarlı Yükler Altında Kumların Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri. İtühergisi, 2(4), 25-34.
- [12] Okada, W., Terzaghi, S., Cooper, J. Q., Patel, M. A., Adhikary, T. P. 2003. Seismic Design of a Highway in Pumiceous Land. In Proceedings of the 7th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Christchurch, New Zealand, 1-10.
- [13] Sitharam, T.G., Govindaraju, L., Sridharan, A., 2004. Dynamic Properties and Liquefaction Potential. Geotechnics and Earthquake Hazards, 87, 1370-1378.
- [14] Elibol, B., Erken, A. 2005. Doygun, Kısmi Doygun ve Kuru Kum Numunelerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Antalya, 1-11.
- [15] Meidani M., Shafiee A., Habibagahi G., Jafari M. K., Mohri Y., Ghahramani A., Chang C. S. 2008. Granule Shape Effect on the Shear Modulus and Damping Ratio of Mixed Gravel and Clay. Iranian Journal of Science and Technology, 32, 501-518.
- [16] Salvati, L., Anhdan, L., 2008. Rate-Dependent Response of Dense Sand in Cyclic Triaxial Tests. Soils Found., 48, 447-451.
- [17] Cai, Y., Dong, Q., Wang, J., Gu, C., Xu, C. 2015. Measurement of Small Strain Shear Modulus of Clean and Natural Sands in Saturated Condition Using Bender Element Test. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 76, 100-110.
- [18] Karakan, E., Altun, S. 2016. Silt Kum Karışımlarının Sıvılaşma Davranışı ve Sıvılaşma Sonrası Hacimsel Deformasyon Özellikleri. Teknik Dergi, 27(4), 7593-7617.
- [19] Monkul, M. M., Yenigün, Ş., Bayat, E. E. 2017. Kuru Kum Numunelerin Sismik Sıvılaşma Potansiyelinin Dinamik Basit Kesme Deneyinden Belirlenmesi. 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım, İstanbul, 697-705.
- [20] Asadi, M. B., Asadi, M. S., Orense, R. P., Pender, M. J. 2018. Shear Wave Velocity-Based Assessment of Liquefaction Resistance of Natural Pumiceous Sands. Géotechnique Letters, 8(4), 262-267.
- [21] Hubler, J.F., Athanasopoulos-Zekkos, A., Zekkos, D. 2018. Monotonic and Cyclic Simple Shear Response of Gravel-Sand Mixtures. Soil Dyn. Earthq. Eng., 115, 291-304.
- [22] Sönmezer, Y. B. 2020. Siltli Kumlarda Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Sıvılaşma Testlerinin Karşılaştırılması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(1), 322-337.
- [23] Rui, S., Guo, Z., Si, T., Li, Y. 2020. Effect of Particle Shape on the Liquefaction Resistance of Calcareous Sands. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 137, 106302.
- [24] Zhu, Z., Zhang, F., Peng, Q., Dupla, J. C., Canou, J., Cumunel, G., Foerster, E. 2021. Effect of the Loading Frequency on the Sand Liquefaction Behaviour in Cyclic Triaxial Tests. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147, 106779.
- [25] Marzuni, S. S., Fadaee, M., Bahmanpour, A., Derakhshandi, M. 2022. Effect of Cyclic Stress Ratio and Non-Plastic Fines Content on the Liquefaction Potential of Sandy and Silty Soil in Cyclic Triaxial Testing. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 58(6), 467-473.

- [26] Chaneva, J., Kluger, M. O., Moon, V., Lowe, D. J., Orense, R. 2024. Influence of Pumice and Fines Contents on the Extent of Particle Crushing in Pumiceous Sand-Silt Mixtures During Undrained Cyclic Triaxial Loading. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 10(27), 1007-1012.
- [27] Gardiner, E., Stringer, M., Rees, S. 2024. Liquefaction Resistance of Soils with Differing Pumice Content. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 10(21), 803-808.
- [28] ASTM C117-23. 2023. Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- [29] ASTM C136/C136M-19. 2020. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate.
- [30] ASTM D4318-17e1. 2018. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- [31] ASTM D854-23. 2023. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method.
- [32] ASTM C127-24. 2024. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- [33] ASTM D4253-16e1. 2019. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.
- [34] Skempton, A. W. 1954. The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Geotechnique*, 4(4), 143-147.
- [35] Wair, B. R., DeJong, J. T., Shantz, T. 2012. Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [36] Darendeli, B. M. 2001. Developpe of a new family of normalize modulus reduction and material damping curves. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin., 362 p.

Sistem Çağrısı Verilerinde Derin Öğrenme Mimarileri Kullanılarak Anomali Tespitinin Değerlendirilmesi: Performans ve Enerji Verimliliği

İbrahim ŞANLIALP^{*1}, Mehmet YILDIZ²

^{1,2} Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

(Alınış / Received: 10.03.2025, Kabul / Accepted: 30.06.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Sistem çağrısı,
Anomali tespiti,
Enerji verimliliği,
Derin öğrenme

Öz: Sistem çağrıları, işletim sistemi ile yazılım arasındaki etkileşimleri temsil eden kritik bir veri kaynağı görevi görmektedir. Bir veri kaynağındaki olağan dışı kalıpların belirlenmesi, sistem performansını iyileştirmek açısından önemli olan anomali tespiti olarak adlandırılmaktadır. Özellikle, derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar sistem çağrılarında anomali tespitinin doğruluğunu artırırken, kullanılan derin öğrenme modellerinin enerji verimliliği göz ardı edilemez bir değerlendirme ölçütü olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, üç derin öğrenme modelinin (Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN), Kapılı Tekrarlayan Birim (GRU) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM)) sistem çağrısı verilerinde anomali tespiti için performansı ve enerji verimliliği karşılaştırılmıştır. Her model, Asgari-Azami Normalleştirme (Min-Max Normalization) ile ölçeklendirilmiş verilerle eğitilmiştir. Model performansı, Determinasyon Katsayısı (R^2), Ortalama Kare Hatası (MSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) değerlendirme metrikleri kullanılarak ölçülmüştür. Enerji tüketimi tahmini ise Intel Power Gadget (IPG) ile gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz, test edilen mimarilerin göreceli etkinliği hakkında ampirik içgörüler sunmaktadır. Bulgular, LSTM'nin anomali tespiti açısından daha iyi bir performans sergilediğini, ancak enerji verimliliği açısından RNN'nin daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Evaluation of Anomaly Detection in System Call Data Using Deep Learning Architectures: Performance and Energy Efficiency

Keywords

System call,
Anomaly detection,
Energy efficiency,
Deep learning

Abstract: System calls serve as a critical data source that represents the interactions between the operating system and software. The identification of unusual patterns within a data source is referred to as anomaly detection, which is essential for improving system performance. Particularly, deep learning-based approaches enhance the accuracy of anomaly detection in system calls, while the energy efficiency of the employed deep learning models emerges as a crucial evaluation criterion that cannot be overlooked. In this study, the performance and energy efficiency of three deep learning models—Recurrent Neural Network (RNN), Gated Recurrent Unit (GRU), and Long Short-Term Memory (LSTM)—were compared for anomaly detection in system call data. Each model was trained using data scaled with Min-Max Normalization. Model performance was measured using the evaluation metrics Coefficient of Determination (R^2), Mean Squared Error (MSE), and Mean Absolute Error (MAE). Energy consumption estimation was conducted using Intel Power Gadget (IPG). This comparative analysis provides empirical insights into the relative effectiveness of the tested architectures. The findings show that LSTM achieves better performance in anomaly detection, while RNN is more advantageous in terms of energy efficiency.

1. Giriş

Modern bilişim sistemlerinde anomali tespiti veri güvenliğinin ve sistem performansının temel yapı

taşlarındandır. Anomaliler, genellikle sistemde beklenen duruma aykırı olan davranışları ifade eder. Bu anomaliler sistem performansını olumsuz etkileyebilir veya sisteme yönelik gerçekleştirilen saldırıları işaret edebilir [1]. Sistem çağrıları (system calls), işletim sistemi ile çalışan uygulamalar arasında gerçekleştirilen temel etkileşimleri temsil eder ve bu nedenle anomali tespiti için önemli bir veri kaynağıdır.

Sistem çağrısı verilerinde anomalileri tespit etmek bu etkileşimlerin sıralı bir yapıya sahip olması sebebiyle zordur. Bu tür sıralı verilerde, her bir adımın öncekilerle olan ilişkisini ve uzun vadeli bağımlılıklarını anlamak oldukça önemlidir. Makine öğrenimindeki hızlı ilerleme ile anomali tespitinin entegrasyonu, sistem güvenliğini ve performans verimliliğini artırmak için son derece etkili çözümler sunmuştur [2]. Yapay sinir ağları, özellikle sıralı veriler için optimize edilmiş olan tekrar eden sinir ağı türleri, bu uzun bağımlılıkları anlamak ve anormallikleri tespit etmek için güçlü modeller sunar [3, 4]. Fakat modellerin enerji tüketiminin tespit edilmesiyle, modellerin performans ve enerji tüketiminin birlikte ele alınması ihtiyacını beraberinde getirmektedir [5, 6]. Çünkü, veri odaklı teknolojilerin ve dijital sistemlerin hızlı büyümesi aynı zamanda karmaşık hesaplama görevlerini minimum çevresel ve finansal etkiyle ele alabilen enerji açısından verimli algoritmalara ihtiyaç vardır.

Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN) ve Kapılı Tekrarlayan Birim (GRU) modelleri, sistem çağrısı veri analizi de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda zaman serisi tahmini ve anomali tespiti için yaygın olarak kullanılan, öne çıkan RNN tabanlı mimarilerdir.

RNN modellerinin anomali tespitinde uygulanması, bu mimarilerin ardışık verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalama konusundaki başarısı nedeniyle etkili bulunmuştur. Örneğin, Nguyen ve arkadaşları [2], LSTM'nin tedarik zinciri yönetim sistemlerindeki anomalileri tespit etme potansiyelini göstererek, geleneksel makine öğrenimi yöntemlerine kıyasla üstün performansını vurgulamıştır. Benzer şekilde, Kaya ve Yıldız [7], LSTM ağlarının İnsansız Hava Aracı (İHA) sistem çağrısı verilerindeki anormallikleri belirlemedeki etkinliğini ortaya koymuş, uzun vadeli bağımlılıkları tespit etme ve sistem güvenliğini iyileştirme konularındaki yetkinliğini göstermiştir.

Başka bir çalışmada ise, RNN ve GRU modelleri karşılaştırılmış ve GRU'nun daha uzun vadeli bağımlılıkları işleme kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir. Ancak, daha kısa eğitim süreleri ve düşük hesaplama maliyetleri nedeniyle belirli uygulamalarda RNN tercih edilmiştir [8]. Bu modeller yüksek doğruluk sağlamalarına rağmen, özellikle LSTM, genellikle yüksek hesaplama gücü ve enerji tüketimi gerektirdiği için eleştirilmektedir. Yeşil

bilişime artan ilgi, enerji açısından verimli algoritmaların önemini ön plana çıkarmaktadır. Örneğin, Rodriguez ve arkadaşları [9], algoritmik performans ve enerji tüketimi arasında bir denge çağrısında bulunarak, işlevselliğinden ödün vermeden karbon ayak izlerini en aza indiren "Yeşil AI" çözümlerinin geliştirilmesini önermiştir.

Enerji tüketimi bağlamında, çeşitli çalışmalar makine öğrenimi modellerinin enerji verimliliğini değerlendirmek ve optimize etmek için çeşitli yaklaşımlar sunmuştur. Örneğin, Fahad ve arkadaşları [10], enerji ölçüm araçlarının doğruluğunu analiz, etmiş ve tahmin modelleri ile donanım düzeyindeki sensörler arasındaki tutarsızlıkları vurgulamıştır. Ayrıca, Intel Power Gadget (IPG) [11] gibi yenilikçi araçların kullanımı, özellikle farklı makine öğrenimi mimarilerinin performansını kıyaslamak için yararlı olan hassas enerji profillemesini mümkün kılmıştır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, derin öğrenme mimarileri kullanılarak sistem çağrısı verilerinde yüksek doğrulukla anomali tespiti yapılabildiğini, ancak bu süreçte model mimarilerinin enerji tüketimi gibi kaynak verimliliği açısından da optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Örneğin, Linux çekirdeği için özel olarak hazırlanmış bir sistem çağrısı veri kümesinde, sistem çağrısı dizileri kullanılarak anomali tespiti gerçekleştirilmiş ve derin öğrenme modellerinin çekirdek seviyesinde uygulanabilirliği analiz edilmiştir. Çalışma, yüksek doğrulukta sonuçlar sunan modellerin gerçek zamanlı sistemlere entegrasyonu için mimari ve kaynak verimliliği optimizasyonuna ihtiyaçlarını vurgulamaktadır [12]. Buna ek olarak, yazılım uygulamalarında enerji tüketimini öngörmek amacıyla performans sayacı olayları ve sistem çağrısı verilerini birleştirerek makine öğrenimi modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen çalışma, enerji tüketimini tahmin etmede sistem çağrılarının önemli bir özellik olarak kullanılabileceğini ve bu verilerin işlenmesinde kullanılan model mimarilerinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesi gerektiği vurgulamıştır [13]. Bu bulgular, sistem çağrısı verilerinin işlendiği derin öğrenme uygulamaları açısından hem enerji verimliliği hem de performans konularının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, sistem çağrısı veri kümelerinde anomali tespitinde LSTM [2], GRU [14] ve RNN [8] mimarilerinin performanslarını karşılaştırmakta ve analiz etmektedir. Çalışma, yalnızca anomali tespitindeki doğruluk oranlarını ele almakla kalmayıp, aynı zamanda artan sürdürülebilirlik ve verimli bilişim odakları göz önünde bulundurularak enerji tüketimine de vurgu yapmaktadır. Çalışma ayrıca sürdürülebilir ve verimli makine öğrenimi uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu araştırmanın üç temel katkısı vardır. İlk olarak, sistem çağrıları üzerinde LSTM, GRU ve RNN mimarilerinin anomali tespit performansları

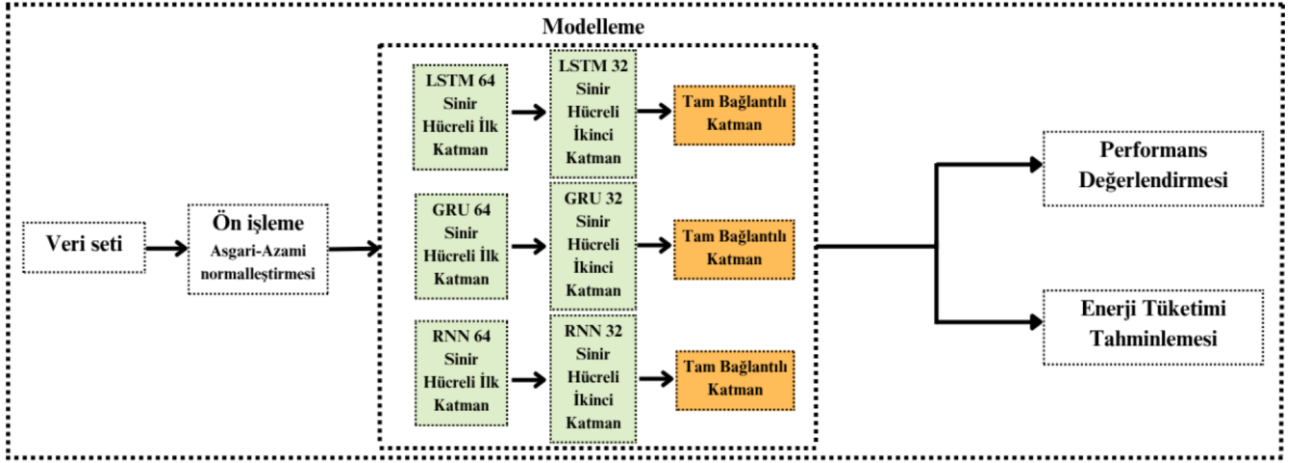
üzerinde kapsamlı bir karşılaştırmayı ele alır. İkinci olarak, her modelin enerji verimliliği değerlendirilerek yürütme süresi ile enerji tüketimi arasındaki korelasyona ilişkin detaylı bilgiler sağlar. Üçüncüsü, çalışmanın sonuçları sürdürülebilir bilişim açısından verimli anomali tespit sistemleri oluşturmak için pratik öneriler sunar.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: 2. bölümde çalışmada kullanılan materyaller ve çalışma için geliştirilen yöntem açıklanmaktadır. 3. bölüm

çalışmanın bulgularını içermektedir. 4. bölümde ise tartışma ve sonuçlar yer almaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu bölüm, deneysel çalışmanın kavramsal çerçevesinin ayrıntılı bir gösterimi, veri seti tanımı, uygulanan RNN tabanlı mimarileri, değerlendirme metrikleri bilgisi, sistem ve araç yapılandırması dahil olmak üzere materyal ve metodu içermektedir. Şekil 1 bu çalışmanın kavramsal çerçevesini göstermektedir.



Şekil 1. Çalışmanın kavramsal çerçevesinin genel görünümü

2.1. Veri seti tanımı

Bu çalışmada, anomali tespiti için sistem çağrıları üzerine odaklanan bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan veri seti [15], bir İHA'nın simüle edilmiş bir platform üzerinde çalıştırılması sırasında kaydedilen sistem çağrısı olaylarını içermektedir. Veri seti, bağlam modelleme sürecine odaklanarak, süreçler ve çekirdek arasındaki karmaşık etkileşimleri modellemek için 434.309 sistem çağrısı olayını içermektedir. Sistem çağrılarının sırası ve türleri ayrıntılı şekilde kaydedildiğinden, bağlam modelleme ve anomali tespiti açısından zengin bir içerik sunmaktadır. Ayrıca veri seti, İHA uygulamasının davranışını, durum makineleri aracılığıyla başlangıç durumundan bitiş durumuna kadar gözlemlemek için uygun bir altyapı sağlamaktadır.

2.2. Veri ön işleme

Model eğitimi öncesi sistem çağrısı verilerine çeşitli ön işleme adımları uygulanmıştır. Sayısal özellikler Asgari-Azami Normalleştirme (Min-Max Normalizasyonu) [18] ile [0,1] aralığına ölçeklendirilerek farklı değişkenlerin model üzerinde baskınlık kurması önlenmiştir. Kategorik sistem çağrısı kimlikleri ise uygun şekilde sayısal temsillere dönüştürülmüştür. Ardından, zaman serisinin ardışık yapısını koruyacak biçimde sabit uzunlukta kayma pencereleri ile giriş-çıkış çiftleri oluşturulmuştur. Bu işlem sayesinde modelin sıralı bağımlılıkları öğrenmesi ve anomali paternlerini tanıyabilmesi

sağlanmıştır. Uygulanan ön işleme adımları, modelin hem öğrenme sürecini hızlandırmış hem de tahmin doğruluğunu artırmıştır.

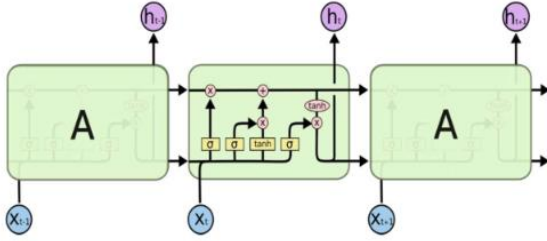
2.3. Modelleme

Bu aşama, sistem çağrısı veri kümeleri üzerinde uygulanan RNN, GRU ve LSTM olmak üzere üç farklı derin öğrenme mimarisiyle geliştirilen anomali tespiti modellerinin açıklanmasını içerir. Her modelin zaman serisi verilerini işlemede kendine özgü avantajları vardır. Modeller, anomalileri tespit etmedeki performansları ve enerji tüketim tahminlemeleri açısından değerlendirilmiştir. Mimarilerin modelleme süreci, hiperparametre ayarı, eğitim ve model değerlendirmesi olmak üzere alt aşamalardan oluşmaktadır. Bu çalışmada, RNN, GRU ve LSTM modellerinin her biri için hiperparametreler aynı şekilde belirlenmiştir. Her bir modeldeki son katman, anomali tahminlerini çıkış olarak üreten tek bir nörona sahip yoğun (dense) veya tam bağlantılı (fully connected) katmandır. Bu katman, önceki katmanlardan gelen tüm bilgileri birleştirerek anomalileri tahmin eder. Giriş dizi uzunluğu (sequence length) 20 olarak seçilmiş; her modelde 64 sinir hücreli(nöron) birinci katman ve 32 sinir hücreli ikinci katman kullanılmıştır. Aşırı öğrenmeyi (overfitting) önlemek amacıyla her katmandan sonra %20 oranında seyreltme (dropout) uygulanmıştır. Optimizasyon sürecinde öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. Eğitim/test oranı %70 ve %30 olarak düzenlenmiş; eğitim işlemi 30 epok boyunca ve 32 örnekten oluşan küme boyutuyla (batch size)

gerçekleştirilmiştir. Kayıp fonksiyonu olarak ortalama kare hata seçilmiş; model performansı doğrulama verisi de kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

2.3.1. Uzun kısa süreli bellek (LSTM)

LSTM, Hochreiter ve Schmidhuber tarafından 1997 yılında, RNN mimarisinin bir uzantısı olarak tanıtılmıştır ve özellikle uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmek amacıyla tasarlanmıştır [16]. LSTM'deki her nöron, önceki gizli durumundan gelen girdiyi yeni bir gizli duruma dönüştürmek yerine, kendi "bellek" durumunu koruyarak bilgi depolayabilir. Bu mimari, geleneksel RNN'lerin kaybolan gradyan (vanishing gradient) problemi nedeniyle uzun süreli bağımlılıkları öğrenememesi sorununa çözüm sunar [17].



Şekil 2. LSTM mimarisi [14]

Şekil 2'de gösterildiği gibi, LSTM mimarisi, sıralı girdileri işleyebilme ve sıralı çıktılar üretebilme yeteneğiyle öne çıkar. Her bir zaman adımında, LSTM hücresine bir giriş vektörü x_t verilir ve bu hücre, içinde bulunan çeşitli kapılar ve fonksiyonlar aracılığıyla bir durum vektörü h_t oluşturur. LSTM'lerde, çıktı vektörü h_t , durum vektöründen farklı bir fonksiyon tarafından üretilir ve bu çıktı, bir sonraki zaman adımında yeni giriş vektörü x_t ile birlikte kullanılır. LSTM'nin çalışma prensibi, dört temel adıma dayanır. İlk olarak, unutmaya kapısı (forget gate), bir önceki zaman adımının durum vektörü h_{t-1} ve mevcut giriş vektörü x_t 'yi birleştirerek hangi bilgilerin unutulacağını belirler [19]. Bu işlem, denklem (1) formülüyle ifade edilir [14]. İkinci adımda, giriş kapısı (input gate), yeni bilgilerin hücre durumuna ne ölçüde ekleneceğini belirler. Bu, denklem (2) ve denklem (3) formülleriyle hesaplanır. Üçüncü adımda, hücre durumu güncelleme (cell state update), unutmaya kapısı ve giriş kapısının çıktılarını kullanarak hücre durumunu günceller: denklem (4). Son olarak, çıkış kapısı (output gate), denklem (5) formülüyle hesaplanır ve mevcut zaman adımının çıktısı denklem (6) şeklinde üretilir. Bu süreçte kullanılan tüm ağırlık matrisleri, modelin eğitim aşamasında optimizasyon yoluyla belirlenir [14, 20].

$$f_t = \sigma_f(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (1)$$

burada f_t unutmaya kapısını temsil ederken, σ_f sigmoid aktivasyon fonksiyonunu, W_f ağırlık matrisini, h_{t-1} bir

önceki zaman adımının gizli durumunu, x_t mevcut zaman adımının girişi ve b bias terimini temsil eder.

$$i_t = \sigma_i(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (2)$$

$$N_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (3)$$

burada i_t giriş kapısını temsil ederken, N_t yeni hücre durumu adayını, W_i ve W_c ağırlık matrislerini, $\tanh$ hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonunu, b bias terimlerini temsil eder.

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot N_t \quad (4)$$

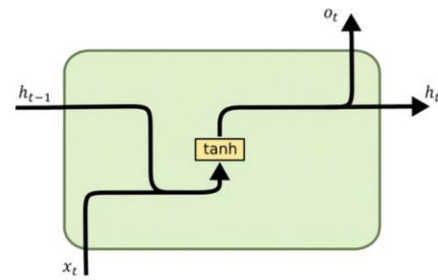
$$o_t = \sigma_o(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (5)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (6)$$

burada o_t çıkış kapısının temsil ederken, h_t mevcut zaman adımının gizli durumunu, W_o ağırlık matrisini, $\tanh$ hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonunu, C_t hücre durumu güncellemesini ve b bias terimini temsil eder.

2.3.2. Tekrarlayan sinir ağı (RNN)

RNN, en temel tekrarlayan sinir ağı mimarisidir ve kısa vadeli bağımlılıkları öğrenme konusunda etkilidir. Bu yapıda, her zaman adımında, bir önceki gizli durum ile mevcut girdinin doğrusal bir kombinasyonu hesaplanır ve bu bilgi sonraki adıma aktarılır. Ancak RNN, uzun dizilerde bilgiyi taşımakta zorlanır; çünkü zamanla gradyanlar kaybolur. Bu mimari, düşük hesaplama maliyetiyle temel görevler için etkili bir çözüm sunar. Bununla birlikte, RNN'nin bu sınırlamaları, karmaşık zaman serisi analizlerinde dezavantaj oluşturabilir [8].



Şekil 3. RNN Mimarisi [19]

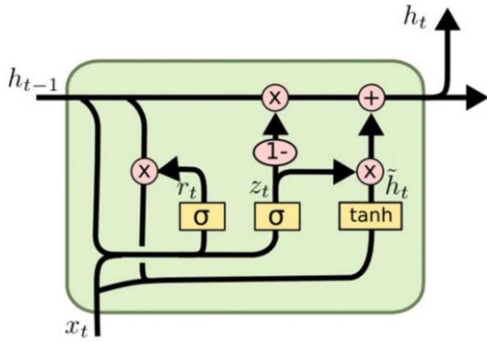
RNN'ler, her bir zaman adımında bir giriş vektörü x_t alır ve bir önceki zaman adımının gizli durum vektörü h_{t-1} ile birleştirerek yeni bir gizli durum vektörü h_t üretir. Bu süreç, aşağıdaki formülle ifade edilir [19]:

$$h_t = \tanh(W_h \cdot h_{t-1} + W_x \cdot x_t + b) \quad (7)$$

burada h_t unutmaya kapısının çıktısını temsil ederken, W_h ağırlık matrisini, h_{t-1} bir önceki zaman adımının gizli durumunu, x_t mevcut zaman adımının girişini ve b_f bias terimini temsil eder.

2.3.3. Kapılı tekrarlayan birim (GRU)

GRU, LSTM mimarisinin daha sade bir versiyonu olarak Cho ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [21]. GRU, LSTM'e benzer şekilde giriş kapısı ve unutmakapısı içerir, ancak bu kapıları birleştirerek daha az parametre ile çalışır. GRU'nun avantajlarından biri, basit yapısı nedeniyle LSTM'e kıyasla daha az hesaplama yüküne sahip olmasıdır. Ayrıca, GRU LSTM ve diğer RNN modellerine kıyasla daha hızlı bir eğitim süreci sunmakta ve belirli uygulamalarda benzer doğruluk oranları sağlamaktadır. Bu özellikleri, kaynak kısıtlamalarının olduğu uygulamalarda GRU'nun tercih edilme nedenlerindendir [22].



Şekil 4. GRU Mimarisi [19]

GRU mimarisi, iki temel kapı (reset gate ve update gate) kullanır ve bu kapılar, bilgi akışını kontrol eder. Her bir zaman adımında, GRU hücresine bir giriş vektörü x_t verilir ve bu hücre, bir önceki zaman adımının gizli durum vektörü h_{t-1} ile birleştirilerek yeni bir gizli durum vektörü h_t oluşturur. Bu işlem, reset kapısı denklem (8) ve update kapısı denklem (9) aracılığıyla kontrol edilir. Yeni gizli durum adayı denklem (10) formülüyle hesaplanır ve gizli durum güncellemesi denklem (11) şeklinde gerçekleştirilir [14].

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (8)$$

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (9)$$

burada r_t reset kapısının çıktısını temsil ederken z_t update kapısının çıktısını, σ sigmoid aktivasyon fonksiyonunu, W_r ve W_z ağırlık matrislerini, h_{t-1} bir önceki zaman adımının gizli durumunu, x_t mevcut zaman adımının girişini, b bias terimini temsil etmektedir.

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_h \cdot [h_{t-1}, x_t] + b) \quad (10)$$

$$h_t = (1 - z_t) \cdot h_{t-1} + z_t \cdot \tilde{h}_t \quad (11)$$

burada $\tilde{h}_t$ yeni gizli durum adayını temsil ederken h_t son gizli durumu temsil eder. W_h ağırlık matrisini, $\tanh$ hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonunu, h_{t-1} bir önceki zaman adımının gizli durumunu, x_t mevcut zaman adımının girişini ve b bias terimini temsil etmektedir.

2.4. Değerlendirme metrikleri

Modellerin performans ve enerji tüketiminin birlikte ele alınması önemlidir. Çünkü kaynak kısıtlamalarının ve sürdürülebilirlik hedeflerinin ön planda olduğu taşınabilir cihazlar ve gömülü sistemlerde kritik bir öneme sahiptir. Deneyler, Windows 10 Pro [23] çalıştıran bir dizüstü bilgisayar kullanılarak çevrimdışı olarak gerçekleştirilmiştir. Enerji tüketim değerleri IPG aracı kullanılarak kaydedilmiştir. Önemli miktarda bilgi işlem kaynağına sahip dizüstü bilgisayar donanımı, 16 GB RAM, 256 GB disk depolama alanı ve dokuzuncu nesil Intel Core i7-9750H işlemciye (2,20 GHz) sahiptir. Toplam enerji tüketim verilerini kapsayan güç profilleri .csv biçiminde kaydedilmiş ve daha sonra tekrarlayan sinir ağı tabanlı modellerin performansını değerlendirmek için çevrimdışı olarak analiz edilmiştir.

2.4.1. Performans değerlendirme

Bu çalışmada modellerin performansı, Determinasyon Katsayısı (R^2 - R Squared), Ortalama Kare Hata (MSE - Mean Squared Error) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE - Mean Absolute Error) metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. R^2 , çıktındaki varyansın ne kadarının girdi kaynaklı varyansla açıklandığını ölçen istatistiksel bir metrik olup, model doğrulamada önemli bir araçtır. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça modelin veriyi daha iyi açıkladığı kabul edilir [24]. MSE, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki hataların karelerinin ortalamasıdır. MSE değeri büyüdükçe modelin tahminlerinde yaptığı hatalar da büyür. MAE ise tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki hataların mutlak değerlerinin ortalamasıdır [25]. MAE değeri yükseldikçe modelin ortalama tahmin hatası da artar [26]. Performansı ölçme formülleri şu şekilde verilir:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (12)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (14)$$

burada $\bar{y}$, bağımlı değişken Y 'nin ortalama değeri; $\hat{y}$, Y 'nin öngörülen değeri; y , Y 'nin gerçek değeri ve N , veri örneklerinin sayısını temsil eder.

2.4.2. Enerji tüketim tahminlenmesi

Intel işlemcileri, Sandy Bridge nesliyle başlayarak, Çalışan Ortalama Güç Sınırı (Running Average Power Limit-RAPL) teknolojisini kullanmaya başlamıştır [27]. RAPL'nin öncelikli amacı güç sınırlaması olsa da enerji sayaçlarını da içermektedir. Ayrıca geniş kullanılabilirliği ve ek araçlara ihtiyaç duyulmaması nedeniyle güç ve enerji tahmini için yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. IPG ise özellikle işlemci güç tüketimini analiz etmek ve işlemcilerin kötü amaçlı yazılım yürütme gibi farklı iş yükleri altında frekanslarını nasıl dinamik olarak ayarladığını anlamak isteyen kullanıcılar için değerli bir araçtır [28]. IPG'nin en önemli avantajlarından biri, enerji tüketimini gerçek zamanlı ve görsel olarak sunabilmesidir. Ayrıca bu araç, kullanıcıların kayıtlı verileri Excel biçiminde dışa aktarmalarına olanak tanır. Özellikle, bu yardımcı program dahili olarak enerji ölçümü için RAPL teknolojisini kullanmakta olup, saniyede 10 örnek frekansında güç tüketimi verilerini yakalayarak yüksek çözünürlüklü günlük kaydı gerçekleştirir [29].

Bu çalışmada, üç farklı RNN tabanlı mimarilerin tüketimi IPG sürüm 3.6 [9] kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu mimarilerin enerji tüketimini tahminlemesi aşağıdaki verilen denklem ile bulunmuştur [30]:

$$E_c = P_c \times t \quad (15)$$

burada E_c üç farklı RNN tabanlı mimarilerin algoritmalarını işlemek için tahmini enerji tüketimini temsil eder, P_c algoritmalar tarafından ihtiyaç duyulan işlem gücünü belirtir ve t bu algoritmaları işlemek için gereken zaman aralığını ifade eder.

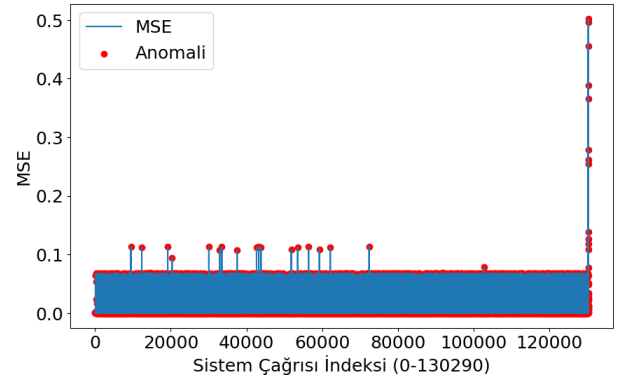
Yürütme süresi, bir algoritma kullanarak bir problemi çözerken bir bilgisayarın hesaplamaları gerçekleştirmesi için gereken süreyi ifade eder. Deneyler sırasında, veri setindeki sistem çağrıları eğitim sürecindeki modellerin algoritmalarının yürütme süreleri ölçülmüştür. Kaydedilen sonuçlarda olası aykırı değerlerin etkisini en aza indirmek için her bir RNN mimarisi 10 kez yinelemeye tabi tutulmuştur. Hesaplamalar için watt cinsinden ölçülen ortalama güç tüketimi kullanılmıştır. Hesaplamalarda Watt (W) cinsinden ölçülen ortalama güç değeri esas alınmıştır. Toplam enerji tüketimi ise ortalama güç ile saniye (s) cinsinden ölçülen yürütme süresinin çarpımı yoluyla Joule (J) cinsinden belirlenmiştir.

3. Bulgular

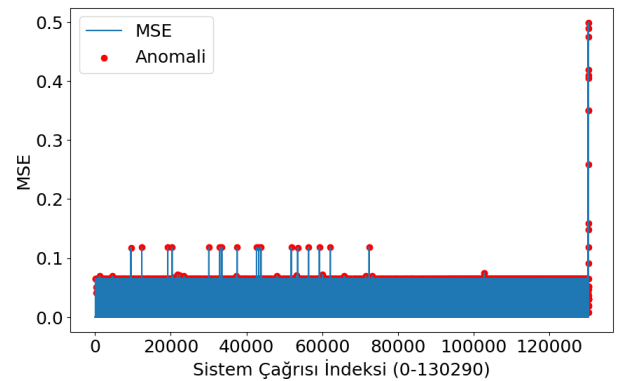
Bu çalışmada, RNN, GRU ve LSTM algoritmaları kullanılarak sistem çağrılarındaki anomalilerin tespit

edilmesi ve bu işlemlerin enerji tüketimi açısından karşılaştırılması hedeflenmiştir. Her bir mimari, anomali tespit performansı ve enerji verimliliği açısından analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, her bir modelin farklı başarı düzeyleri sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu modellerin anomali tespitinde etkinlikleri görselleştirilmiştir. Enerji tüketimlerini değerlendirmek için IPG aracı kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bulgular, modellerin zaman serisi verilerinde farklı bağımlılık yapılarını öğrenme kabiliyetlerini ortaya koyarken, enerji tüketimindeki farklılıkları da açıkça göstermiştir.

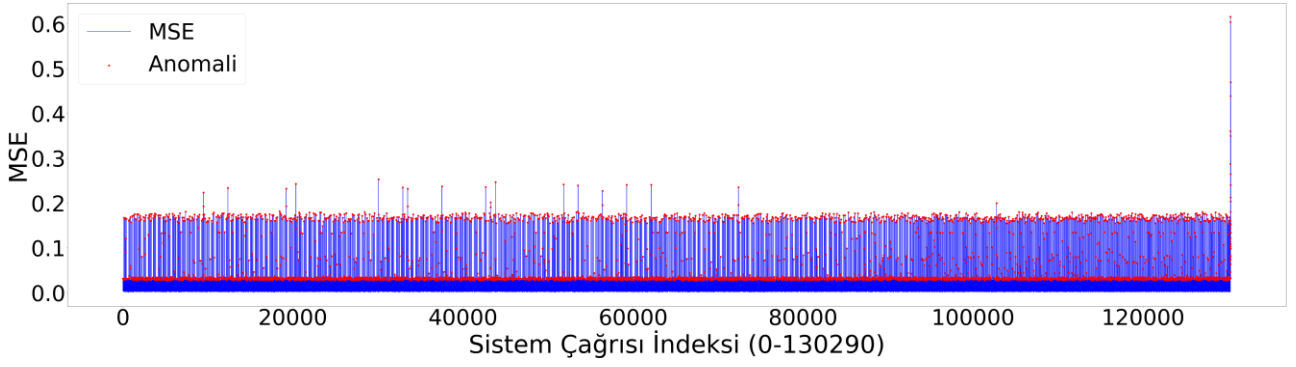
Üç farklı algoritma, test veri setinin üzerinde çalıştırıldıktan sonra elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sistem çağrılarındaki anomalilerin tespitinde her bir algoritmanın farklı performans sergilediği bulgusu elde edilmiştir. Şekil 5, 6 ve 7, elde edilen anomalileri histogram üzerinde göstermektedir. Bu kapsamda, LSTM toplamda 6.509 anomali tespit etmiştir. GRU, 5.559 anomaliyi tanımlarken, RNN ise toplamda 3.358 anomali tespit etmiştir.



Şekil 5. LSTM modeli kullanılarak anomalilerin histogram üzerinde gösterimi

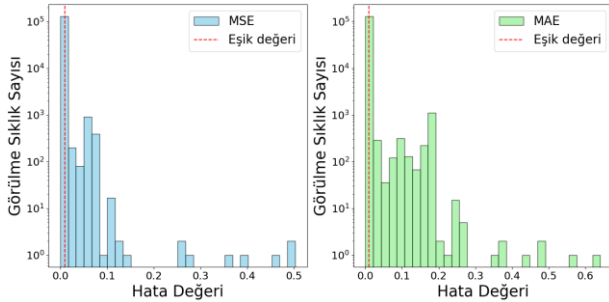


Şekil 6. RNN modeli kullanılarak anomalilerin histogram üzerinde gösterimi

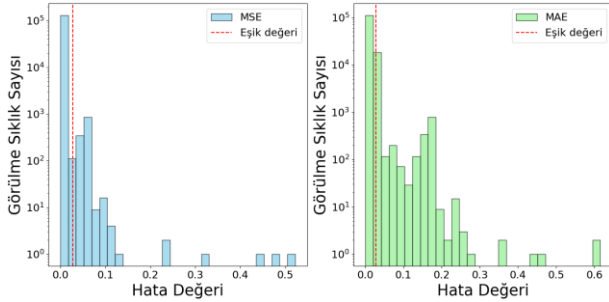


Şekil 7. GRU modeli kullanılarak anomalilerin histogram üzerinde gösterimi

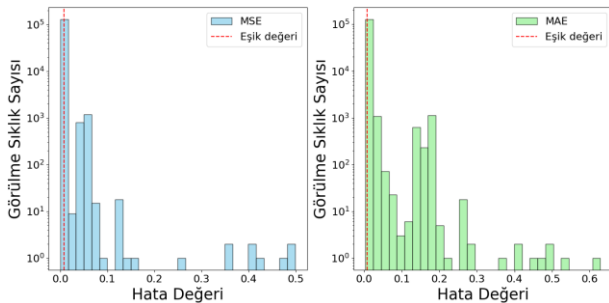
Tespit performansının daha ayrıntılı bir analizini yapmak için, MSE ve MAE histogramları her bir mimari için çıkarılmıştır. Şekil 8, 9 ve 10'da logaritmik ölçekte görülen MSE histogramları, hata değerlerinin yoğunluğunun belli bir eşik değerinin altında yoğunlaştığını, daha yüksek değerlerin ise anomalileri temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 8. LSTM modeline ait MAE ve MSE dağılımını gösteren performans histogramı



Şekil 9. GRU modeline ait MAE ve MSE dağılımını gösteren performans histogramı



Şekil 10. RNN modeline ait MAE ve MSE dağılımını gösteren performans histogramı

LSTM, GRU ve RNN modellerine kıyasla daha yüksek bir performans sergilemiştir. Gerçek anomalilerin

tespitindeki hassasiyet ve hata dağılımlarının netliği, bu sonuçları desteklemektedir. Ayrıca, eşik değer bazlı sınıflandırma gibi ileri tekniklerin kullanılması, LSTM modelinin bu bağlamda doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır.

Tablo 1 RNN, GRU ve LSTM için R^2 , MSE ve MAE değerlerini göstermektedir. LSTM için R^2 değeri 0.96, MSE değeri 3.18 ve MAE değeri 0.48; GRU için R^2 değeri 0.94, MSE değeri 3.21 ve MAE değeri 0.52; RNN için R^2 değeri 0.91, MSE değeri 3.96 ve MAE değeri 0.86 olarak elde edilmiştir. Bu 3 model arasında performans açısından en başarılı modelin LSTM olduğu tespit edilmiş, onu sırayla GRU ve RNN takip etmiştir.

Tablo 1. LSTM, GRU ve RNN modellerine ait performans karşılaştırılması.

	R^2	MSE	MAE
RNN	0.91	3.96	0.86
GRU	0.94	3.21	0.52
LSTM	0.96	3.18	0.48

Tablo 2 her model için enerji tüketim verilerini sunmaktadır. RNN, GRU ve LSTM için enerji tüketim değerleri sırasıyla 13.320,75 J, 20.934,47 J ve 27.984,75 J olarak ölçülmüştür. Tablo 2'de de gösterildiği üzere, bu modeller arasında en yüksek enerji verimliliğini RNN sağlamış; onu GRU ve LSTM takip etmiştir.

Tablo 2. RNN mimarisine dayalı üç farklı modelin enerji tüketim sonuçları (tüm deneyler 10 kez gerçekleştirilmiştir).

	Toplam Enerji Tüketimi (J)	Ortalama Güç (W)	Yürütme süresi (s)
RNN	13320.75	23.02	578.66
GRU	20934.47	24.10	868.65
LSTM	27984.75	23.80	1175.83

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, LSTM, RNN ve GRU modellerinin sistem çağrısı verilerinde üzerinde anomali tespiti performanslarını ve enerji verimliliklerini detaylı bir şekilde incelemiştir.

Çalışma sonuçlarına göre, RNN modeli tahminlerde daha yüksek hata üretmiş ve veri setindeki varyansı

açıklama oranı sınırlı kalmıştır. GRU, özellikle zaman serisi veya sıralı verilerde uzun vadeli bağımlılıkları daha iyi yakalayarak hatayı azaltmış ve RNN'ye kıyasla belirgin şekilde daha iyi sonuçlar elde etmiştir. LSTM modeli ise, hem MSE (3.18) hem de MAE (0.48) değerleri açısından en iyi performansı sergilemiştir. Ayrıca, R^2 katsayısının 0.96 olması, modelin veri setindeki varyansın büyük bir kısmını başarıyla yakaladığını göstermektedir.

Enerji verimliliği açısından LSTM, en yüksek enerji tüketimi değerine ulaşarak sistem çağrısı verilerinde anomali tespiti için enerji açısından verimli bir algoritma olmadığını ortaya koymuştur. Diğer taraftan RNN, enerji verimliliği açısından hem GRU hem de LSTM modellerine kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Modellerin ortalama güç tüketimi sonucunda elde edilen nispeten küçük farklar, yürütme süresi ile toplam enerji tüketimi arasındaki güçlü korelasyonu vurgulamıştır. Bu doğrultuda, algoritmaların yürütme süresinin enerji tüketimleriyle doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Gelecekte çalışmalar kapsamında, bu modellerin hibrit yaklaşımları veya dikkat mekanizmaları ile zenginleştirilmesi, büyük veri kümelerinde daha yüksek performans başarı ve verimlilik sağlayabilir. Ayrıca, karmaşık hesaplama görevlerini minimum yürütme süresi ile ele alabilen hibrit yaklaşımlar, enerji açısından daha verimli çözümler sunabilir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

[1] Fan, L., Wang, H., Zhao, Y., Xin, K. 2025. Application of Deep Learning in Public Network Security Management. *Journal of Computer, Signal, and System Research*, 2(1), 1-8.

[2] Nguyen, H. D., Tran, K. P., Thomassey, S., Hamad, M. 2021. Forecasting and Anomaly Detection approaches using LSTM and LSTM Autoencoder techniques with the applications in supply chain management. *International Journal of Information Management*, 57, 102282.

[3] Tan, K., Zhan, D., Yu, Z., Ye, L., Zhang, H., Fang, B. 2024. Multi-Stage Defense: Enhancing Robustness in Sequence-Based Log Anomaly Detection. In *ICC 2024-IEEE International*

Conference on Communications, 09-13 June, Denver, USA, 2725-2730.

- [4] Tian, M., Verma, S., Gao, Y. 2025. Enhancing 3D seismic facies interpretation through a modified patched deep learning approach leveraging spatio-temporal dependencies. *Computational Geosciences*, 29(1), 8.
- [5] Rodrigues, C. F., Riley, G., & Luján, M. 2018. SyNERGY: An energy measurement and prediction framework for Convolutional Neural Networks on Jetson TX1. In *Proceedings of the international conference on parallel and distributed processing techniques and applications (PDPTA)* (pp. 375-382). The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp). 30 July-2 August, Las Vegas, USA, 375-382.
- [6] Desislavov, R., Martínez-Plumed, F., & Hernández-Orallo, J. 2023. Trends in AI inference energy consumption: Beyond the performance-vs-parameter laws of deep learning. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, 100857.
- [7] Akkuzukaya, G., Yıldız, M. 2023. Time Series Anomaly Detection Embedded Systems By Using LSTM. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 7(2), 90-96.
- [8] Switrayana, I. N., Hammad, R., Irfan, P., Sujaka, T. T., Nasri, M. H. 2025. Comparative Analysis of Stock Price Prediction Using Deep Learning with Data Scaling Method. *JTIM: Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia*, 7(1), 78-90.
- [9] Rodriguez, C., Degioanni, L., Kameni, L., Vidal, R., Neglia, G. 2024. Evaluating the energy consumption of machine learning: Systematic literature review and experiments. *arXiv preprint arXiv:2408.15128*.
- [10] Fahad, M., Shahid, A., Manumachu, R. R., Lastovetsky, A. 2019. A comparative study of methods for measurement of energy of computing. *Energies*, 12(11), 2204.
- [11] Intel® Power Gadget, 2023. <https://archive.org/details/intel-power-gadget-windows> (Erişim Tarihi: 21.01.2025).
- [12] Duan, G., Fu, Y., Cai, M., Chen, H., & Sun, J. (2023). DongTing: a large-scale dataset for anomaly detection of the Linux kernel. *Journal of Systems and Software*, 203, 111745.
- [13] Zhang, T., Dipanzan, S. I., Tahmooresnejad, L., Ezzati-Jivan, N. 2024. Assessing Predictive Models for Energy Consumption Across Varied Software Environments. In *2024 IEEE*

- International Conference on Big Data (BigData)*, 15-18 December, Washington, 5233-5242.
- [14] Asghar, R., Fulginei, F. R., Quercio, M., Mahrouch, A. 2024. Artificial neural networks for photovoltaic power forecasting: a review of five promising models. IEEE Access.
- [15] O. Ezeme, Q. Mahmoud, A. Azim, and M. Lescisin. Syscall veri seti: Sistem Çağrılarını kullanarak bağlam modelleme ve anomali tespiti için bir veri seti. Mendeley Data, V2, 2019. <https://data.mendeley.com/datasets/vfvw7g8s8h/2> (Erişim Tarihi: 01.01.2025).
- [16] Memory, L. S. T. 1997. Sepp hochreiter and jürgen schmidhuber. Neural Computation, 9(8), 1735.
- [17] Aggarwal, S. 2023. LSTM based Anomaly Detection in Time Series for United States exports and imports. Munich Personal RePEc Archive (MPRA), 117149.
- [18] Puteri, D. I. 2023. Implementasi Long Short Term Memory (LSTM) dan Bidirectional Long Short Term Memory (BiLSTM) Dalam Prediksi Harga Saham Syariah. Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol, 11(1), 35-43.
- [19] Golshanrad, P., Faghih, F. 2024. DeepCover: Advancing RNN test coverage and online error prediction using state machine extraction. Journal of Systems and Software, 211, 111987.
- [20] Siami-Namini, S., Tavakoli, N., Namin, A. S. (2019, December). The performance of LSTM and BiLSTM in forecasting time series. In 2019 IEEE International conference on big data (Big Data), 09-12 December, Los Angeles, USA, 3285-3292.
- [21] Cho, K., Van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., Bengio, Y. 2014. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. arXiv preprint arXiv:1406.1078.
- [22] Mateus, B. C., Mendes, M., Farinha, J. T., Assis, R., Cardoso, A. M. 2021. Comparing LSTM and GRU models to predict the condition of a pulp paper press. Energies, 14(21), 6958.
- [23] Microsoft, 2025. <https://www.microsoft.com/tr-tr/software-download/windows10> (Erişim Tarihi: 01.06.2025).
- [24] Aswal, V. S., Singh, B. K., Maheshwari, R. 2025. Machine learning-based model for prediction of concrete strength. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 8(1), 48.
- [25] Suresh, B. S., Suresh, M. 2024. AI Based Retail Sales Management: Leveraging Optimized Metaheuristic Algorithms for Forecasting and Recommendations. In 2024 Second International Conference on Networks, Multimedia and Information Technology (NMITCON), 09-10 August, Bengaluru, India, 1-5.
- [26] Adeogun, O. Y., Adeoti, L., Allo, O. 2024. Machine Learning Approach in Predicting Water Saturation Using Well Data at "Tm" Niger Delta. Available at SSRN 4927838.
- [27] Smejkal, T., Hähnel, M., Ilsche, T., Roitzsch, M., Nagel, W. E., Härtig, H. 2017. Practical Energy Accounting for {Multi-Core} Systems. In 2017 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 17), 12-14 July, Santa Clara, USA, 589-601.
- [28] Buestán-Andrade, P. A., Peñacoba-Yagüe, M., Sierra-García, J. E., Santos, M. 2024. Wind power forecasting with machine learning algorithms in low-cost devices. Electronics, 13(8), 1541.
- [29] PranavRaj, R., Syam, S. R. 2024. Identification Of Malware Families Using Energy Consumption. In 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 24-28 June, Kamand, India, 1-6.
- [30] Tekin, N., Acar, A., Aris, A., Uluagac, A. S., & Gungor, V. C. 2023. Energy consumption of on-device machine learning models for IoT intrusion detection. Internet of Things, 21, 100670.

Annealing Effects on $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Thin Films: Structural, Electrical, and Optical Characterization

Duygu TAKANOGLU BULUT^{*1}, Koray YILMAZ², Orhan KARABULUT³

¹Pamukkale Üniversitesi, İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 20160, Denizli, Türkiye

^{2,3}Pamukkale Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

(Alınış / Received: 11.04.2025, Kabul / Accepted: 01.07.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Thin Film,
Thermal Evaporation,
Structural Characterization,
Hall Effect

Abstract: This study aims to explore the effects of annealing on the structural, electrical, and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films deposited by thermal evaporation. Results obtained from SEM equipped with EDAX, XRD, and Raman analysis revealed that CZTSe thin films were successfully obtained. Depending on the annealing temperature, increasing grain size and shifting from spherically shaped grains to rod-shaped particles were observed. The room temperature resistivity decreased with increasing annealing temperature, exhibiting values of 44.10, 2.61, and 3.08 $\Omega\text{-cm}$ for films annealed at 400 °C, 500 °C, and 600 °C, respectively. Carrier concentrations of the same samples obtained from Hall Effect measurements were observed as 5.13×10^{15} , 3.07×10^{17} , and $1.09 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ with *p*-type conductivity. The as-deposited and annealed thin films exhibited optical band gap values of 1.98, 1.78, 1.35, and 1.65 eV, respectively.

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ İnce Filmleri Üzerindeki Tavlama Etkileri: Yapısal, Elektriksel ve Optik Karakterizasyon

Anahtar Kelimeler

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ İnce Film,
Termal Buharlaştırma,
Yapısal Karakterizasyon,
Hall Etkisi

Öz: Bu çalışma, termal buharlaştırma yöntemiyle üretilen $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri üzerine tavlama işleminin etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. SEM-EDAX, XRD ve Raman analizlerinden elde edilen sonuçlar, CZTSe ince filmlerin başarılı bir şekilde üretildiğini ortaya koymuştur. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak, tane boyutunda artış ve küresel şekilli tanelerden çubuk biçimli yapılara doğru bir morfolojik dönüşüm gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığındaki öz direncin, artan tavlama sıcaklığı ile birlikte azaldığı belirlenmiş; bu değerler sırasıyla 400 °C, 500 °C ve 600 °C'de tavlanan filmler için 44,10, 2,61 ve 3,08 $\Omega\text{-cm}$ olarak ölçülmüştür. Aynı örnekler için Hall etkisi ölçümleriyle elde edilen taşıyıcı yoğunlukları sırasıyla $5,13 \times 10^{15}$, $3,07 \times 10^{17}$ ve $1,09 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olup, tüm örneklerde *p*-tipi iletkenlik gözlemlenmiştir. Tavlınmamış ve tavlınmış ince filmler sırasıyla 1,98, 1,78, 1,35 ve 1,65 eV optik bant aralığı değerleri sergilemiştir.

1. Introduction

Thin-film solar cells using chalcopyrite semiconductor materials have become an important research topic in recent years. Solar cells based on CuInGaSe_2 (CIGS) and $\text{CuInGa}(\text{Se},\text{S})_2$ have exhibited efficiencies of around 20% and 23%, respectively, as reported in the literature [1-5]. However, recently, one of the main problems faced by CIGS-based solar cells, the price of indium and gallium elements, has been constantly increasing due to a higher global demand than supply.

In addition, indium and gallium are widely used in areas such as producing flat-screen LCD TVs and optoelectronic fields [6,7]. For this reason, researchers are focused on producing solar cells with similar properties but without using indium and gallium.

In recent years, researchers have begun to use the $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compound as an absorber layer for thin film solar cells. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ offers a sustainable alternative to CIGS, as it is composed of non-toxic and

*Corresponding author: dbulut@pau.edu.tr

earth-abundant elements such as Cu, Zn, Sn, and Se. For this reason, Friedlmeier et al. have suggested that the Cu₂ZnSnSe₄ compound is a promising candidate for the absorber layer that belongs to the I₂-II-IV-VI₄ semiconductor family [8,9]. Hereafter, Cu₂ZnSn(S,Se)₄ derived thin film solar cells using different deposition methods were reported, and efficiencies were found to be around 10% [10-14].

In 2013, the IBM group reported the efficiency of solar cells comprising Cu₂ZnSn(S,Se)₄ 11.1%, which was deposited by hydrazine-based liquid coating [15,16]. Subsequently, in 2014, Cu₂ZnSn(S,Se)₄-based solar cells, fabricated via a toxic hydrazine (N₂H₄) solution process, achieved a maximum efficiency of 12.6% [10,17]. More recently, further advancements have been made; in 2023, an efficiency of 13.6% was reported through controlled selenization processes [18], and in 2024, a record efficiency of 15.4% (certified 14.9%) was achieved by employing a vacancy-assisted cation rearrangement strategy [19].

The physical properties of these films have been investigated by many researchers, and different synthesis methods have been reported. It is reported that Cu₂ZnSnSe₄ has a high absorption coefficient ($>10^4$ - 10^5 cm⁻¹) and direct band gap (~0.9-1.54 eV), which closely matches the solar spectrum [9,20-22]. It also shows *p*-type conductivity and has a carrier concentration of films ranging from 10¹⁷-10¹⁹ cm⁻³ [23-26]. Additionally, Cu₂ZnSnSe₄ is also an earth-abundant and low-cost raw material, which is required for low-cost photovoltaics [7]. These properties indicate that Cu₂ZnSnSe₄ thin films can be considered strong candidates for absorber layers in solar cells.

Regardless of the deposition techniques, the film's characterization with respect to temperature dependent electrical and optical properties is an open subject in the literature. This study aimed to fabricate Cu₂ZnSnSe₄ thin films by employing the thermal evaporation technique with a single crucible. Subsequently, detailed temperature-dependent electrical characterization was carried out between 10 and 400 K using Hall effect measurements to determine the fundamental requirements for photovoltaic applications. The as-deposited films were annealed at various temperatures, and the annealing effects on the structural, optical, and electrical properties of the thin films were systematically characterized.

2. Materials and Methods

Cu₂ZnSnSe₄ (CZTSe) thin films, approximately 0.5 μm in thickness, were prepared onto soda-lime glass substrates pre-treated by chemical and ultrasonic cleaning, using a Vaksis-PVD-Handy thermal evaporation system. Stoichiometric amounts of copper, zinc, tin, and selenium, each with 4Ns purity,

were employed to prepare the precursor material for evaporation. Source elements were placed into a cleaned quartz crucible, which was subsequently sealed under vacuum. To ensure complete synthesis and compositional uniformity, the crucible was slowly heated up to 1200 °C while the tubes were continuously shaken. The crucible was subjected to heat treatment for 48 h at this temperature, and after synthesis, the furnace was slowly cooled to ambient temperature. The precursor material for evaporation was subsequently obtained by grinding the resulting ingot into a fine powder. The evaporation source was placed into a tungsten boat, and thin films were subsequently deposited via the thermal evaporation technique. Film thickness and evaporation rate were precisely controlled by employing a thickness monitor. During evaporation, the pressure was kept constant at 10⁻⁵ Torr, and the thin film deposition was performed at a rate of 20 Å/s.

The 'as-deposited' samples were annealed in an N₂ environment at 400 °C, 500 °C, and 600 °C for one hour, and the effect of annealing of Cu₂ZnSnSe₄ thin films on structural, optical, and electrical characteristics was examined.

X-ray diffraction analysis (Rigaku SmartLab, Japan) using CuKα radiation was employed to characterize the crystalline structure of the thin films. Field emission scanning electron microscopy (FESEM, JEOL JSM-7600F, Japan) was employed to examine the microstructure of the films. Raman spectra of the samples were obtained using a Raman spectrometer (BWTEK BWS465-785S, USA) integrated with a CCD detector, in a backscattering geometry, and employing a 785 nm laser as the excitation source. Temperature-dependent Hall effect measurements were performed using a Keithley 2400 source-measure unit and a Keithley 2700 electrometer assembled with a Keithley 7709 matrix card. For Hall measurements, a magnetic field of 1.2 T, generated by a GMW magnet, was applied perpendicular to the film layers. The temperature was precisely controlled and monitored using a LakeShore 331 temperature controller. Optical absorption properties were investigated using a UNICO SQ 2802 UV/VIS spectrophotometer.

3. Results and Discussions

Thermally evaporated thin films were labeled according to their annealing conditions, as shown in Table 1.

Table 1. Labels of the thin films according to the temperature of annealing

Sample	Annealing Temperature (°C)
T0	-
T400	400
T500	500
T600	600

FESEM was employed to examine the microstructure of the thin films, as it provides detailed information on surface morphology. The corresponding surface images are presented in Figure 1.

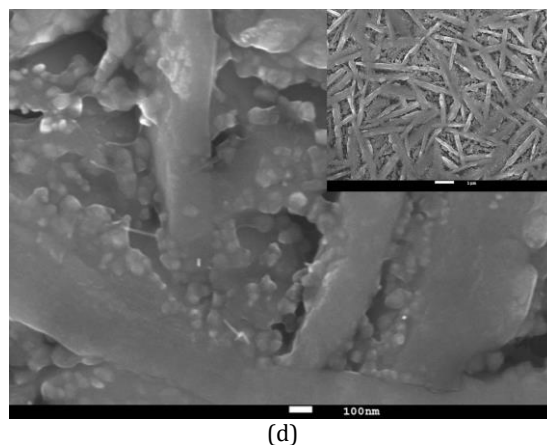
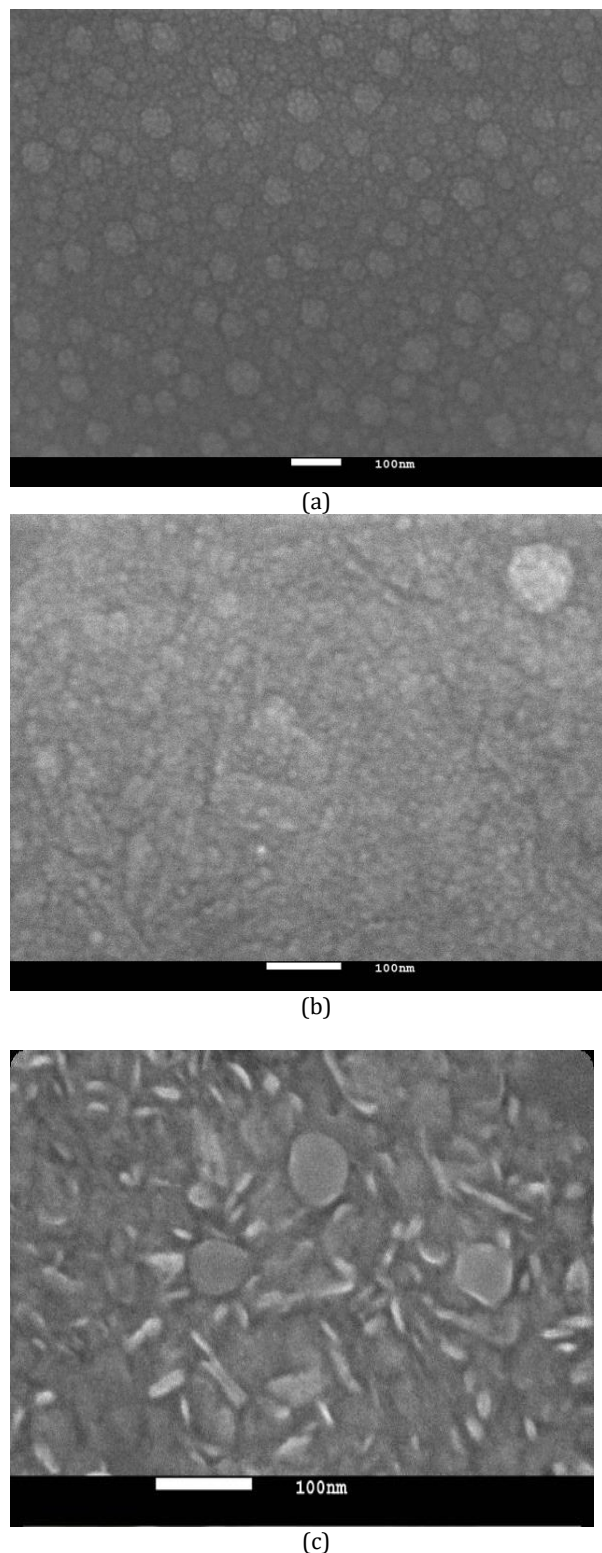


Figure 1. FESEM images of thin films (a) T0, (b) T400, (c) T500, (d) T600 (The inset shows a higher magnification image of the T600 film with a 1 μm scale bar)

From the comparison of the micrographs, it was determined that the crystallization of the films was enhanced with annealing temperature, and the grain morphology was transformed from spherical to rod-shaped particles. It is observed that all films are homogeneous and covered with uniform grains, and the size of grains increases with annealing temperature. J. Iljina et al. reported that increasing the selenization duration led to larger crystal sizes, with crystals of 1.5–4 μm observed in films annealed for 60 minutes at 470 $^{\circ}\text{C}$ [27]. In a subsequent study on $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, S. Hong et al. annealed thin films at various temperatures ranging from 350 $^{\circ}\text{C}$ to 650 $^{\circ}\text{C}$. It was reported that annealing at 550, 600, and 650 $^{\circ}\text{C}$ caused an increase in grain size [28]. In a different study, D. H. Kuo et al. fabricated $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films via sputtering Cu-Zn-Sn metallic precursors and selenization at 500–600 $^{\circ}\text{C}$. After selenization at higher temperatures, a suitable microstructure with large and uniform grains was reported for $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ films [25]. Consistent with these findings, previous studies have also shown that elevated selenization and substrate temperatures lead to increased grain size [11,29–31].

The stoichiometry of both the source material and the thin films was conducted with an FESEM coupled with an EDAX detector. The atomic weight percentages of Cu, Zn, Sn, and Se in the powder compound were measured as 21.02%, 15.32%, 16.52%, and 47.15%, respectively. The EDAX spectrum revealed no impurities in the source material, and the stoichiometry was found to be nearly consistent with the ideal 2:1:1:4 ratio. In Figure 2, the EDAX spectra corresponding to both the synthesized source material and the thin films annealed at various temperatures are presented. The obtained spectra confirm the presence of Cu, Zn, Sn, and Se in both the as-deposited and annealed films, indicating that the annealing process did not induce any alteration in the fundamental chemical composition of the films. This observation suggests that, despite the structural

reorganization induced by thermal treatment, the chemical integrity of the films was preserved.

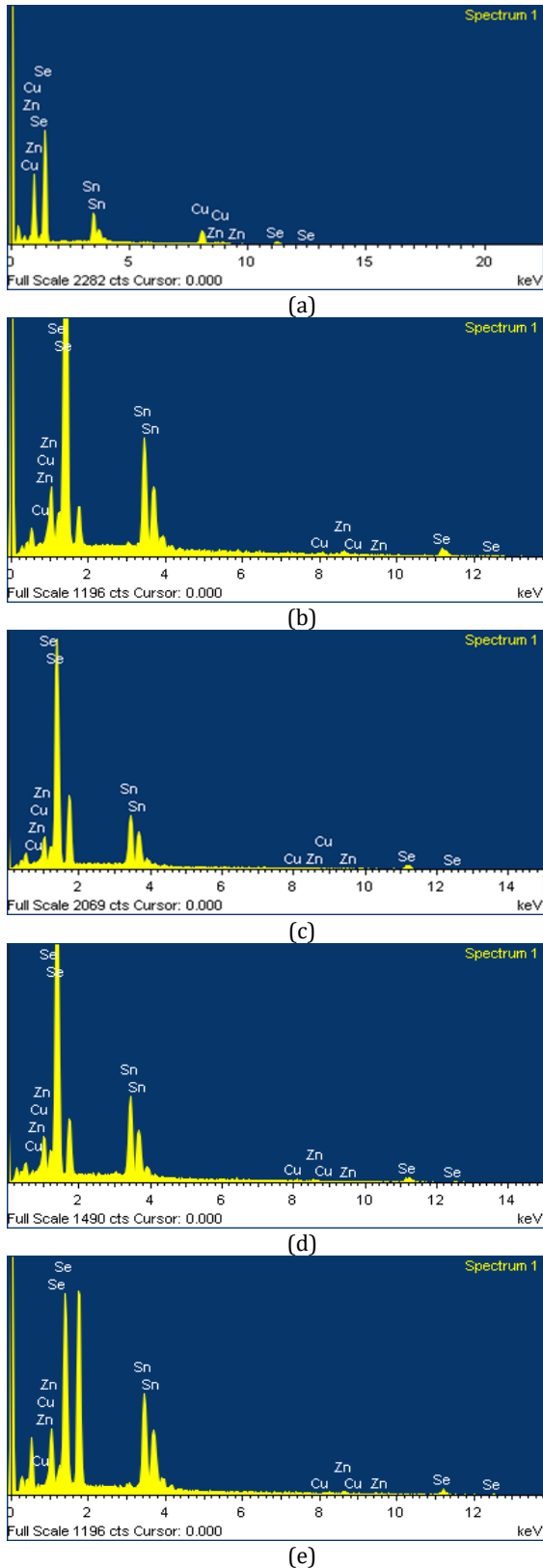


Figure 2. EDAX spectra of (a) CZTSe source material, (b) T0, (c) T400, (d) T500, (e) T600 films

The XRD pattern of the source material is presented in Figure 3. From the diffraction pattern of the source material, considering the intensity and sharpness of

the peaks, one can conclude that the film structure indicates good crystallinity. The obvious peaks could be attributed to (101), (112), (220), (312), (400)\(008), and (316)\(332) planes of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. The resulting XRD diffraction peaks and planes are well-matched with the International Diffraction Data (ICDD #00-052-0868). Comparable findings have been reported in previous studies [32,33].

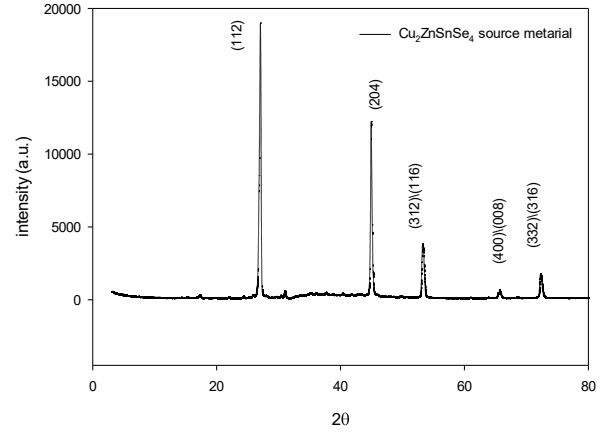


Figure 3. XRD pattern of source material

The X-ray diffractograms of the produced thin films are displayed in Figure 4. From the diffractogram, it is observed that the peak positions of the T0, T500, and T600 samples exhibit identical 2θ values, while the intensities of the peaks increase with annealing. A prominent peak at approximately 21.16° is observed for all samples, with its intensity significantly increasing after thermal treatment at 600°C . The diffraction peak at this position is attributed to the (110) plane, which is characteristic of the $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compound. Similar results were also reported in previous studies [21,34,35]. A prominent diffraction peak at $2\theta=14.31^\circ$ indexed to the (101) crystallographic plane was observed exclusively in the XRD pattern of the CZTSe thin film annealed at 400°C . This peak, which appears as the dominant reflection in the T400 sample, was no longer visible in the patterns of films annealed at 500°C and 600°C . The selective emergence of this peak at 400°C suggests a preferential orientation along the (101) plane, likely stabilized under moderate thermal conditions. At higher temperatures, enhanced atomic diffusion and increased thermal energy are presumed to facilitate structural reorganization, leading to a shift in preferred orientations and the eventual suppression of the (101) reflection. Other researchers have reported similar results for $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compound produced by different methods [10,24,36].

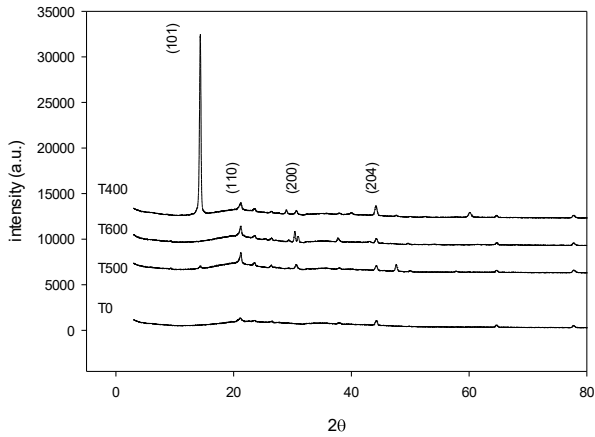


Figure 4. XRD pattern of samples

Raman scattering spectroscopy was employed to investigate the crystallinity of CZTSe, along with the possible formation of secondary phases in the films annealed at various temperatures, as presented in Figure 5. The major peaks obtained from the Raman Spectrum for the CZTSe are expected at between $171\text{--}173\text{ cm}^{-1}$, $194\text{--}197\text{ cm}^{-1}$, and $231\text{--}235\text{ cm}^{-1}$ according to the literature [37–39]. In this study, no Raman peaks were observed for the as-deposited samples. All annealed samples exhibited nearly identical Raman spectra, with a prominent peak at approximately 174 cm^{-1} , which is attributed to the kesterite structure of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films [40–42].

The influence of annealing temperature on the evolution of the crystal structure was comprehensively examined through XRD and Raman analyses. It was evaluated that the crystal structural changes observed after the annealing process did not affect the chemical composition of the films. In the XRD patterns, the characteristic peaks corresponding to the $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ phase were preserved in all samples, while increases in peak intensities and preferred orientations were observed, attributed to enhanced crystallinity. Therefore, it was concluded that the improvements in the crystal structure did not induce any significant change in the chemical composition.

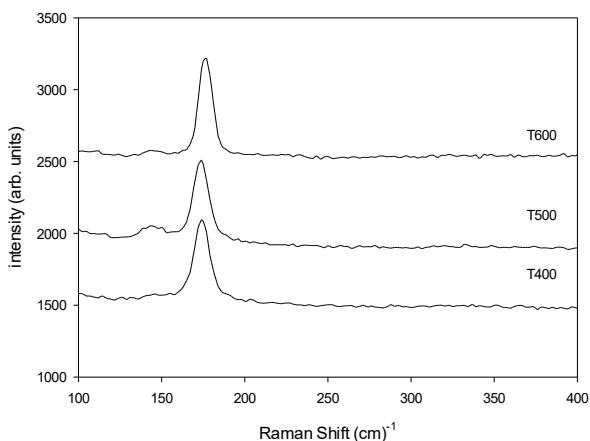


Figure 5. Raman spectra of the annealed films

The electrical conductivity of the samples was obtained through the Van der Pauw technique under vacuum within the temperature interval of $10\text{--}400\text{ K}$. The temperature dependent conductivity measurements of the T0 sample could not be measured owing to its high resistivity. The relationship between the logarithm of conductivity and inverse temperature is illustrated in Figure 6. Temperature-dependent measurements revealed that conductivity increases with both measurement temperature and annealing temperature, indicating the semiconducting nature of the films. As shown in Figure 6, the greatest increase in conductivity was recorded for the $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ samples annealed at 500°C .

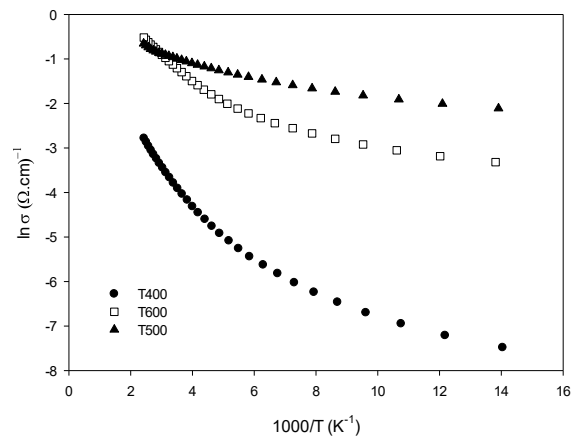


Figure 6. Variation of electrical conductivity with temperature for annealed samples

The room temperature electrical resistivities were measured as around 44.1 , 2.61 , and $3.08\ \Omega\text{-cm}$ for the T400, T500, and T600 samples, respectively. The most significant decrease in electrical resistivity was observed in the sample annealed at 500°C , which can be ascribed to changes in structural parameters and improvements in crystallite and grain size. The enhancement in electrical conductivity observed after annealing is directly associated with improvements in the crystal structure and grain growth. As the annealing temperature increases, the rise in XRD peak intensities indicates an increase in crystallinity and a reduction in structural defects such as vacancies, dislocations, and grain boundaries. The reduction in these defects decreases the number of scattering centers that hinder carrier motion, thereby contributing to increased mobility. Similarly, the grain growth observed in SEM images suggests a decrease in grain boundary density, allowing carriers to move over longer distances with reduced scattering. Consequently, the combined effect of structural ordering and grain enlargement leads to improved electrical conductivity through increased carrier concentration and mobility. This mechanism is consistent with commonly observed scattering

behaviors in thin-film semiconductors [43]. Rachmat et al. reported a similar decrease in resistivity. As the substrate temperature increased, the resistivity decreased significantly—from 8.30 to 0.735 $\Omega\text{-cm}$ [24]. Also, Babu et al. reported a decrease in electrical resistivity from 0.8 to 0.1 $\Omega\text{-cm}$ with increasing substrate temperature [29]. In a further study, a decrease in resistivity from 58 to 0.16 $\Omega\text{-cm}$ was reported by Kuo et al. for films fabricated using the DC magnetron sputtering technique [25].

The temperature-dependent electrical conduction was evaluated throughout the whole measurement range using the following relation [44],

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (1)$$

where σ_0 denotes the pre-exponential factor determined by the material properties, E_a represents the thermal activation energy associated with electrical conduction, and k is the Boltzmann constant. Accordingly, a plot of $\ln \sigma$ versus $1000/T$ results in a linear relationship with a slope of $-E_a/kT$, from which the activation energy (E_a) can be determined. As presented in Figure 6, the plots of $\ln \sigma$ versus $1000/T$ exhibit two distinct linear regions, each corresponding to a different activation energy. The depths of the impurity centers, calculated from the electrical conductivity measurements, are provided in Table 2 for annealed samples.

Hall Effect measurements as a function of temperature were conducted to determine the conduction type and to analyze variations in carrier concentration and mobility within the 10–400 K interval. The temperature dependent Hall effect measurements of the T0 sample could not be performed as a result of the high resistivity of the film. Thus, Hall effect measurements were conducted for the T400, T500, and T600 samples. The sign of the Hall voltages revealed that all samples exhibited p -type conductivity.

The dependence of carrier concentration on the inverse temperature within the range of 10–400 K is shown in Figure 7. As illustrated, the carrier concentration increases with temperature, as described by the following expression,

$$p = p_0 \exp(-E_a/kT) \quad (2)$$

The strong temperature dependence and exponential increase of carrier concentration with increasing temperature indicate that thermionic emission, resulting from the thermal excitation of carriers, is the dominant transport mechanism. The increase in carrier concentration, ranging between 10^{15} and 10^{17} cm^{-3} with annealing, can be assigned to improved crystallinity and grain size. Carrier concentrations of Cu₂ZnSnSe₄ films have been reported to range between 10^{17} and 10^{19} cm^{-3} , a range which varies with the deposition method [23–26].

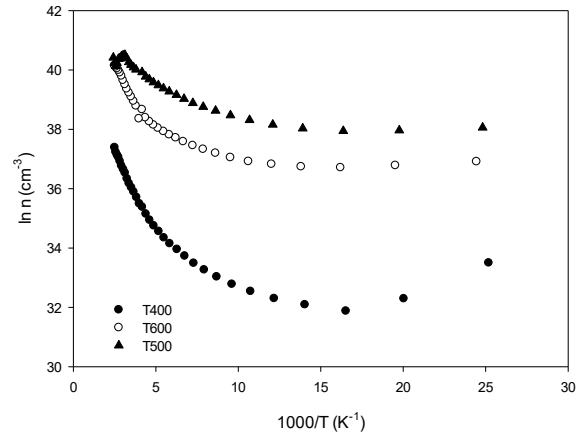


Figure 7. Temperature-dependent carrier concentration of annealed samples

To identify the existing scattering mechanisms, the variation of $\text{Log}(\mu)$ with $\text{Log}(T)$ was analyzed since the mobility increases with temperature according to the relation $\mu \propto T^n$, where n defines the dominant scattering mechanism. Room temperature mobilities were found to be 125, 35.3, and 84 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ for T400, T500, and T600 samples. Huo Kim et al. reported mobility values in the range of 1.30–9.27 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ for thin films, which were fabricated using the simple process of selenization [26].

Table 2. Activation energies and selected electrical parameters of the films evaluated at 295 K

Sample	$\rho(\Omega\text{-cm})$	$E_{a1}(\text{meV})$	$E_{a2}(\text{meV})$	$V_H(\text{V})$	$\mu_H(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$	$p(\text{cm})^{-3}$
T0	-	-	-	-	-	-
T400	44.1	0.03	48.89	2.92×10^{-3}	125.0	5.13×10^{15}
T500	2.61	9.00	16.98	0.48×10^{-3}	35.3	3.07×10^{17}
T600	3.08	0.94	38.91	1.37×10^{-3}	84.0	1.07×10^{17}

By changing the selenization temperature and the $[\text{Cu}]/([\text{Zn}]+[\text{Sn}])$ ratio, mobility values of Cu₂ZnSnSe₄ thin films were reported to range from 1.3–80.0 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$.

It was reported by Kuo et al. that low Cu content is responsible for low mobilities, while a higher $[\text{Zn}]+[\text{Sn}]$ ratio results in increased mobility values

[25]. The mobility of Cu₂ZnSnSe₄ thin films, reported by other researchers to range from 1.57 to 39.72 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ depending on the substrate temperature, was explained by a decrease attributed to scattering and structural imperfections [24]. By varying the Cu/(Zn+Sn) composition ratio in the thin films, mobility values of 1.7, 2.3, and 1.4 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ were obtained for Cu/(Zn+Sn) ratios of 1.22, 1.00, and 0.82, respectively [23].

The variation of Hall mobility with temperature for the sample annealed at 400 °C is presented in Figure 8(a). At low temperatures (between 20–80 K), the mobility increases with temperature, and the linear variation fits the relation $\mu \propto T^{3.09}$, which is attributed to ionized impurity scattering as the *primary* scattering mechanism. In the temperature region above 90 K, a decrease in mobility with increasing temperature is observed, consistent with $\mu \propto T^{-1/2}$, indicating that polar optical phonon (piezoelectric) scattering is the dominant transport mechanism in this regime [45]. The variation of Hall mobility with temperature for the T500 film is presented in Figure 8(b). In the low-temperature region (20–50 K), the Hall mobility is dominated by ionized impurity scattering with an exponent of $n=1.07$. At higher temperatures for the same sample, the mobility decreases with increasing temperature, with $n=-0.88$, suggesting that hole scattering is mainly attributed to acoustic phonon scattering. The Hall mobility as a function of temperature for the T600 film is shown in Figure 8(c). In the low-temperature range (30–120 K), the Hall mobility is dominated by neutral impurity scattering with $n=0.67$, arising from unionized donors and neutral defects. At temperatures above 220 K, a decrease in mobility with $n=-1.42$ indicates that acoustic phonon scattering is the predominant conduction mechanism.

Room-temperature optical absorption measurements were carried out for the thin films in the wavelength range of 190–1100 nm. Generally, the dependence of the absorption coefficient (α) on the incident photon energy ($h\nu$) is described by the following equation [46],

$$h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (3)$$

where A denotes a coefficient associated with the transition probability, E_g represents the semiconductor band gap, and n is assigned values of 1/2 for direct transitions and 2 for indirect allowed transitions.

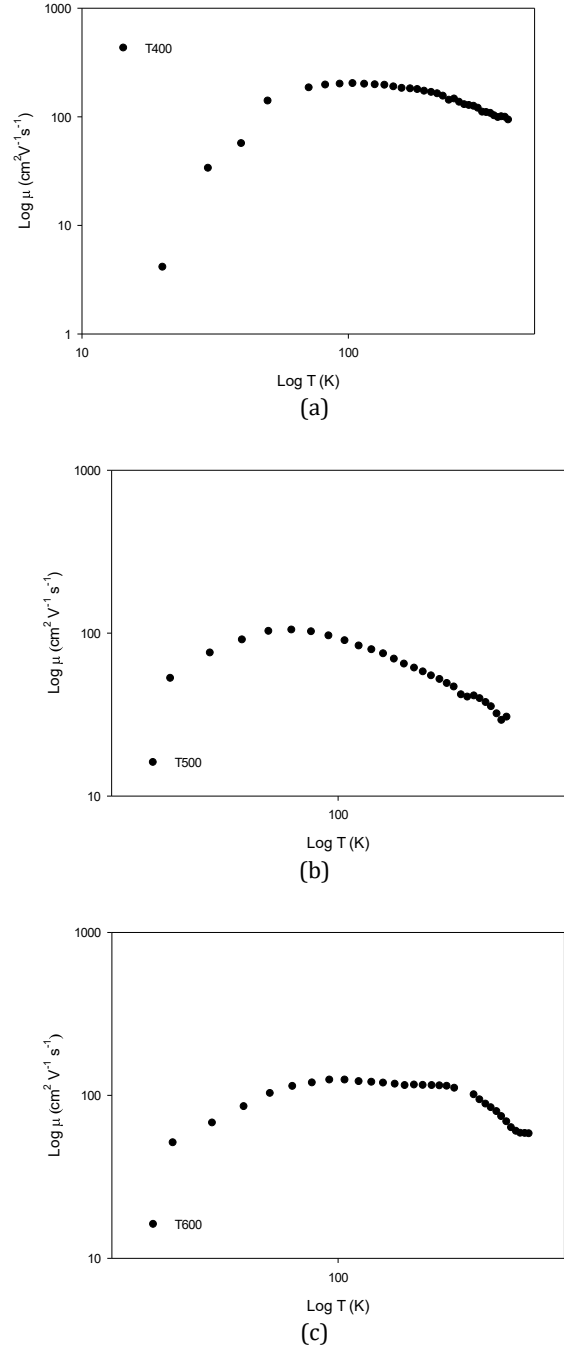


Figure 8. Variation of Log(μ) with Log(T) for the samples (a) T400, (b) T500 and (c) T600

The linear behavior of the plot confirms the presence of a direct transition [47]. Accordingly, the optical band gap values were determined through linear extension of the $(ah\nu)^2$ versus $(h\nu)$ plot toward the energy axis [48]. In Figure 9, the optical absorption spectra of the T0, T400, T500, and T600 thin films are presented in the form of $(ah\nu)^2$ versus $(h\nu)$ plots, from which the band gaps were obtained to be 1.98, 1.78, 1.35, and 1.65 eV, respectively. As illustrated in Figure 9, annealing leads to a decrease in the band gap values of CZTSe thin films, with the lowest value obtained at 500 °C. This significant reduction in band gap at 500 °C may be due to the increase in free carrier concentration and the enhancement in the grain morphology of the films. Similar behavior has also

been reported for Cu₂ZnSnSe₄ thin films deposited on hot substrates [29]. Depending on the deposition methods and conditions, band gaps were reported to be around ~1.0 eV [28,31,49] and ~1.4–1.5 eV [23,24,36,50] for Cu₂ZnSnSe₄ thin films. Our results are consistent with those obtained in previous studies on co-evaporated [29] and pulsed laser deposited [24] Cu₂ZnSnSe₄ films.

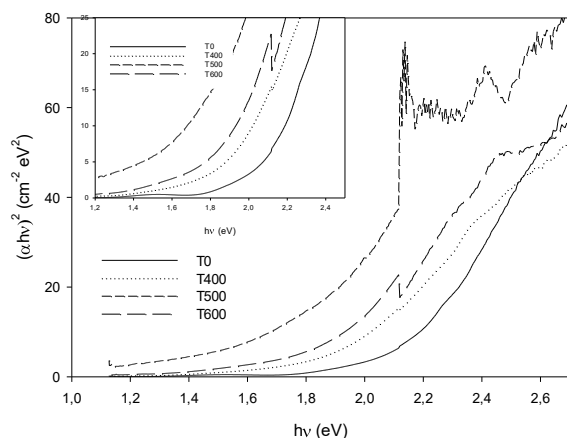


Figure 9. Optical absorption spectra of thin films

4. Conclusions

XRD, SEM, and Raman measurements confirmed that Cu₂ZnSnSe₄ thin films were successfully deposited through thermal evaporation. The experimental results demonstrated that the structural, electrical, and optical properties of the samples are strongly influenced by the annealing treatment. Because of the extremely high resistivity of the as-grown film, measurements could not be performed; however, a considerable decrease in resistivity was observed with annealing, reaching 2.61 Ω-cm at 500 °C. The p-type conductivity of the annealed films was confirmed through Hall effect measurements, with Hall mobility values ranging from 84–125 cm²V⁻¹s⁻¹. The carrier concentration was found to increase from 5.13×10¹⁵ to 3.07×10¹⁷ cm⁻³, depending on the heat treatment. Absorption studies revealed that the band gaps are direct in nature and were determined to be 1.98, 1.78, 1.35, and 1.65 eV for the as-grown and annealed samples, respectively, with an absorption coefficient of approximately 10⁵ cm⁻¹. These band gap values, which can be tuned by heat treatment, are aligned with the optimum band gap required to achieve maximum theoretical conversion efficiency. These results suggest that polycrystalline Cu₂ZnSnSe₄ films produced by the thermal evaporation method could be a promising alternative for the absorber layer in solar cell applications.

Acknowledgment

This study was financially supported by Pamukkale University - Scientific Research Project Center (PAU-BAP) with the project number 2013FBE021.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Mufti N., Amrillah T., Taufiq A., Sunaryono, Aripriharta, Diantoro M., Zulhadjri, N., H. 2020. Review of CIGS-based solar cells manufacturing by structural engineering. *Solar Energy*, 207, 1146-1157.
- [2] Rahman M. F, Chowdhury M., Marasamy L., Mohammed M. K. A., Haque M. D., Al Ahmed S. R., Irfan A., Chaudhry A. R., Goumri-Said S. 2024. Improving the efficiency of a CIGS solar cell to above 31% with Sb₂S₃ as a new BSF: a numerical simulation approach by SCAPS-1D. *RSC Advance*, 14(3), 1924-1938.
- [3] Reinhard P., Chirila A., Blosch P., Pianezzi F., Nishiwaki S., Buecheler S., Tiwari A. N. 2013. Review of Progress Toward 20% Efficiency Flexible CIGS Solar Cells and Manufacturing Issues of Solar Modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(1), 572-580.
- [4] Nakamura M., Yamaguchi K., Kimoto Y., Yasaki Y., Kato T., Sugimoto H. 2019. Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Thin-Film Solar Cell With Record Efficiency of 23.35%. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(6), 1863-1867.
- [5] Jackson P., Hariskos D., Lotter E., Paetel S., Wuerz R., Menner R., Wischmann W., Powalla M. 2011. New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(7), 894-897.
- [6] Bendapudi S. S. K. 2011. Novel Film Formation Pathways for Cu₂ZnSnSe₄ for Solar Cell Applications. University of South Florida, Master of Science in Electrical Engineering, 18s, Tampa, USA.
- [7] Siebentritt S., Schorr S. 2012. Kesterites—a challenging material for solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(5), 512-519.
- [8] Friedlmeier T., Dittrich H., Schock H. 1998. Growth and Characterization of Cu₂ZnSnS₄ and Cu₂ZnSnSe₄ Thin Films for Photovoltaic Applications. The 11th Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-11), 8-12 September, Salford, UK, 345-348.

- [9] Salomé P. M. P., Fernandes P. A., da Cunha A. F., Leitão J. P., Malaquias J., Weber A., González J.C., da Silva M. I. N. 2010. Growth pressure dependence of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(12), 2176-2180.
- [10] Oh M., Kim W. K. 2014. Sn compensation via SnSe binary vapor supply during $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ formation. *Journal of Alloys and Compounds*, 616, 436-441.
- [11] Uday Bhaskar P., Suresh Babu G., Kishore Kumar Y. B., Sundara Raja V. 2013. Growth and characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films by a two-stage process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 115, 181-188.
- [12] Shin B., Gunawan O., Zhu Y., Bojarczuk N. A., Chey S. J., Guha S. 2013. Thin film solar cell with 8.4% power conversion efficiency using an earth-abundant $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ absorber. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 72-76.
- [13] Repins I., Beall C., Vora N., DeHart C., Kuciauskas D., Dippo P., To B., Mann J., Hsu W-C, Goodrich A. 2012. Co-evaporated $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ films and devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, 154-159.
- [14] Barkhouse D. A. R., Gunawan O., Gokmen T., Todorov T. K., Mitzi D. B. 2012. Device characteristics of a 10.1% hydrazine-processed $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se,S})_4$ solar cell. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(1), 6-11.
- [15] Todorov T. K., Tang J., Bag S., Gunawan O., Gokmen T., Zhu Y., Mitzi D. B. 2013. Beyond 11% efficiency: characteristics of state-of-the-art $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ solar cells. *Advanced Energy Materials*, 3(1), 34-38.
- [16] Kim S., Kim J. 2013. Effect of selenization on sprayed $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin film solar cell. *Thin Solid Films*, 547, 178-180.
- [17] Wang W., Winkler M. T., Gunawan O., Gokmen T., Todorov T. K., Zhu Y., Mitzi D.B. 2014. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 4(7), 1301465.
- [18] Zhou J., Xu X., Wu H., Wang J., Lou L., Yin K., Gong Y., Shi J., Luo Y., Li D. 2022. A precisely regulating phase evolution strategy for highly efficient kesterite solar cells. *arXiv preprint arXiv:221013714*. (Accessed date: 07.04.2025).
- [19] Wang J., Lou L., Yin K., Meng F., Xu X., Jiao M., Zhang B., Shi J., Wu H., Luo Y. 2024. Vacancy enhanced cation ordering enables > 15% efficiency in Kesterite solar cells. *arXiv preprint arXiv:240405974*. (Accessed date: 07.04.2025).
- [20] Du Y. F., Zhou W. H., Zhou Y. L., Li P. W., Fan J. Q., He J. J., Wu S. X. 2012. Solvothermal synthesis and characterization of quaternary $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15(2), 214-217.
- [21] Adhi Wibowo R., Hwa Jung W., Kim K. H. 2010. Synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compound powders by solid state reaction using elemental powders. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(12), 1702-1706.
- [22] Meng M., Wan L., Zou P., Miao S., Xu J. 2013. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films prepared by selenization of one-step electrochemically deposited Cu-Zn-Sn-Se precursors. *Applied Surface Science*, 273, 613-616.
- [23] Shao L., Zhang J., Zou C., Xie W. 2012. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Thin Films by Selenization of Simultaneously Evaporated Sn-Zn-Cu Metallic Layers for Photovoltaic Applications. *Physics Procedia*, 32, 640-644.
- [24] Adhi Wibowo R., Soo Lee E., Munir B., Ho Kim K. 2007. Pulsed laser deposition of quaternary $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films. *Physica Status Solidi (a)*, 204(10), 3373-3379.
- [25] Kuo D. H., Hsu J. T., Saragih A. D. 2014. Effects of the metallic target compositions on the absorber properties and the performance of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ solar cell devices fabricated on TiN-coated Mo/glass substrates. *Materials Science and Engineering: B*, 186, 94-100.
- [26] Kim K. H., Amal I. 2011. Growth of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films by selenization of sputtered single-layered Cu-Zn-Sn metallic precursors from a Cu-Zn-Sn alloy target. *Electronic Materials Letters*, 7(3), 225-230.
- [27] Iljina J., Volobujeva O., Raadik T., Revathi N., Raudoja J., Looirits M., Traksmas R., Mellikov E. 2013. Selenisation of sequentially electrodeposited Cu-Zn and Sn precursor layers. *Thin Solid Films*, 535, 14-17.
- [28] Hong S., Kim C., Park S. C., Rhee I., Kim D. H., Kang J. K. 2012. Characteristics of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Film Formed by Using Co-sputtered Precursors and Selenization. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 565(1), 147-152.
- [29] Suresh Babu G., Kishore Kumar Y. B., Uday Bhaskar P., Sundara Raja V. 2008. Growth and characterization of co-evaporated $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films for photovoltaic applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(20), 205305.
- [30] Jung S., Gwak J., Yun J. H., Ahn S., Nam D., Cheong H., Ahn S., Cho A., Shin K., Yoon K. 2013. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin film solar cells based on a single-step co-evaporation process. *Thin Solid Films*, 535, 52-56.

- [31] Amal M., Kim K. 2012. Optical properties of selenized $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ films from a Cu-Zn-Sn metallic precursor. *Chalcogenide Letters*, 9(8), 345-353.
- [32] Altosaar M., Raudoja J., Timmo K., Danilson M., Grossberg M., Krunk M., Varema T., Mellikov E. 2006. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ monograin powders for solar cell application. *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 7-12 May Waikoloa, HI, USA, 468-470.
- [33] Nagaoka A., Yoshino K., Taniguchi H., Taniyama T., Miyake H. 2012. Growth of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ single crystals from Sn solutions. *Journal of Crystal Growth*, 354(1), 147-151.
- [34] Lee P. Y., Shei S. C., Hsu E. H., Chang S. J., Chang S. P. 2013. Synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ nanocrystals from metal sources using a facile process in isophorondiamine. *Materials Letters*, 98, 71-73.
- [35] Chou C. S., Su F. C., Chen K., Wu P., Tseng C. S. 2014. Thermo-chemistry guided synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compounds using solvo-thermal method. *Advanced Powder Technology*, 25(4), 1285-1291.
- [36] Wibowo R. A., Kim W. S., Lee E. S., Munir B., Kim K. H. 2007. Single step preparation of quaternary thin films by RF magnetron sputtering from binary chalcogenide targets. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 68(10), 1908-1913.
- [37] Djemour R., Redinger A., Mousel M., Gutay L., Fontane X., Izquierdo-Roca V., Perez-Rodriguez A., Siebentritt S. 2013. The three A symmetry Raman modes of kesterite in $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. *Optics Express*, 21(Suppl 4), A695-703.
- [38] Dimitrievska M., Oliva F., Guc M., Giraldo S., Saucedo E., Pérez-Rodríguez A., Izquierdo-Roca V. 2019. Defect characterisation in $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ kesterites via resonance Raman spectroscopy and the impact on optoelectronic solar cell properties. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(21), 13293-13304.
- [39] Rakitin V. V., Novikov G. F. 2017. Third-generation solar cells based on quaternary copper compounds with the kesterite-type structure. *Russian Chemical Reviews*, 86(2), 99-112.
- [40] Mesa F., Leguizamón A., Dussan A., Gordillo G. 2016. Optoelectrical, structural and morphological characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compound used in photovoltaic applications. *Applied Surface Science*, 384, 386-392.
- [41] Kuo S. Y., Lai F. I., Lin K. J., Yang J. F. 2024. Influence of the reaction pathway on the defect concentration of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin film solar cells by manipulation selenization temperature ramping. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00920.
- [42] Zaki M. Y., Sava F., Simandan I. D., Stavarache I., Velea A., Pintilie L. 2025. Optimization of CZTSe Thin Films Using Sequential Annealing in Selenium and Tin-Selenium Environments. *Inorganic Chemistry*, 64(1), 1-10.
- [43] Minnam Reddy V. R., Pallavolu M. R., Guddeti P. R., Gedi S., Bathal Reddy K. K. Y., Pejja B., Kim W. K., Kotte T. R., Park C. 2019. Review on Cu_2SnS_3 , Cu_3SnS_4 , and Cu_4SnS_4 thin films and their photovoltaic performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76, 39-74.
- [44] Liu W. J., Xiong G. X., Wang W. P. 2007. Research on synthesis and conductivity of ferrocenyl Schiff base and its salt. *Applied Organometallic Chemistry*, 21(2), 83-88.
- [45] As D. 1998. Defect related optical and electrical properties of mbe grown cubic GaN epilayers. *Radiation effects and defects in solids*, 146(1-4), 145-160.
- [46] Pankove J.I. 1975. *Optical processes in semiconductors*, Dover Publications, New York, USA 34-36s.
- [47] Cabuk M., Yavuz M., Ibrahim Unal H., Alan Y. 2014. Synthesis, characterization, and enhanced antibacterial activity of chitosan-based biodegradable conducting graft copolymers. *Polymer Composites*, 36(3), 497-509.
- [48] Larbi T., Amara M. A., Ouni B., Amlouk M. 2017. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye under UV-sunlight irradiation by cesium doped chromium oxide thin films. *Materials Research Bulletin*, 95, 152-162.
- [49] Park D., Nam D., Jung S., An S., Gwak J., Yoon K., Yun J. H., Cheong H. 2011. Optical characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ grown by thermal co-evaporation. *Thin Solid Films*, 519(21), 7386-7389.
- [50] Chen L. J., Chuang Y. J. 2013. Diethylenetriamine assisted synthesis and characterization of stannite quaternary semiconductor $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ nanorods by self-assembly. *Journal of Crystal Growth*, 376, 11-16.

Synthesis, Structural Analysis and Comparison with Theoretical Calculations of Heterocyclic Disperse Diazo Dyes

Aykut DEMİRÇALI*

Pamukkale University, Faculty of Science, Department of Chemistry, 20160, Denizli, Türkiye

(Alınış / Received: 28.03.2025, Kabul / Accepted: 21.07.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Azo dye,
Spektral analysis,
Density Functional Theory

Abstract: The interest in azo dyes is increasing in the textile and dye industry. Along with this interest, in addition to experimental studies, quantum mechanical calculations have recently been frequently encountered in the literature. In the content of the study, first of all, three azo dyes are synthesized. Then, the characteristic properties of the compounds are determined experimentally using FT-IR, ¹H-NMR and ¹³C-NMR spectroscopies. Then, the compounds are optimized in the B3LYP/6-311+(d,p) basis set using density functional theory with the Gaussian16 program. Theoretically, FT-IR and ¹H-NMR values are calculated. It is observed that the experimental and theoretical results are compatible. In addition, the electronic properties of the azo dyes are investigated.

Heterosiklik Dispers Diazo Boyalarının Sentezi, Yapısal Analizi ve Teorik Hesaplamalarla Karşılaştırılması

Anahtar Kelimeler

Azo boyarmadde,
Yapı analizi,
Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi

Öz: Azo boyar maddelere olan ilgi tekstil ve boya endüstrisinde giderek artmaktadır. Bu ilgiyle beraber, deneysel çalışmalara ek olarak kuantum mekaniksel hesaplamalara da son zamanlarda literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Çalışmanın içeriğinde öncelikle üç adet azo boyar madde sentezlenmiştir. Devamında bileşiklerin karakteristik özellikleri önce FT-IR, ¹H-NMR ve ¹³C-NMR spektroskopileri kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Sonra Gaussian16 programıyla yoğunluk fonksiyonel teorisi kullanılarak bileşikler B3LYP/6-311G(d,p) baz setinde optimize edilmiştir. Teorik olarak, FT-IR ve ¹H-NMR değerleri hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bunlara ilave olarak, azo boyar maddelerin elektronik özellikleri incelenmiştir.

1. Introduction

Azo dyes are synthetic compounds that have revolutionized industrial dyeing processes and offer a wide range of colors. The main feature of azo dyes is the presence of an azo group (-N=N-) in their molecules. This group acts as a chromophore group that determines the color properties of the dye.

They are produced by chemical processes called diazotization and coupling reactions. These processes involve the reaction of aromatic amines with nitrous acid to form diazonium salts, which are then reacted with other aromatic compounds to form azo dyes [1-3].

Azo dyes are widely used in many sectors such as biochemistry, medicine, food and beverage, pharmaceutical, printing inks, plastics, leather and textile and paint industries due to their high color intensity, vivid and bright colors, wide color range, economical production and suitability for various application methods [4].

Some azo dyes are used in biochemical tests to detect and measure biomolecules such as proteins, enzymes and DNA [5-7] and due to their structure, they can form complexes with metal ions. Thus, they have the ability to change the color properties of the dye and increase the performance of dyes in textile, paint and other industrial applications [8,9].

* Corresponding author: ademircali@pau.edu.tr

These compounds are widely preferred in the textile industry due to their high affinity and good fastness properties in the dyeing of synthetic fabrics such as nylon, polyester and polyamide [10,11]. They are also used in the leather industry in the coloring of leather products. Because they provide deep and permanent colors to leather products and maintain the flexibility and durability of the leather [12,13].

In addition, since they provide vivid and bright colors in printing inks, they are used in printing on various surfaces such as paper, plastic and metal with techniques such as offset printing and digital printing [14,15].

In recent years, theoretical investigations of chemical compounds have considerable attention due to their intriguing electronic and geometric properties, particularly their potential applications [16]. The present study analyzed the molecular structures, vibrational modes, and NMR spectra of disazo dyes 3a–c using quantum chemical methods at the DFT level with the 6-311G(d,p) basis set. The comparison between experimental data and theoretical results plays a crucial role in the accurate assignment and deeper understanding of vibrational and NMR spectra, as well as the molecular structures of these compounds.

In this study, three disperse disazo dyes containing pyrazole and coumarin are synthesized based on aniline, p-chlorine aniline and p-methyl aniline compounds. Then, the structures of the synthesized compounds are elucidated using various spectroscopic methods and compared with theoretical calculations.

2. Material and Method

All consumables used throughout the study are pure and imported products.

The following devices are used in the structural analysis of the obtained dyes and in the necessary spectroscopic analyses, respectively. It is measured melting points in Electrothermal 9100 melting point determination device and elemental analysis in Costech ECS 4010 device. Structure analysis of compounds is analyzed spectrometric methods such as FT-IR analyses in Perkin Elmer Spectrum Two spectrophotometer, ^{13}C and proton NMR spectra in a 400 MHz Varian NMR device.

2.1. Synthesis of (4'-phenylazo-3'-amino-1'H-pyrazol-5'-ylazo)-4-hydroxy coumarin (aa3a)

0.01 mol aniline is dissolved in sufficient amount of HCl. NaNO_2 aqueous solution is added very slowly on this solution and is stirred in an ice bath for 4 hours. Formed the diazonium salt is added to 0.01 mol malononitrile solution prepared in another beaker

and is stirred in an ice bath for another 4 hours. 3,5-diamino-4-phenylazo-1H-pyrazole (aa2a) compound is synthesized [3]. aa2a compound is filtered, is dried and is crystallized in DMSO solvent. Afterwards, aa2a dye is dissolved in 20 ml acetic acid and 20 ml HCl mixture and 0.015 mol NaNO_2 aqueous solution is added and is stirred for 4 hours. At the end of the period, formed the diazonium salt is added to the solution of 0.01 mol 4-hydroxy coumarin formed in NaOH and water mixture and left to stir for another 4 hours. The final product (4'-phenylazo-3'-amino-1'H-pyrazol-5'-ylazo)-4-hydroxy coumarin (aa3a) is filtered, air is dried and is purified in DMSO solvent. Mol. formula: $\text{C}_{18}\text{H}_{13}\text{N}_7\text{O}_3$; Mol. weight: 375 g/mol; Color: orange crystal; Yield: 75 %; mp 333–334 °C. Elemental analysis, Found, %: C: 60.41, H: 3.58, N: 27.39; Calculated, % C: 60.17, H: 3.62, N: 27.30.

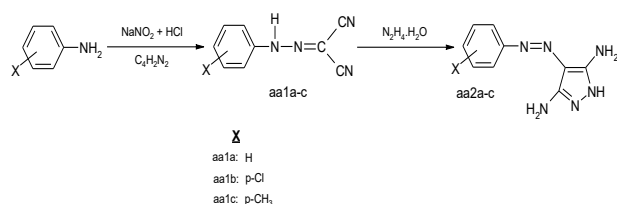
2.2. Synthesis of [4'-(4''-chlorophenyl)azo-3'-amino-1'H-pyrazol-5'-ylazo]-4-hydroxy coumarin (aa3b)

0.01 mol 4-chloro aniline is dissolved in sufficient amount of HCl. NaNO_2 aqueous solution is added very slowly on this solution and is stirred in an ice bath for 4 hours. Formed the diazonium salt is added to 0.01 mol malononitrile solution prepared in another beaker and is stirred in an ice bath for another 4 hours. 3,5-diamino-4-(4'-chlorophenyl)azo-1H-pyrazole (aa2b) compound is synthesized [3]. aa2b compound is filtered, is dried and is crystallized in DMSO solvent. Afterwards, aa2b dye is dissolved in 20 ml acetic acid and 20 ml HCl mixture and 0.015 mol NaNO_2 aqueous solution is added and is stirred for 4 hours. At the end of the period, formed the diazonium salt is added to the solution of 0.01 mol 4-hydroxy coumarin formed in NaOH and water mixture and left to stir for another 4 hours. The final product 4'-(4''-chlorophenyl)azo-3'-amino-1'H-pyrazol-5'-ylazo]-4-hydroxy coumarin (aa3b) is filtered, air is dried and is purified in DMSO solvent. Mol. formula: $\text{C}_{18}\text{H}_{12}\text{N}_7\text{ClO}_3$; Mol. weight: 409.5 g/mol; Color: brown crystal; Yield: 82 %; mp 341–342 °C. Elemental analysis, Found, % C: 54.86, H: 3.11, N: 24.76; Calculated, %: C: 54.89, H: 3.05, N: 24.90.

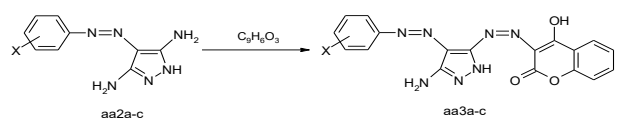
2.3. Synthesis of [4'-(4''-methylphenyl)azo-3'-amino-1'H-pyrazol-5'-ylazo]-4-hydroxy coumarin (aa3c)

0.01 mol 4-methyl aniline is dissolved in sufficient amount of HCl. NaNO_2 aqueous solution is added very slowly on this solution and is stirred in an ice bath for 4 hours. Formed the diazonium salt is added to 0.01 mol malononitrile solution prepared in another beaker and is stirred in an ice bath for another 4 hours. 3,5-diamino-4-(4'-methylphenyl)azo-1H-pyrazole (aa2c) compound is synthesized [3]. aa2c compound is filtered, is dried and is crystallized in DMSO solvent. Afterwards, aa2c dye is dissolved in 20 ml acetic acid and 20 ml HCl mixture and 0.015 mol NaNO_2 aqueous

solution is added and is stirred for 4 hours. At the end of the period, formed the diazonium salt is added to the solution of 0.01 mol 4-hydroxy coumarin formed in NaOH and water mixture and left to stir for another 4 hours. The final product 4'-(4''-methylphenyl)azo-3'-amino-1'H-pyrazol-5'-ylazo]-4-hydroxy coumarin (aa3c) is filtered, air is dried and is purified in DMSO solvent. Mol. formula: $C_{19}H_{15}N_7O_3$; Mol. weight: 388 g/mol; Color: light yellow crystal; Yield: 71 %; mp 322–323 °C. Elemental analysis, Found, % C: 61.22, H: 4.09, N: 26.18; Calculated, %: C: 61.13, H: 4.02, N: 26.27.



Scheme 1. Synthesis of aa2a-c dyes



Scheme 2. Synthesis of aa3a-c dyes

2.4. Theoretical calculations

One of the most successful quantum chemistry tools for describing the ground state properties of chemical compounds is hybrid density functional theory (DFT). Here, the most stable states of the synthesized azo dyes are calculated using DFT and the obtained results are in convincing agreement with the experimental data [17–19]. The molecular structure of the compound are optimized to obtain global minima using the B3LYP/6-311G(d,p) level [20–22]. After that, the same basis set and computational method are used for FT-IR and ^1H -NMR spectra of the compound using the optimized structure. All calculations are performed in the gas phase using the Gaussian 16. Rev. B1 program [23]. GaussView 6.0 is also used for visualization of the structure [24].

3. Results

3.1. Basic properties

The aim of our study is to introduce disperse diazo dyes that can dye nylon and polyester fabrics to the literature for the dye and textile industry. The basic properties of the three synthesized disazo dyes are given in sections 2.1, 2.2 and 2.3. When the results are examined, it is seen that bright colors such as orange, brown and light yellow are obtained. The highest yield is obtained in compound aa3b, while the lowest yield is obtained in compound aa3c. It can be thought that this situation is due to the fact that the chlorine group attached to the phenyl ring facilitates the formation of the diazo compound by withdrawing electrons from

the ring. Similarly, it can be said that the reason for the low yield of compound aa3c is that the methyl group attached to the phenyl ring provides electrons to the ring and makes the formation of the diazo compound difficult.

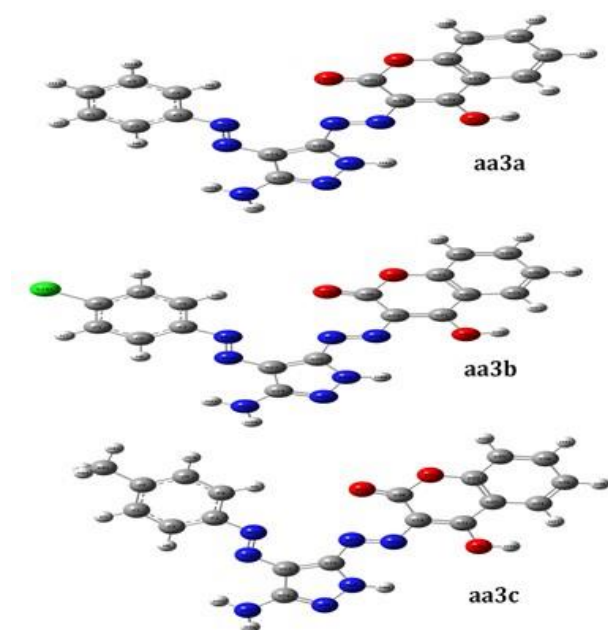
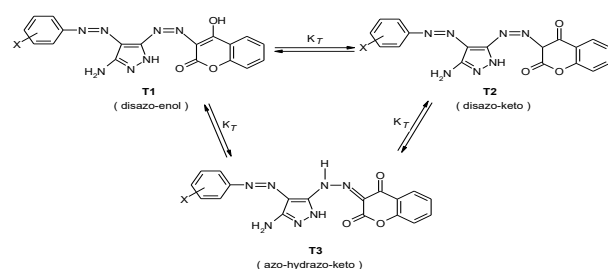


Figure 1. Optimized geometry for aa3a-c compounds calculated at DFT/B3LYP/6-311G(d,p) level.

3.2. Tautomerism

When the structures of aa3a, aa3b and aa3c compounds are examined, it is determined that the dyes could be in 3 different tautomeric forms. These are disazo-keto (T1), disazo-enol (T2) and azo-hydrazo keto (T3) forms. According to FT-IR data, all synthesized dyes are in disazo-keto form, while according to ^1H -NMR data, they are converted to disazo-enol form in DMSO- d_6 .



Scheme 3. Tautomeric structures of aa3a-c dyes

3.3. Structure analysis

FT-IR, ^1H -NMR and ^{13}C -NMR analyses are performed to elucidate the structures of the synthesized compounds. The obtained data are summarized in Table 1, Table 2 and Table 3. In addition, sample spectra of these analyses are shown in Figure 2, Figure 3, Figure 5, Figure 6, Figure 8 and Figure 9. Also, the spectrum showing the correlation calculation of theoretical and experimental data of FT-IR spectroscopy is given in Figure 4.

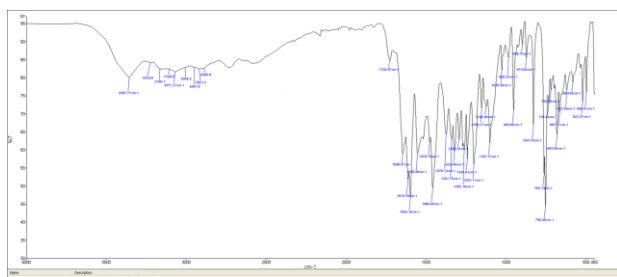
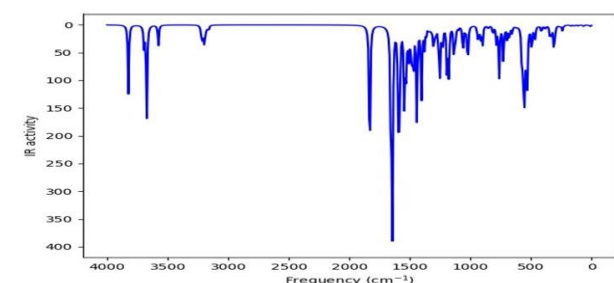
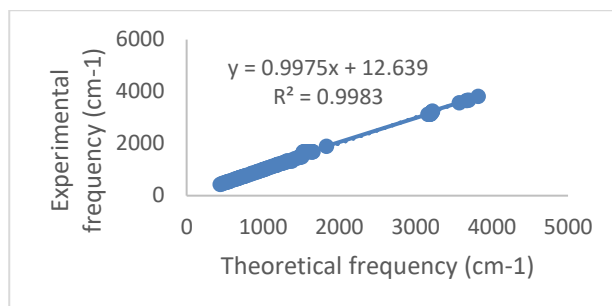
Table 1. FT-IR data for azo dyes aa3a-c

Dye No	aa3a		aa3b		aa3c	
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
VNH ₂	3423	3357	3423	3361	3424	3358
VNH	3272	3224	3271	3283	3274	3241
VAro-H	3159	3166	3157	3141	3165	3184
	3112	3109	3084	3073	3094	3075
	3059	3071				
Valip-H	-	-	-	-	2957	2838
VC=O	1721	1729	1715	1730	1711	1728
	1640	1647	1668	1650	1673	1650
VN=N	1464	1479	1512	1520	1518	1520
	1455	1460	1484	1462	1467	1457
VC-O-C	1237	1203	1238	1204	1233	1204

When Table 1 is examined, two separate -N=N- (azo) peaks were observed in the range of 1457-1520 cm⁻¹ for each dye. Two -C=O (carbonyl) peaks are determined in the range of 1647-1730 cm⁻¹. In addition, -NH₂ peaks are determined in the range of 3357-3361 cm⁻¹ and -NH peaks are determined in the range of 3224-3283 cm⁻¹. The presence of two separate azo and carbonyl peaks in the structural analysis indicates that the synthesized dyes are in the disazo keto (T2) tautomeric form in the solid state.

When the theoretical calculation data are examined, the -N=N- (azo) peaks in the range of 1455-1518 cm⁻¹ and two C=O peaks in the range of 1640-1721 cm⁻¹ show that the compounds are in the disazo keto (T2) form in the theoretical calculations as well as in the experimental results.

Both the experimental results and the theoretical calculations confirm each other.

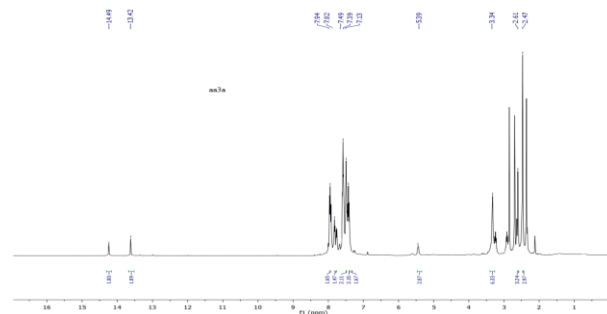
**Figure 2.** FT-IR spectra of aa3a dye.**Figure 3.** The calculated spectra FT-IR of aa3a.**Figure 4.** The correlation graphs between the experimental and calculated frequencies for the dye aa3a.

When ¹H-NMR data of all synthesized compounds are examined, aromatic hydrogen peaks are observed in the range of 7.11-8.11 ppm. Peaks are observed in the range of 12.95-13.42 ppm belonging to the OH group attached to the coumarin compound, in the range of 13.53-14.49 ppm belonging to the NH group attached to the pyrazole ring, and in the range of 5.39-5.48 ppm belonging to the NH₂ group attached to the pyrazole ring. In addition, the aliphatic hydrogen peak belonging to the CH₃ group attached to the phenyl ring in the aa3c compound is observed at the level of 1.17 ppm. Similarly, as a result of theoretical calculations, aromatic hydrogen peaks are observed in the range of 7.88-8.70 ppm, OH peaks in the range of 6.75-6.88 ppm, NH peaks in the range of 9.70-9.82 ppm and NH₂ peaks in the range of 4.91-4.98 ppm.

Both experimental and theoretical results are consistent with each other and show that the synthesized dyes are in disazo enol (T1) tautomeric form in DMSO-d₆ solvent.

Table 2. ¹H-NMR data for dyes aa3a-c

Dye No	aa3a		aa3b		aa3c	
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
Ar-H	7.89-8.70	7.13-7.94	7.88-8.64	7.33-7.84	7.94-8.52	7.11-8.11
Al-H	-	-	-	-	1.93	1.17
O-H	6.88	13.42	6.75	12.95	6.83	13.22
NH	9.70	14.49	9.82	13.53	9.78	13.54
NH ₂	4.91	5.39	4.98	5.48	4.94	5.47

**Figure 5.** ¹H-NMR spectra of aa3a dye.

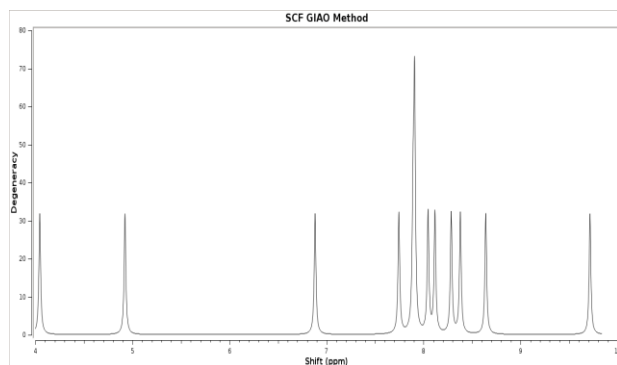


Figure 6. ^1H -NMR calculated spectra of aa3a dye.

Theoretical and experimental ^{13}C -NMR values of the three synthesized compounds are given in the Table 3. It is observed that all results are compatible with the synthesized structures. The numbering of the aa3c dye is given in Figure 7, and the experimental and theoretical carbon NMR spectra of the aa3a dye are given in Figure 8 and Figure 9, respectively.

Table 3. ^{13}C -NMR data for dyes aa3a-c

Carbon number	aa3a		aa3b		aa3c	
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
C13	148.02	175.37	139.54	175.47	139.21	173.65
C19	173.16	163.63	162.66	163.55	161.45	162.66
C21	157.74	153.55	152.22	153.63	152.67	153.52
C18	162.92	152.44	158.17	152.44	158.44	151.30
C1	161.85	151.85	159.73	151.85	139.47	149.39
C10	164.98	145.36	160.98	145.31	160.96	145.31
C9	129.18	131.42	144.26	135.16	143.99	141.29
C6	137.46	130.82	132.58	131.42	132.20	131.45
C17	119.22	129.34	118.45	129.34	118.75	129.34
C24,C25	123.01	124.93	121.69	124.93	121.40	124.85
C4,C5	134.65	123.66	125.95	123.65	126.28	123.60
C22,C23	130.40	122.35	121.52	122.66	120.86	122.24
C2,C3	116.45	118.94	106.17	118.86	106.09	118.88
C16	127.06	114.02	128.03	114.42	128.01	114.55
C26	-	-	-	-	35.23	22.14

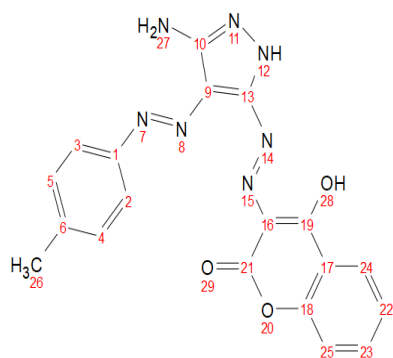


Figure 7. Numbering of atoms of aa3c dye.

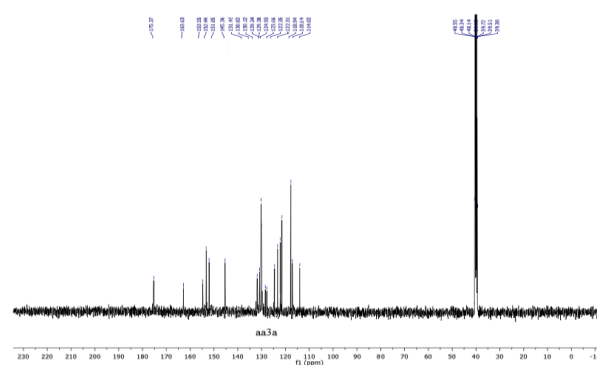


Figure 8. ^{13}C -NMR spectra of aa3a dye.

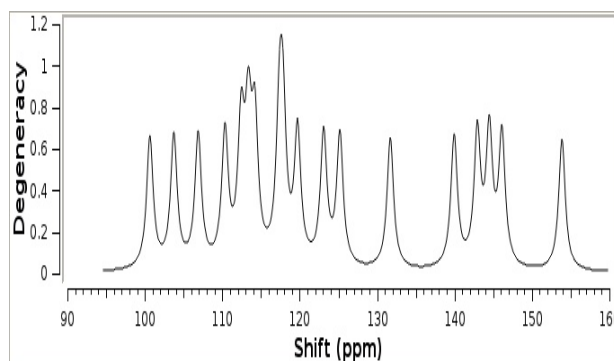


Figure 9. ^{13}C -NMR calculated spectra of aa3a dye.

3.4. Molecular electrostatic potential

The molecular electrostatic potential (MEP) at any given point around a molecule offers valuable insights into the net electrostatic effects present at that location, which arise from the complex charge distribution within the molecular system. This electrostatic profile is essential for predicting the molecule's reactivity [25,26]. The MEP surface, defined by an electron density isosurface has been carefully plotted over the optimized geometry of the cluster systems, as depicted in Figure 10. This visualization facilitates a detailed analysis of the underlying electrostatic characteristics and interactions.

As illustrated in Figure 10, this region demonstrates a high electron density attributed to the two azo groups linked to the pyrazole ring, along with the electronegative oxygen atoms present in the coumarin ring of the aa3a-c dyes. Furthermore, proton density is observed on the side of the ring that is distant from the oxygens, a consequence of the presence of these electronegative oxygen atoms in the coumarin ring.

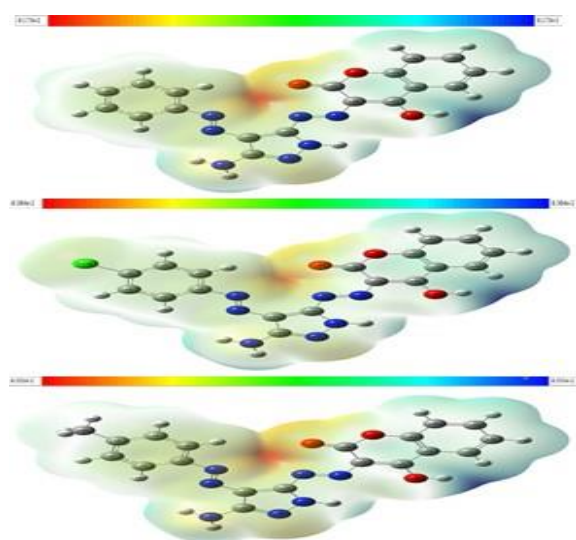


Figure 10. MEP of aa3a-c

3.5. Electronic properties

The HOMO-LUMO energy gap is an important indicator of a molecule's chemical reactivity. A smaller energy gap is indicative of lower kinetic stability in the molecule. This separation of HOMO and LUMO energies is a result of significant intermolecular charge transfer between electron donor groups and electron acceptor groups via π -conjugated pathways [27]. Furthermore, the HOMO-LUMO energy gap can also provide insights into the bioactivity associated with intramolecular charge transfer. The calculated electronic parameters for aa3a-c are presented in Table 4. HOMO-LUMO orbitals of aa3a-c dyes are given in Figure 11.

As shown in Table 4, the dye with the lowest chemical hardness is aa3a and the dye with the highest chemical softness is again aa3a. Similarly, the electron affinity and electronegativity of the aa3c dye were the highest, while this value was the lowest for the aa3b dye. These results are thought to be due to the chlorine withdrawing electrons from the ring and the methyl group donating electrons to the ring.

Table 4. Electronic properties of aa3a-c

Parameters	aa3a	aa3b	aa3c
E_{LUMO} (eV)	-5.52	-5.62	-5.81
E_{HOMO} (eV)	-3.02	-3.07	-3.22
$\Delta E = E_{\text{LUMO}} - E_{\text{HOMO}}$ (eV)	2.50	2.55	2.59
I (ionization potential) (eV)	5.52	5.62	5.81
A (electron affinity) (eV)	3.07	3.02	3.22
χ (electronegativity) (eV)	4.35	4.27	4.52
η (global hardness) (eV)	1.25	1.30	1.28
S (global softness) (eV^{-1})	0.80	0.78	0.77
μ (electronic chemical potential) (eV)	-4.27	-4.35	-4.51
ω (global electrophilicity index) (eV)	7.31	7.41	7.87

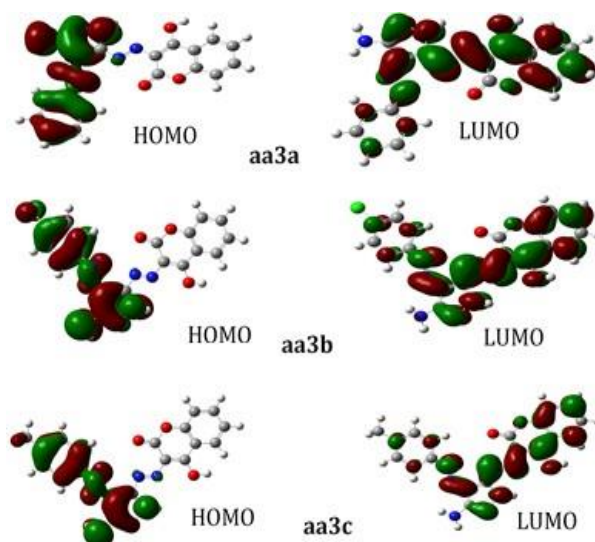


Figure 11. HOMO-LUMO orbitals for aa3a-c

As shown in Figure 11, the delocalization in the phenyl ring causes the HOMO orbitals to be concentrated in this area, while the LUMO orbitals are spread throughout the molecule.

4. Discussion and Conclusion

In our study, it is aimed to synthesize 3 heterocyclic disperse diazo dyes capable of dyeing nylon and polyester fabrics and to introduce them to the dye and textile industry. The fact that we obtain high yield products and that the end products are bright and vibrant in color confirms the content of our work.

In the continuation of the study, the structural properties of the dyes are examined and the experimental data are compared with the theoretical calculations. It is seen that the results of these comparisons are compatible with each other.

The fact that the compounds exhibit tautomeric properties and can transform from disazo-keto form in solid state to disazo-enol form in solvent shows that they may have different solubility properties. Control of the tautomeric balance can provide better binding of the dye to the target material (textile, polymer etc.) and more homogeneous distribution.

In addition, these different forms absorb light at different wavelengths, providing a wide range of colors. The change in tautomeric balance depending on environmental conditions (pH, solvent, temperature, etc.) allows the color to be adjusted and modified. This property is especially important for applications such as sensors and smart textiles.

The two azo groups linked to the pyrazole ring combined with the electronegative oxygen atoms in the coumarin ring, exhibit substantial electron density, characterizing this region as nucleophilic. In

contrast, the electrophilic area situated on the side of the rings opposite the oxygens also displays significant proton density.

In addition, electronic parameters such as hardness, softness, electron affinity, and electrophilicity index were calculated using density functional theory with values suitable for the structural properties of the synthesized aa3a-c dyes.

Based on these values, the structure with the highest electron acceptability, or the greatest tendency to attract electrons, is aa3c. Although there are minor differences, aa3a is softer than the other compounds and can be more easily polarized.

Acknowledgment

This scientific study is financially supported by Pamukkale University Scientific Research Projects Coordination Unit (grant no: 2018HZIP019). I would like to thank Fikret Karıcı and Gülnihal Erten for their support during this study. Also, I thank the TUBITAK/ULAKBIM clusters for their assistance in performing some computations on the Gaussian method.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Said Benkhaya, Souad M'rabet, Ahmed El Harfi. 2020. Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon*, 6, e03271.
- [2] L. Abd-Alredha, R. Al-Rubaie and R. Jameel Mhessn. 2012. Synthesis and Characterization of Azo Dye Para Red and New Derivatives, *e-Journal of Chemistry*, 9(1), 465-470.
- [3] Aykut Demirçali, Adile Sarı. 2024. Five new heterocyclic disazo dyes derived from the 4-position: Synthesis, characterisation, and acute toxicity evaluation, *Journal of Molecular Structure*. 1313, 138707.
- [4] V. Selvaraj, T. Swarna Karthika, C. Mansiya, M. Alagar. 2021. An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications, *Journal of Molecular Structure*. 1224, 129195.
- [5] Ehsan Ullah Mughal, Qandeel Alam Raja, Abdullah Yahya Abdullah Alzahrani, Nafeesa Naeem, Amina Sadiq, Ebru Bozkurt. 2023. Pyrimidine-based azo dyes: Synthesis, photophysical investigations, solvatochromism explorations and anti-bacterial activity, *Dyes and Pigments*. 220, 111762.
- [6] Kamallesh Verma, Gundappa Saha, Lal Mohan Kundu, Vikash Kumar Dubey. 2019. Biochemical characterization of a stable azoreductase enzyme from *Chromobacterium violaceum*: Application in industrial effluent dye degradation, *International Journal of Biological Macromolecules*. 121, 1011-1018.
- [7] Ozge Surucu, Serdar Abaci. 2018. Characterization and application of azo dye (E)-N-phenyl-4-(thiazole-2-yl-diazenyl)aniline (PDA) for biomedical sterilization, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 77, 408-413.
- [8] Durga Prasad Mishra, Prafulla Kumar Sahu, Biswajeet Acharya, Satya Prasad Mishra, Seturam Bhati. 2024. A review of the synthesis and application of azo dyes and metal complexes for emerging antimicrobial therapies, *Results in Chemistry*. 10, 101712.
- [9] Omer Kayir, Sevil Ozkinali. 2025. Synthesis, spectroscopic characterization and dyeing properties of new metal complexed azo dyes derived from gallic acid, *Journal of Molecular Structure*. 1327, 141144.
- [10] M.A. Castro, F.J. Pereira, A.J. Aller, D. Littlejohn. 2020. Raman spectrometry as a screening tool for solvent-extracted azo dyes from polyester-based textile fibres, *Polymer Testing*. 91, 106765.
- [11] Alaa Z. Omar, Sara I. Nabil, Ezzat A. Hamed, Hussam Y. Alharbi, Majed S. Aljohani, Mohamed A. El-Atawy. 2025. Synthesis, characterization, and color performance of bis-azo and bis-pyrazole derivatives for dyeing of polyester, *Journal of Molecular Structure*. 1322, 140474.
- [12] Ghulam Shabir, Jiawan Su, Aamer Saeed, and Anwar Ul-Hamid. 2021. New Heterocyclic Azo Dyes: Design, Synthesis, and Application on Leather, Fibers and Polymers. Vol.22, No.12, 3385-3392.
- [13] Ghulam Hussain, Makshoof Ather, Misbah Ul Ain Khan, Aamer Saeed, Rashid Saleem, Ghulam Shabir, Pervaiz Ali Channar. 2016. Synthesis and characterization of chromium (III), iron (II), copper (II) complexes of 4-amino-1-(p-sulphophenyl)-3-methyl-5-pyrazolone based acid dyes and their applications on leather, *Dyes and Pigments*. 130, 90-98.

- [14] H. Motiei, A. Jafari, R. Naderali. 2017. Third-order nonlinear optical properties of organic azo dyes by using strength of nonlinearity parameter and Z-scan technique, *Optics & Laser Technology*. 88, 68–74.
- [15] Rana Forsati, Sara Valipour Ebrahimi, Keivan Navi, Ezeddin Mohajerani, Hossein Jashnsaz. 2013. Implementation of all-optical reversible logic gate based on holographic laser induced grating using azo-dye doped polymers, *Optics & Laser Technology*. 45, 565–570.
- [16] C. Karaca, A. Atac, M. Karabacak. 2015. Quantum chemical calculation (electronic and topologic) and experimental (FT-IR, FT-Raman and UV) analysis of isonicotinic acid N-oxide *Spectrochim. Acta A* 140, 85–95.
- [17] Cramer, C.J., Truhlar, D.G. 2009. Density functional theory for transition metals and transition metal chemistry *Phys. Chem. Chem. Phys.* 11, 10757–10816.
- [18] Tachibana, M., Tanak, S., Yamashita, Y. Yoshizawa, K. J. 2002. Small Band-Gap Polymers Involving Tricyclic Nonclassical Thiophene as a Building Block. *Phys. Chem. B*. 106, 3549–3556.
- [19] Pai, C.-L., Liu, C.-L., Chen, W.-C., Jenekhe, S.A. 2006. Electronic structure and properties of alternating donor-acceptor conjugated copolymers: 3, 4-Ethylenedioxythiophene (EDOT) copolymers and model. *Polymer*. 47, 699–708.
- [20] Zade, S.S., Bendikov, M. 2006. From Oligomers to Polymer: Convergence in the HOMO–LUMO Gaps of Conjugated Oligomers *Org. Lett.* 8, 5243–5246.
- [21] Becke, A.D. 1988. Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior *Phys. Rev. A*. 38, 3098–3100.
- [22] Lee, C., Yang, W., Parr, R.G. 1988. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density. *Phys. Rev. B*. 37, 785–789.
- [23] Frisch, M.J., Trucks, G.W., Schlegel, H.B., Scuseria, G.E., Robb, M.A., Cheeseman, J.R.; Scalmani, G.; Barone, V.; Petersson, G.A.; Nakatsuji, H.; Li, X.; Caricato, M.; Marenich, A.V.; Bloino, J., Janesko, B.G., Gomperts, R., Mennucci, B., Hratchian, H.P., Ortiz, J.V., Izmaylov, A.F., Sonnenberg, J.L., Williams-Young, D., Ding, F., Lipparini, F., Egidi, F., Goings, J., Peng, B., Petrone, A., Henderson, T., Ranasinghe, D., Zakrzewski, V.G., Gao, J., Rega, N., Zheng, G., Liang, W., Hada, M., Ehara, M., Toyota, K., Fukuda, R., Hasegawa, J., Ishida, M., Nakajima, T., Honda, Y., Kitao, O., Nakai, H., Vreven, T., Throssell, K., Montgomery Jr., J.A., Peralta, J.E., Ogliaro, F., Bearpark, M.J., Heyd, J.J., Brothers, E.N., Kudin, K.N., Staroverov, V.N., Keith, T.A., Kobayashi, R., Normand, J., Raghavachari, K., Rendell, A.P., Burant, J.C., Iyengar, S.S., Tomasi, J., Cossi, M., Millam, J.M., Klene, M., Adamo, C., Cammi, R., Ochterski, J.W., Martin, R.L., Morokuma, K., Farkas, O., Foresman, J.B., Fox, D.J. 2016. *Gaussian 16*, Revision B.01, Gaussian, Inc., Wallingford CT.
- [24] Dennington, R. Keith, T., Millam, J. *GaussView*, Version 6. Semichem Inc., Shawnee Mission, KS, 2016.
- [25] Moskovits, M., DiLella, D.P. 1980. Surface-enhanced Raman spectroscopy of benzene and benzene-d6 adsorbed on silver. *J. Chem. Phys.* 73, 6068–6075.
- [26] Moskovits, M., DiLella, D.P., Maynard, K.J. 1988. Surface Raman spectroscopy of a number of cyclic aromatic molecules adsorbed on silver: selection rules and molecular reorientation. *Langmuir* 4, 61–76.
- [27] Diwaker and Abhishek Kumar Gupta, 2014. Quantum Chemical and Spectroscopic Investigations of (Ethyl-4-hydroxy-3-((E)-(pyrenylimino) methyl) benzoate) by DFT Method, *International Journal of Spectroscopy*, 841593, 15.

Development of a System for Translating Frequently Used Turkish Sign Language Words into Text for Deaf or Hard of Hearing Individuals

Ayşe Nur AY GÜL^{*1}, Nazife Nur ATUKEREN², Ahmet Orkun ÖVİÇ², Nuriye SIRMALI²

^{*1} Biomedical Technologies Application and Research Center (BIYOTAM),
Sakarya University of Applied Sciences, 54050, Sakarya, TURKEY

² Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering,
54050, Sakarya, Türkiye

(Alınış / Received: 25.02.2025, Kabul / Accepted: 23.07.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Communication,
Deaf or Hard of Hearing
individuals,
Turkish Sign Language,
Text Conversion

Abstract: Communication involves exchanging emotions, thoughts, and information through verbal and non-verbal methods. Sign language, used by individuals who are Deaf or Hard of Hearing, relies on gestures and facial expressions. It is not universal; different countries have distinct versions. Each sign consists of three components: hand shape, position, and movement. This study develops a system to recognize and convert frequently used Turkish Sign Language (TSL) words into text. Using an image processing algorithm and the YOLOv8 machine learning model, the system detects and translates 20 common words collected from 12 participants. The model achieved a 99.4% accuracy rate, proving its effectiveness in real-world conditions. This system enhances daily interactions for Deaf or Hard of Hearing individuals, providing an accessible communication tool. The findings may contribute to assistive technology, improving inclusivity and facilitating smoother interactions in various social settings.

İşitme Engellilere Yönelik Türk İşaret Dilinin En Çok Kullanılan Kelimelerini Yazıya Çeviren Sistem Tasarımı

Anahtar Kelimeler

İletişim,
İşitme engelliler,
Türk işaret dili,
Yazıya dönüştürme

Öz: İletişim, bireyler arasında duyguların, düşüncelerin ve bilgilerin sözlü ve sözsüz yöntemlerle aktarılmasını içerir. İşaret dili, işitme engelli veya sağır bireyler tarafından kullanılan ve jestler ile yüz ifadelerine dayanan bir iletişim biçimidir. Evrensel bir sistem olmayıp, farklı ülkelerde farklı versiyonları bulunmaktadır. Her işaret, el şekli, el konumu ve el hareketi olmak üzere üç bileşenden oluşur. Bu çalışma, yaygın olarak kullanılan Türk İşaret Dili (TİD) kelimelerini tanıyarak metne dönüştüren bir sistem geliştirmektedir. Görüntü işleme algoritması ve YOLOv8 makine öğrenme modeli kullanılarak, 12 katılımcıdan toplanan 20 temel kelimenin tespiti ve çevirisi gerçekleştirilmiştir. Model, 99.4% doğruluk oranına ulaşarak gerçek dünya koşullarında etkinliğini kanıtlamıştır. Bu sistem, işitme engelli bireyler için günlük etkileşimleri kolaylaştırarak erişilebilir bir iletişim aracı sunmaktadır. Bulguların, destekleyici teknolojilere katkı sağlayarak kapsayıcılığını artıracığı ve bireylerin sosyal etkileşimlerini iyileştireceği ön görülmektedir

1. Introduction

The Latin word for communication is "communico", which means "to share, to associate". Communication is one of the most important and basic needs of human beings since the creation of humankind. The pictures drawn on cave walls, the sounds made by African natives, the smoke emitted by Indians by lighting a fire are primitive methods used by humans to communicate [1].

Communication, which refers to the exchange of feelings, thoughts, information and news between people, takes place in various forms and methods. This complex process involves the mutual exchange of information and emotions and is not limited to words. It also aims to establish cross-cultural connections, express emotions and share thoughts. Communication is not only the exchange of information, but also a profound form of interaction that enables people to

* Corresponding author: ay@subu.edu.tr

connect, understand and empathize with each other. It can basically be divided into two main groups: verbal and non-verbal communication.

Verbal communication refers to the type of communication that is constantly established in daily life. Verbal communication, which takes place through speech and language use between people, is used to express feelings, thoughts and information. Table 1 shows the most commonly used words in daily life.

Non-verbal communication is a form of communication that does not use words, such as body language, gestures and facial expressions, but is effective in conveying feelings, intentions and thoughts. Non-verbal communication is as important as verbal communication and can sometimes mean more than words. The subtleties of body language, the meanings of gestures and the emotions expressed by facial expressions can add depth to communication. Communication is the basis of interaction between people.

Using verbal and non-verbal means of communication effectively can increase understanding, strengthen relationships and contribute to mutual understanding. The most preferred type of communication between people is verbal communication. However, individuals with hearing impairment cannot fully utilize verbal communication. Hearing impairment can be congenital or acquired as a result of factors such as illness or accident. Individuals with hearing loss who use hearing aids or cochlear implants generally prefer auditory-verbal communication, while individuals with hearing loss who are diagnosed late and therefore cannot develop speaking skills tend to use sign language [2].

This study focuses on understanding the difficulties in the daily lives of hearing impaired individuals and developing solutions to overcome these difficulties. Since hearing impairment manifests itself in daily interactions as well as communication barriers in social interactions, the aim of this study is to provide a more effective communication experience for hearing impaired individuals by overcoming these barriers. Another goal of this study is to facilitate the communication of individuals with hearing impairment with the society and to support their social lives. The basis of this research is a system that can recognize the most frequently used words of sign language. This system aims to detect the words of sign language through an image processing algorithm and convert them into text. In this way, hearing impaired individuals can communicate effectively and interact more easily with their environment.

Table 1. Common words that used in Turkish Language (TR-EN)

Anne (Mother)	Dinlenmek (Resting)	İyi (Good)	Saat (Clock)	Yarın
Araba (Car)	Dost (Mate)	Kardeş (Brother)	Sabah (Morning)	Yemek (Eating)
Arkadaş (Friend)	Dur (Stop)	Kısa (Short)	Sen (You)	
Az (Less)	Ev (Home)	Kötü (Bad)	Sonra (After)	
Baba (Father)	Evet (Yes)	Merhaba (Hello)	Şimdi (Now)	
Bebek (Baby)	Fazla (Much)	Nasıl? (How?)	Tamam (Okey)	
Ben (Me)	Gece (Night)	Nasılın? (How are you?)	Telefon (Phone)	
Bir (One)	Geri (Back)	Ne zaman? (When?)	Teşekkürler (Thanks)	
Bugün (Today)	Hayır (No)	Nerede? (Where?)	Tuvalet (Toilet)	
Çay (Tea)	İçmek (Drinking)	Önce (Before)	Türkçe (Turkish)	
Destek (Support)	İleri (forward)	Özür dilemek (Sorry)	Uzun (Long)	
Dikkat (Attention)	İletişim (Communication)	Para (Money)	Yardım (Help)	

2. Material and Method

Under this heading, we will first refer to some previous studies. Then, after providing a general overview of the study, we will discuss the processes step by step.

2.1. Related work

The first studies for image processing-based recognition of sign languages were carried out in the mid-1990s. In one of these studies, Starner worked on sign language recognition using a simple camera. The hands were segmented in the images taken from the motion sensor and feature vectors containing the positions of the hands were generated with Markov models, thus performing sign recognition. In this study, a success rate of over 90% was achieved for 40

words. Starner also presented a wearable computer capable of sign language recognition. In this study, a camera placed on a hat was used to recognize images of hand gestures using features such as shape and position. For performance measurement, a 40-word sign data set of American Sign Language (ASL) was used and a 99% success rate was achieved [3].

In order to facilitate the communication of the hearing and speech impaired, the study conducted by Tonjih Tazalli et al. focused on the understanding of sign language at the word level and stated that a database should be created to recognise words in Bangla sign language. While most existing studies have focussed on alphabets or numerical expressions, the focus of this study was on Bangla word signs. Sign language recognition usually involves isolated and continuous scenarios. This study focused on the isolated scenario, i.e. only one sign language word was recognised in each video. A video classification model was developed using technologies such as PyTorch and YOLOv5. An accuracy rate of 76.29% was achieved on the training dataset and 51.44% on the test dataset [4].

In the study titled "Turkish Sign Language Word Translator with Microcontroller Systems", it is aimed to facilitate communication between speech impaired individuals and the society. In the proposed method, microcontroller (Arduino), display unit (LCD Panel) and flex, acceleration and gyro sensors are used. A special glove was developed for the modeling process of the words. Thanks to the sign language interpreter glove, it is aimed to provide communication between disabled and non-disabled individuals. When a disabled person shows the word in sign language by wearing the sign language translator glove, the data from the five flex, acceleration and gyro sensors on the glove are transferred to the microcontroller. Based on this data, the microcontroller determined the meaning of the sign and displayed it in written form on the display unit. Turkish sign language was used in the study. In order to determine the meaning of a sign language gesture, eleven data obtained by performing selected sign language gestures using gloves were recorded. These data obtained for each sign language gesture were used in the program running on the microcontroller to classify the signs [5].

The study conducted by Kustiawanto Halim et al., The Sign Language System for Bahasa Indonesia, called Sistem Isyarat Bahasa Indonesia (SIBI), follows the grammatical structure of Indonesian, which has made it a unique and complex system. SIBI has enabled the translation of the alphabet, root words and numbers into text. Current research is focused on recognizing reflective words, which includes combinations of prefixes, suffixes and suffixes of root words. Root words were separated and processed with minimal feature sets. SIBI includes time dependencies in the sequence data, so Long Short Term Memory (LSTM) was chosen as the machine learning model. Feature

sets based on inflected word movements in SIBI were used as input. TensorFlow was used so that the model can be easily deployed on various devices. The best results were obtained using the 2-layer LSTM with 96.15% accuracy for root words (nominative), while the same model achieved an accuracy score of 78.38% for inflected words. However, the model struggled to correctly recognize prefixes and suffixes [6].

In the work carried out by Luis A. et al. an intelligent system for translating sign language into text is proposed. The proposed approach consists of hardware and software components. The hardware consists of a flexible polyester-nylon glove equipped with contact and inertial sensors. The software consists of a classification algorithm based on k-nearest nearest neighbours (k-NN), decision trees (DT) and dynamic time warping (DTW) algorithms. The proposed system was able to classify certain gesture patterns by recognising static and dynamic gestures. The system was tested for the translation of 61 letters, numbers and words from Ecuadorian sign language with a classification accuracy of 91.55%. This result is considered as a significant improvement compared to previous studies [7].

A study conducted by Jose L. et al. discussed an approach to capturing isolated gestures of American Sign Language and translating them into oral and written words. The general sign recognizer was tested using a subset of 30 single-handed characters in the American Sign Language Dictionary and achieved 98% accuracy. The system has proven to be scalable: when the dictionary is extended to 176 characters and tested without re-training, the accuracy is 95%. This represents an improvement over classification based on hidden Markov models (HMMs) and neural networks (NNs) [8].

Karaca developed an application that simulates Turkish content in Turkish Sign Language (TSL) using a 3D virtual model. Signs were represented by positional and/or angular changes at the joint points of the model. The curricula of the Primary School for the Deaf were examined and a data set with three compilations was created for use in the study. The first corpus contained 400 words for 21 themes in the first grade of the TSL course. The second corpus included 130 sentences for 9 themes for the second grade of the same course. The third corpus included 100 sentences for 4 themes for the Turkish course. In addition to the content in the corpora, the developed application also includes TSL-specific elements such as hand shapes and non-hand signs and interactive translation modules. There are two phases in the application: natural language processing and Turkish Sign Language (TSL) simulation. Intermediate texts of sentences were obtained before simulation with the rules determined based on natural language processing analysis. The intermediate texts were converted into TSL text on the application screen and

simulated. In addition to the data obtained as a result of the analysis of corpora with natural language processing techniques, data on TSL, signs, and model joint points and hand movements used in sign representations are presented in detail [9].

Much research in the field of sign language aims to improve the quality of life of hearing impaired individuals. In this context, our current study focuses on the analysis of Turkish Sign Language (TSL) vocabulary. Previous studies on Turkish Sign Language (TSL) such as "Turkish Sign Language Translation" [10], "Turkish Sign Language Review: Communication and Grammar" [11], "The Language of Silence: Observations on Turkish Sign Language" [12], "A Study on Classifiers in Turkish Sign Language" [13] and "The Historical Adventure of Sign Language and Turkish Sign Language" [14], but there is no study on the analysis of Turkish words and transcription of these words in the literature.

The aim of this study is to convert the correspondence of these words into real-time text with a high degree of accuracy, by selecting Turkish words that are commonly used in everyday life. This transformation has ensured the effective translation of the sign language equivalents of the most common words in the TSL, using image processing techniques. The stages of this work include data set creation, data set classification, data sets training, algorithm creation using the model obtained, interface design, and system integration.

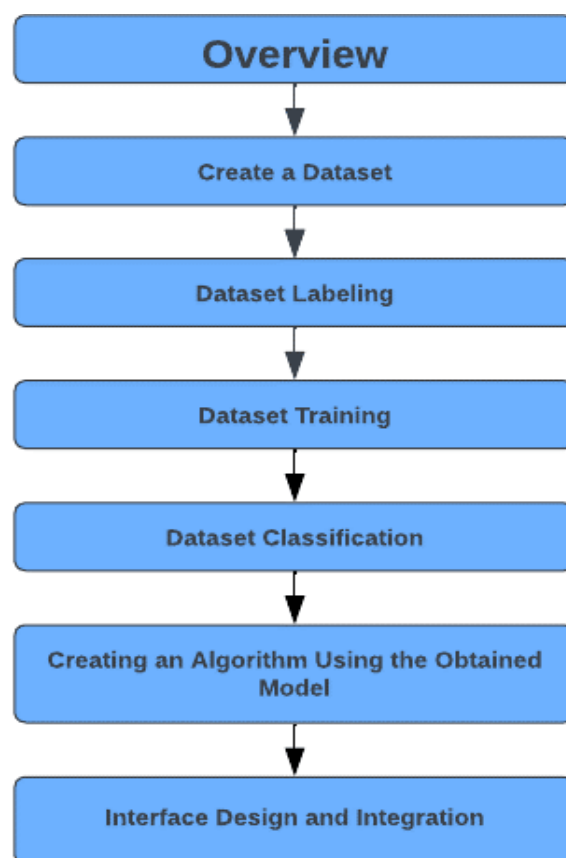
2.2. Overview

This section describes the headings on which the work was carried out, as shown in Figure 1. The titles describe how to create a data set, classify and train data sets, build algorithms based on trained models, and design a user-friendly interface.

It has identified what characteristics the study needs to enable people with hearing impairments to communicate more effectively. This includes defining functional properties such as sign language recognition, sign perception, text conversion, real-time translation. It is important to create an easy-to-use, understandable and accessible interface for users. The choice of colors, fonts, icons and menus will be taken into account for the availability and comprehensibility of hearing impaired persons.

In this context, the study will be designed in QtDesigner environment. While determining the design needs, the study will aim to provide a user-oriented and functional solution, improve the daily life of hearing impaired individuals and provide them with a more effective communication experience. The focus is on understanding the communication difficulties of hearing impaired individuals in their daily lives and improving these experiences. In this framework, a user-centered and functional approach

was adopted in determining the design needs, thus better understanding the needs of hearing impaired individuals and increasing the effectiveness of the study. Experiments and feedback during the prototype phase are crucial for the development of the system and the elimination of deficiencies. User feedback was taken into consideration to help the



system better meet user needs.

Figure 1. Block diagram of the study

2.3. Dataset

Turkish Sign Language consists of 2.000 words/concepts in its current form. It is formed by the use of both hands and their positions. As a first priority, the study area was determined by selecting the 20 most frequently used words/concepts in daily life within the scope of creating a data set. In this context, data ranging from 450 to 550 were collected from 1 person for each word, 12 people in total. Ethics committee approval was obtained for the data collection steps for this study (E-26428519-050.99-133710). The strength of the data set was ensured by creating background diversity [15,16]. The data of the collected words/concepts are shown in the Figure 2 below.

After selecting the words/concepts to be used, data set creation methods were discussed. Basically, an algorithm containing the requirements was created. The algorithm was designed to be usable in many environments (Google Colab, local computer, Roboflow, etc.). This usability can be explained by the

fact that the images are saved in .txt format along with their labels. This method has added flexibility to the work. Figure 3 shows the data set algorithm. As a result of the designed algorithm, the data set creation code was written in Python. Running the code produced data with a resolution of 640x480.

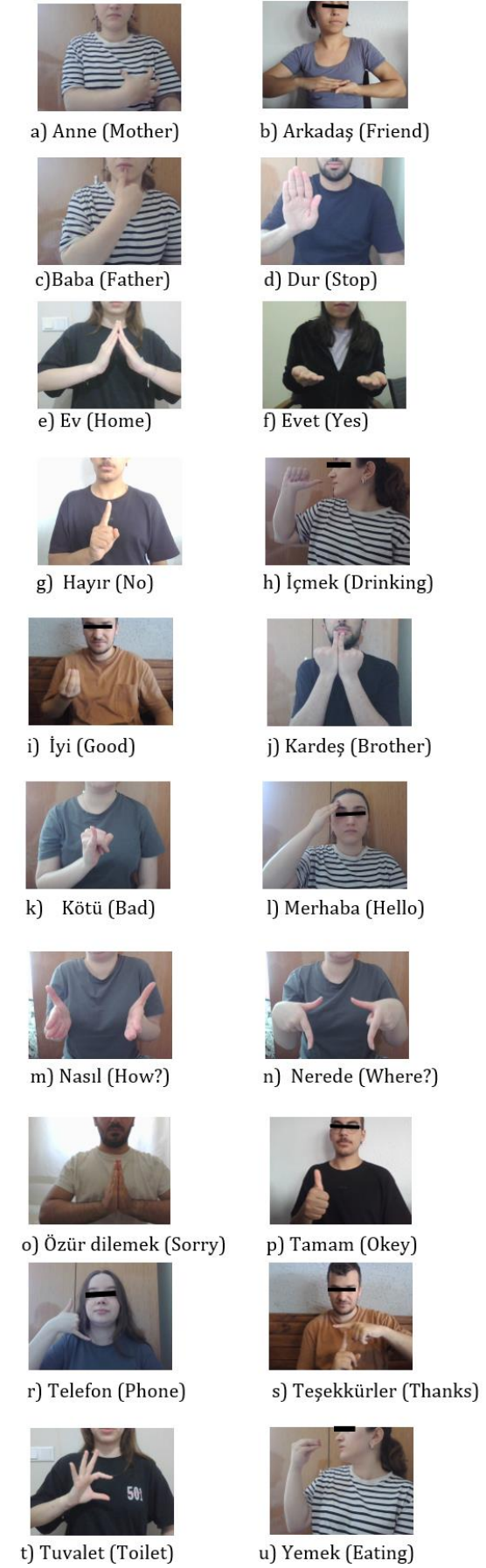


Figure 2. Collected words for the study

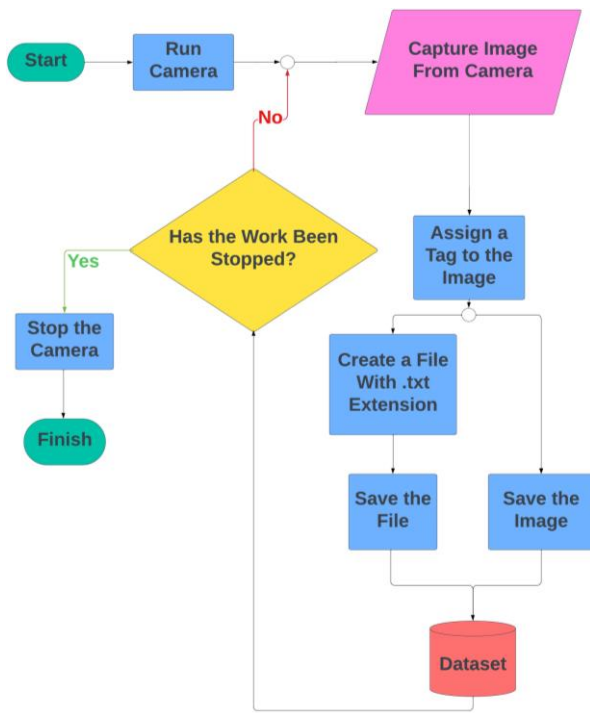


Figure 3. Flowchart of the data collection

2.4. Labeling of the dataset

Evaluations were conducted between Google Colab, Roboflow, and local computer options to train the created data set. Pit detection using Roboflow Convolutional Neural Networks [17] was performed by D. Deepa, A. Sivasangari, Rahul Roonwal, and Rajeev Nayan in 2023 [18], Vasudevan, H. Matuck et al. in 2024 [19], and the implementation of an enhanced security system using the YoloV8 model via RoboFlow by Pavithra, M. Brucal et al. in 2024 [20], The high accuracy of these studies and the recognition study conducted by Guilherme Rodrigues Matucks et al. in 2023 [21] led to the real-time detection of objects by Roboflow. Additionally, its suitability for teamwork via the cloud, ease of augmentation application, and ability to present training outputs in graphical form provide significant convenience in processes. In this regard, it was decided to provide training through Roboflow. The data was then labelled in the Roboflow environment as shown in Figure 4. The labels created during the data set creation phase were retained for future use.

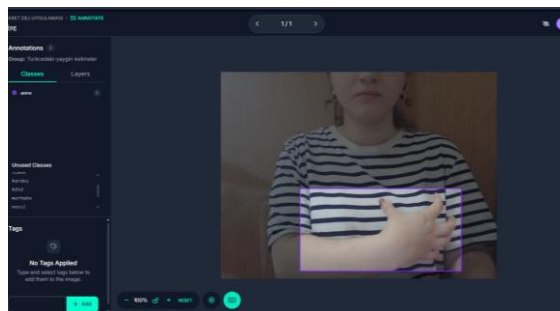


Figure 4. Labeling process of the study

The words/concepts labelled in the Roboflow environment were subjected to data partitioning. The data was divided into three data sets: training, validation, and testing. The training data set is the data set that contains the most data and is used to perform the basic training of the model. This data set is used to test model algorithms and select the best algorithm. The validation dataset is used to evaluate the results obtained during the model's learning process. The test dataset tests how the model performs in the real world. In this process, the learned model is used on the training dataset, and predictions are compared with real data. As a result, the model's performance is evaluated using accuracy metrics such as the accuracy rate.

The efficiency of our dataset is divided by the globally accepted ratio of 70% Training, 20% Validation and 10% Testing as indicated in Figure 5.



Figure 5. Training, Validation and Testing separation

In the final stage before training the dataset, various augmentations were added. These included a 15% greyscale application, blurring up to 2.5 pixels, and artificial noise such as saturation between -25% and +25%. This noise focuses particularly on colour and blurring factors. Colour noise aims to diversify the dataset by randomly changing the colour values of pixels. This allows the model to better adapt to different colour tones and lighting conditions. Blur noise simulates various real-world conditions by reducing the sharpness of images. This ensures that the model performs well even with blurry or low-quality images. As a result, these artificial noises enhance the power of the dataset, making the model more generalised, better adapted to real-world data, and preventing potential overfitting [22].

The training of the model will be done with 300 repetitions (epochs) in a way that the accuracy of the model will be strong [23, 24]. In this way, it will be seen that the "Box Loss" in Figure 6, "Class Loss" in Figure 7 and "Object Loss" in Figure 8 are significantly improved.

"Box Loss" is a loss function used in object detection and segmentation tasks. This function is especially used in pixel-based segmentation algorithms.

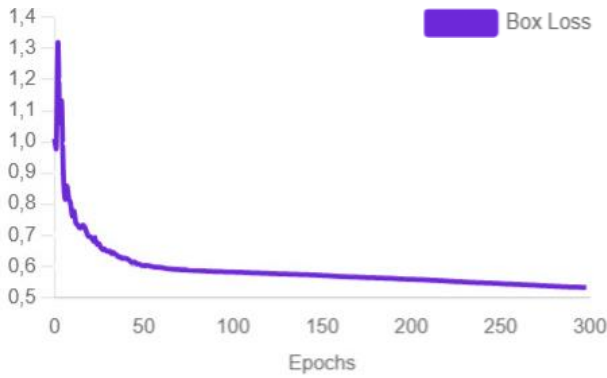


Figure 6. Box Loss graph

The term "Class Loss" is used to improve the performance of object detection and classification models. This function evaluates the difference between the class labels predicted by the model and the actual class labels.

Figure 7. Class Loss graph

"Object Loss" is a loss function used in object detection and partitioning models. This function measures the difference between the model's predicted bounding boxes and the actual bounding boxes. The purpose of object loss is to improve object detection and partitioning performance by directing models to predict more accurate bounding boxes.

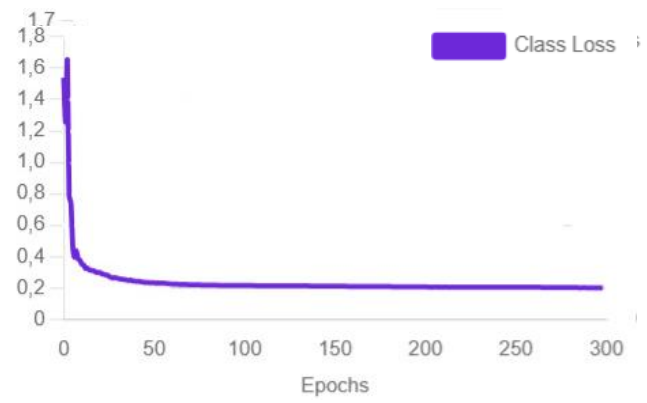


Figure 8. Object Loss graph

As a result of this improvement, the mAP (average of accuracy measurement in model classes), Precision (how often model estimates are correct) and Recall (percentage of labels successfully defined) values will be calculated at higher values as shown in Figure 9 and Figure 10.



Figure 9. Values of mAP, Precision and Recall

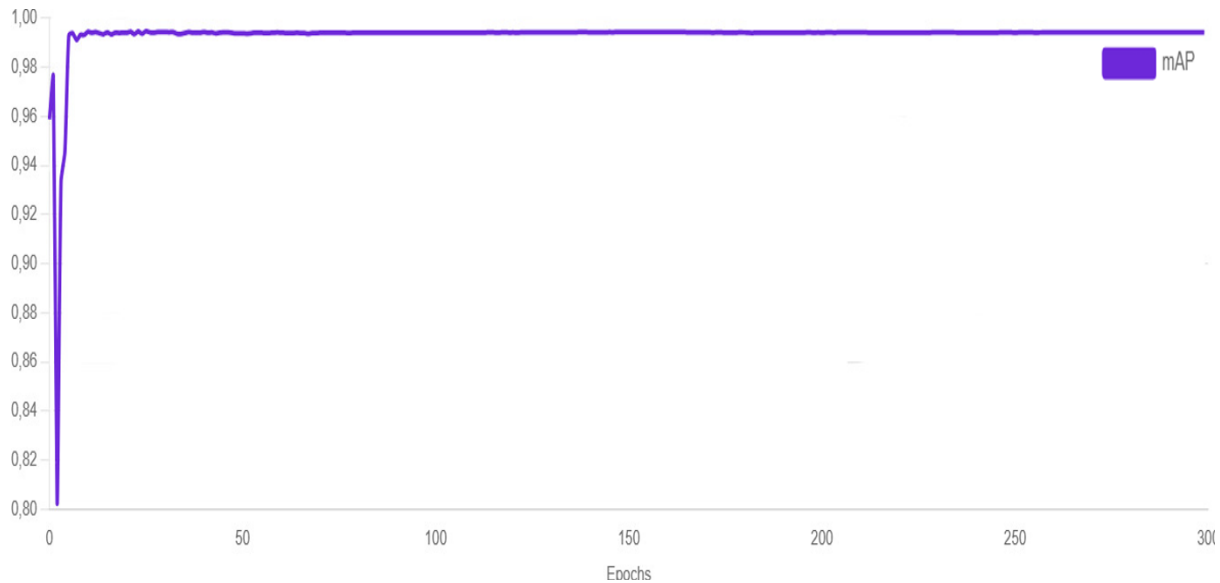


Figure 10. mAP graph

2.5. Algorithm of the designed model

After the training was provided through Roboflow, the stage of using the obtained model was reached. The obtained model was used with a code set written in Python programming language on the local computer. Before creating a code, it is necessary to focus on the requirements and requirements of the programme. In this context, an algorithm should be created. Figure

11 shows the algorithm in question. After the algorithm was obtained, a code set was created in Python programming language based on this algorithm. Visual Studio code environment was found suitable for this. Roboflow library, OpenCV, cvzone and other necessary libraries and modules were added in order to use the model obtained through Roboflow on the local computer.

2.6. Designing and integration of the interface

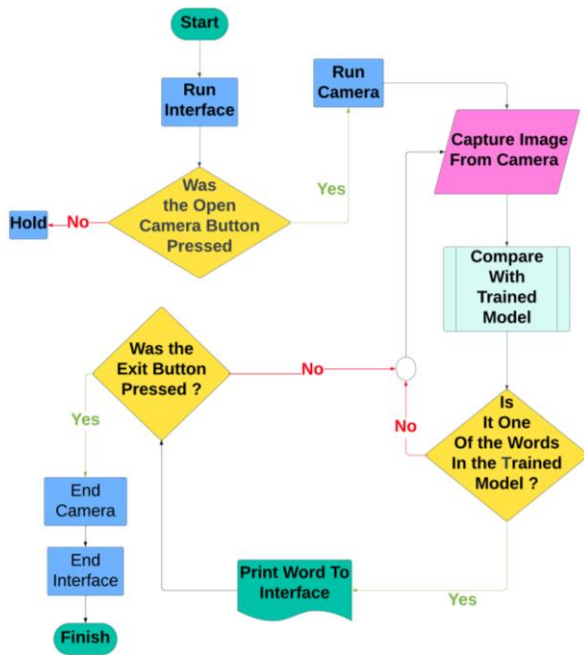


Figure 11. Flowchart of the designed model

The interface has been implemented as a simple and understandable interface in the design phase. Qt Designer was chosen for the design of the interface, which was described in a study by Nabijonovich S. B. et al. in 2024, because it had a user-friendly interface, based on a quick and efficient design and easy integration into the software language used [25]. In this context, the Qt Designer environment has begun to design an interface, as shown in Figure 12 the interface saved in ui format so that it can be integrated into our system written in the Python programming language converted to the py extension. On the interface, the buttons to turn on and exit the camera are dynamic. The translated py file has been revised and integrated into the code.

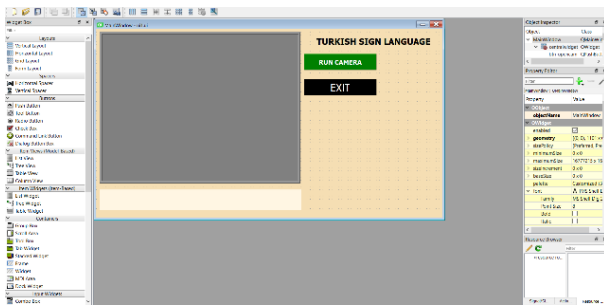


Figure 12. Designing of the interface

3. Results

In order for the system to work, the data set must first be created. For this purpose, a data set with a code written in the Python programming language has been created. Once the data set is created, the data must be classified and labelled. For this purpose, data has been prepared for training in the Roboflow environment. The training of the data set, which has been prepared

for training, has begun in the Roboflow environment as the COCO data set. At the end of the training, the parameters specified in Figure 13 were achieved.

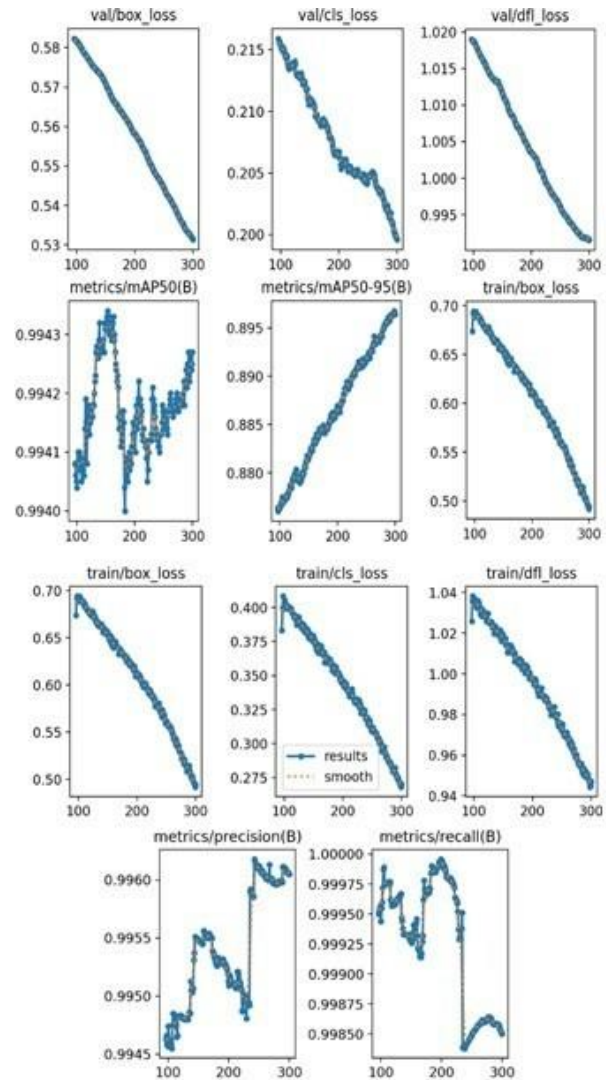


Figure 13. Parameters of training process

The trained model obtained at the end of the training was written in a main code in Python programming language, which takes images from the camera and undergoes the comparison process, showing the word class at the highest accuracy. These processes resulted the design of a very functional and simple interface for the real user to access. In this context, the interface in the Qt Designer environment has been designed. The necessary format conversion process has been carried out so that the designed interface can be integrated into the main code. It was subsequently tested, and the necessary locations were revised and the work was completed, as shown in Figure 14.

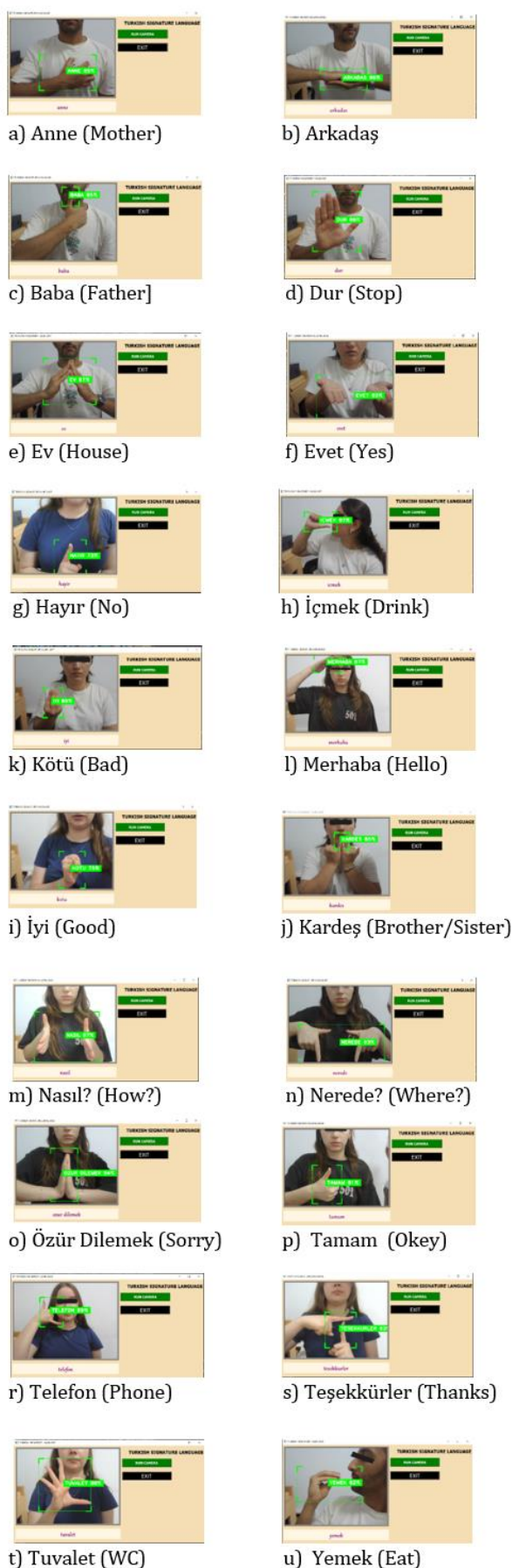


Figure 14. Testing of the system

4. Discussion and Conclusion

This study is focused on understanding and overcoming the challenges in the daily lives of hearing impaired individuals. Although there is limited literature on a system that translates the most frequently used words of Turkish Sign Language (TSL) in real-time, this study aims to fill this gap. In the study, data was collected from 12 individuals for 20 frequently used words/concepts in the TID alphabet and processed using Python programming language. The processed data was trained with the YOLOv8 machine learning algorithm in the Roboflow environment and a high success rate was achieved. The dataset was varied with different lighting conditions, backgrounds and camera angles to increase the model's adaptability to real-world conditions.

YOLOv10, which is likely to add greater accuracy and effectiveness, was not preferred because since it is a relatively new method and community support is still limited. In the study, the Roboflow environment was preferred by avoiding the physical difficulties of conducting local training. In this way, time spent before and during the training was saved. Since the study will ultimately serve a user in need, a simple interface was needed. Qt Designer, which offers high accessibility in this context, has been chosen. This preference has been granted a waiver the interface from visualizing by creating a Python code.

In this study, methods and tools that have proven themselves in terms of effectiveness and usefulness were used. As can be seen in Table 2, the accuracy rate in this study is quite high (99.4%) compared to other studies using YOLOv5. YOLOv8 has added high accuracy and effectiveness to this study. In studies using YOLOv5 as machine learning, the lowest accuracy rate was 73.4% in the study by Deepa et al., 76.29% in the study by Tonjih Tazalli et al. The highest accuracy rate was measured as 97.9% in the study conducted by Vasudevan et al. Kustiawanto and ark. have achieved accuracy rates of 78.38% and 96.15% using LSTM. In studies using YOLOv8 as machine learning, the lowest accuracy rate was 91% in the study by Matuck et al., 97.9% in the study by Vasudevan et al. and the highest accuracy rate was 98.9% in the study by Brucal et al. Çamlıbel et al. Using SST and FSST achieved 87% accuracy, while Pavithra et al. achieved 95.7% accuracy using Roboflow. In this study, using Roboflow and YOLOv8, which is better than other studies an accuracy rate of 99.4% was achieved. These results emphasize that the methods selected in this study are optimum compatible with each other.

This study focuses on understanding the challenges faced by hearing-impaired individuals in their daily lives and developing solutions to enhance their communication capabilities. By collecting data for 20

frequently used words and concepts in Turkish Sign Language (TSL) from 12 individuals, this research aims to provide a robust solution for real-time translation of TSL into text. The data was processed using Python and trained with the YOLOv8 machine learning algorithm in the Roboflow environment, achieving a high accuracy rate of 99.4%.

The dataset's diversity, achieved through varying lighting conditions, backgrounds, and camera angles, ensured the model's adaptability to real-world conditions. The study avoided using the newer YOLOv10 due to its limited community support, opting instead for the more established YOLOv8, which proved to be highly effective.

A user-friendly interface was designed using Qt Designer, emphasizing accessibility and ease of use. The interface, integrated with the trained model, allows for real-time translation of TSL into text, significantly improving communication for Deaf or Hard of Hearing individuals. This system not only addresses daily interaction challenges but also supports the social integration of hearing-impaired individuals by providing them with a reliable communication tool.

In summary, the developed system demonstrates high accuracy and practical utility, contributing to a better communication experience for hearing-impaired individuals and facilitating their interaction with the surrounding environment.

Table 2. Accuracy rates comparison between studies that uses YOLO

Authors	Methods	Accuracy
Deepa, D. et al. [15]	YOLOv5, CNN	73.4 %
Brucal, S. G. E. et al. [16]	YOLOv8, NMS	98.9%
Vasudevan, H. et al. [17]	YOLOv5, YOLOv8	97.9%
Camlibel, A., Karakaya, B., & Tanc, Y. H. [20]	SST, FSST	87%
Kustiawanto H., Erdefi Rakun [6] (Plain words)	LSTM	96.15%
Kustiawanto H.; Erdefi Rakun [6] (Inflected words)	LSTM	78.38%
Pavithra, M. et al. [18]	Roboflow	95.7%
Matuck, G. R. et al. [19]	YOLOv8	91%
Tonjih Tazalli et al. [4]	PyTorch, YOLOv5	76.29%
Current study	Roboflow, YOLOv8	99.4%

Acknowledgment

The authors thank Mechatronics Engineering Department of Sakarya University of Applied Sciences.

Declaration of Ethical Code

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

Informed consent was obtained from all the participants and ethics committee approval was obtained for the data collection steps for this study (E-26428519-050.99-133710). (E-26428519-050.99-133710).

References

- [1] H. Yüksel, Introduction to Interpersonal Communication, Eskişehir, Turkey: Anadolu Univ. Publ., 1994, 180 pages.
- [2] E. Arık, "A study on classifiers in Turkish sign language," Bilig, no. 67, pp. 1–24, 2013.
- [3] H. Erten and N. Arıcı, "The historical adventure of sign language and Turkish sign language," Afyon Kocatepe Univ. J. Soc. Sci., vol. 24, no. 1, pp. 1–14, 2022.
- [4] T. Starner and A. Pentland, "Real-time American sign language recognition from video using hidden Markov models," in Proc. Int. Symp. Comput. Vis., Coral Gables, FL, USA, Nov. 21–23, 1995, pp. 265–270.
- [5] T. Tazalli, Z. A. Aunshu, S. S. Liya, M. Hossain, Z. Mehjabeen, M. S. Ahmed, and M. I. Hossain, "Computer vision based Bengali sign language to text generation," in Proc. 5th IEEE Int. Conf. Image Process. Appl. Syst. (IPAS), Genoa, Italy, Dec. 5–7, 2022, pp. 1–6.
- [6] F. Gökçe and H. Kekül, "Turkish sign language word translator with microcontroller systems,"

- European J. Sci. Technol., no. 28, pp. 972–977, 2021.
- [7] K. Halim and E. Rakun, “Sign language system for Bahasa Indonesia (known as SIBI) recognizer using TensorFlow and long short-term memory,” in Proc. 2018 Int. Conf. Adv. Comput. Sci. Inf. Syst. (ICACSIS), Yogyakarta, Indonesia, 2018, pp. 403–407.
- [8] L. A. E. Jiménez, M. E. Benalcázar, and N. Sotomayor, “Gesture recognition and machine learning applied to sign language translation,” in Proc. VII Latin Am. Congr. Biomed. Eng. (CLAIB), Bucaramanga, Colombia, Oct. 26–28, 2016, pp. 233–236.
- [9] J. L. Hernandez-Rebollar, N. Kyriakopoulos, and R. W. Lindeman, “A new instrumented approach for translating American sign language into sound and text,” in *Proc. Sixth IEEE Int. Conf. Automatic Face Gesture Recognit. (FG 2004)*, Seoul, South Korea, May 17–19, 2004, pp. 547–552.
- [10] M. F. Karaca, Turkish sign language simulation with three-dimensional virtual model, Ph.D. dissertation, Karabük Univ., Karabük, Turkey, 2018.
- [11] A. Z. Oral, Turkish sign language translation, Ankara, Turkey: Siyasal Bookstore, 2016, 142 pages.
- [12] M. F. Karaca and Ş. Bayır, “Turkish sign language analysis: communication and grammar,” J. Natl. Acad. Educ., vol. 2, no. 2, pp. 35–58, 2018.
- [13] S. A. Demir, “The language of silence: observations on Turkish sign language,” Bilig, no. 54, pp. 1–20, 2010.
- [14] H. Erten and N. Arıcı, “Historical adventure of sign language and Turkish sign language,” Afyon Kocatepe Univ. J. Soc. Sci., vol. 24, no. 1, pp. 1–14, 2022.
- [15] F. Hermens, “Automatic object detection for behavioural research using YOLOv8,” *Behavior Research Methods*, vol. 56, no. 7, pp. 7307–7330, May 2024.
- [16] W. Z. Taffese, R. Sharma, M. H. Afsharmovahed, G. Manogaran, and G. Chen, “Benchmarking YOLOv8 for optimal crack detection in civil infrastructure,” arXiv, Jan. 12, 2025, .
- [17] D. Deepa, A. Sivasangari, R. Roonwal, and R. Nayan, “Pothole detection using roboflow convolutional neural networks,” in 2023 7th Int. Conf. Intelligent Comput. Control Syst. (ICICCS), 2023, pp. 560–564.
- [18] S. G. E. Brucal, L. C. M. de Jesus, S. R. Peruda, L. A. Samaniego, and E. D. Yong, “Development of tomato leaf disease detection using YoloV8 model via RoboFlow 2.0,” in 2023 IEEE 12th Global Conf. Consumer Electron. (GCCE), 2023, pp. 692–694.
- [19] H. Vasudevan and A. Nazari, “Recognition of fruit grading based on deep learning technique,” *Evolution Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 420–426, 2024.
- [20] M. Pavithra, P. S. Karthikesh, B. Jahnavi, M. Navyalokesh, and K. L. Krishna, “Implementation of enhanced security system using Roboflow,” in 2024 11th Int. Conf. Reliability, Infocom Technol. Optim. (Trends Future Directions) (ICRITO), 2024, pp. 1–5.
- [21] G. R. Matuck, A. J. A. Castro, L. E. da Silva, and E. G. Carvalho, “Reconhecimento facial com inteligência artificial utilizando a plataforma RoboFlow,” *Revista Prociências*, vol. 6, no. 2, pp. 114–131, 2023.
- [22] E. Gocer, “Medical image data augmentation: techniques, comparisons and interpretations,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, pp. 12561–12605, 2023.
- [23] A. Çamlıbel, B. Karakaya, and Y. H. Tanç, “Automatic modulation recognition with deep learning algorithms,” in 2024 32nd Signal Process. Commun. Appl. Conf. (SIU), 2024, pp. 1–4.
- [24] G. Karaduman, E. Akın, B. Binay, and M. Dilekli, “Detection of insulator defects in catenary systems with deep learning,” *Railway Eng.*, vol. 16, pp. 185–195, 2022.
- [25] S. B. Nabijonovich and G. Najmiddin, “Optimizing PyQt5 development with Qt designer,” *Web of Teachers: Inderscience Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 254–259, 2024.

Predicting $b\bar{c}$ Meson Mass Spectra Using Neural Network with Combined Cornell and Quadratic Potentials

Tarık AKAN*¹ 

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 66100, Yozgat, Türkiye

(Alınış / Received: 02.06.2025, Kabul / Accepted: 28.07.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Hadronlar,
Machine Learning,
QCD

Abstract: This research explores the mass spectra of the $b\bar{c}$ meson using the neural network (NN) method that combines the Cornell potential with the addition of another quadratic potential term. By training the NN model on theoretical results and comparing its predictions with existing theoretical and experimental data from the literature, we demonstrate that this mixed-potential model effectively describes the $b\bar{c}$ meson properties. Our treatment justifies the usefulness of merging machine learning methods with classical potential approaches for meson spectroscopy applications. In addition, the approach is generalized into an ideal four-dimensional space for its application in the study of the impact of more spatial dimensions on quarkonium systems. The results in this extended setting agree with expectations, confirming that the NN-type approach is strong and flexible with its application into more than three spatial dimensions for quantum systems. In all, our research proves the efficacy of neural network-facilitated models in promoting theoretical research in heavy meson physics and presents a door for further research into quantum systems in more dimensions.

Birleştirilmiş Cornell ve Kuadratik Potansiyeller ile Sinir Ağı Kullanarak $b\bar{c}$ Mezon Kütle Spektrumlarının Tahmini

Keywords

Hadronlar,
Makine Öğrenmesi,
KRD

Öz: Bu araştırma, Cornell potansiyelini başka bir kuadratik potansiyel terimi ile birleştiren sinir ağı (NN) yöntemini kullanarak $b\bar{c}$ mezonunun kütle spektrumlarını incelemektedir. NN modelini teorik sonuçlar üzerinde eğiterek ve tahminlerini literatürdeki mevcut teorik ve deneysel verilerle karşılaştırarak, bu karışık potansiyel modelinin $b\bar{c}$ mezonunun özelliklerini etkili bir şekilde tanımladığını göstermekteyiz. Çalışmamız, makine öğrenimi yöntemlerinin klasik potansiyel yaklaşımlarla birleştirilmesinin mezon spektroskopisi uygulamaları için yararlı olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım, daha fazla uzaysal boyutun kuarkonyum sistemleri üzerindeki etkisinin incelenmesinde uygulanabilmesi için ideal bir dört boyutlu uzaya genelleştirilmiştir. Bu genişletilmiş ortamdaki sonuçlar beklentilerle uyumludur ve NN tipi yaklaşımın kuantum sistemleri için üçten fazla uzaysal boyutta uygulanabilirliği açısından güçlü ve esnek olduğunu doğrulamaktadır. Sonuç olarak, araştırmamız ağır mezon fiziğinde teorik araştırmayı teşvik etmede sinir ağı destekli modellerin etkinliğini kanıtlamakta ve daha fazla boyutta kuantum sistemleri üzerine daha fazla araştırma için bir kapı açmaktadır.

1. Introduction

The examination of heavy quarkonium systems, including B_c ($b\bar{c}$) mesons, is essential to understanding the quantitative dimensions of Quantum Chromodynamics (QCD) and the Standard Model. Quarkonium systems offer a testing ground for various theoretical techniques including lattice QCD, QCD sum rules, and other methods that provide

insights into the strong interactions [1-9]. The Schrödinger equation (SE) is one of the most important tools for investigating the properties of the constituent particles and the dynamics of their interactions in nuclear and subnuclear physics. Nevertheless, the Schrödinger equation is difficult to solve exactly, especially if the centrifugal potential is taken into account [10-12]. Consequently, several approximation methods have been developed, such as

*tarik.akan@bozok.edu.tr

the asymptotic iteration method [10] and the Nikiforov-Uvarov method [13]. These methods are frequently used to derive analytical solutions for the Schrödinger equation with different potentials, including the Cornell potential and combinations of the Cornell potential with other potentials like the harmonic oscillator potential [12, 14-17].

The Cornell potential, distinguished by its Coulomb-like short-range and linear large-range terms, has been widely employed to describe quark-antiquark systems, which include mesons [18-24]. The Coulomb potential stems from one-gluon exchange, whereas the linear potential is conjectured to come from higher orders, though its first-principle derivation from the rules of QCD has been left as an open question [14]. Even with its relevance to the underlying physics, the exact solutions of the Schrödinger equation with the Cornell potential continue to pose an on-going challenge. In addition to the Cornell potential, we take into account quadratic term owing to its additional harmonic confinements.

There has been a recent interest in applying the use of Neural Networks (NNs) as a novel approach to solving ordinary and partial differential equations, including the Schrodinger equation [25]. There are various advantages of using NNs over conventional numerical methods, including the capability to approximate universal functions, generate continuum solutions over the entire domain, and remain computationally efficient irrespective of the sample points or dimensions of the problem [26-30]. Numerous studies have demonstrated that NNs can solve quantum mechanical problems effectively [25-30] and therefore are a potential method to calculate meson mass spectra.

In the present study, we seek to calculate the mass spectra of the $b\bar{c}$ mesons by solving the Schrödinger equation through an approach utilizing NNs with a combined Cornell and quadratic potential. The inclusion of the quadratic potential to the Cornell potential enables a more flexible and accurate description of the meson systems, with the possibility of better matching with the experimental results. This work extends the results of the quarkonium systems previously calculated and discusses the potential application of the method of neural networks to further advance the study of spectroscopy of the heavy mesons.

2. Materials and Methods

NNs are computational models consisting of interconnected units known as neurons. Each neuron receives multiple inputs and produces an output based on a nonlinear activation function, such as the sigmoid function. The sigmoid function is defined as:

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

which is advantageous for its differentiability properties.

Neurons are usually structured in layers in a neural network. A single neuron accepts many inputs and has a single output in the most basic model. More advanced forms of the setup, such as the multilayer perceptron neural networks (MLPNs), contain neurons grouped in various numbers of layers, with a neuron in a layer linked to all the neurons in the next layer. This feed-forward structure is very versatile and can implement intricate functions and is thus widely used in a variety of applications [26, 28, 31].

In MLPNs (see Figure 1), the output of each neuron is computed as the activation function applied to the weighted sum of its inputs. Mathematically, this can be described for neurons in different layers using the following relations:

$$o_i = \sigma(n_i) \quad (2)$$

$$o_j = \sigma(n_j) \quad (3)$$

$$o_k = \sigma(n_k) \quad (4)$$

where i, j , and k denote the input, hidden, and output layers, respectively. The inputs to neurons in the hidden and output layers are given by:

$$n_j = \sum_{i=1}^{N_i} w_{ij} o_i + \theta_j, \quad (5)$$

$$n_j = \sum_{j=1}^{N_j} w_{jk} o_j + \theta_k. \quad (6)$$

Here, w_{ij} and w_{jk} are the weights connecting neurons between layers, and θ_j and θ_k are threshold parameters.

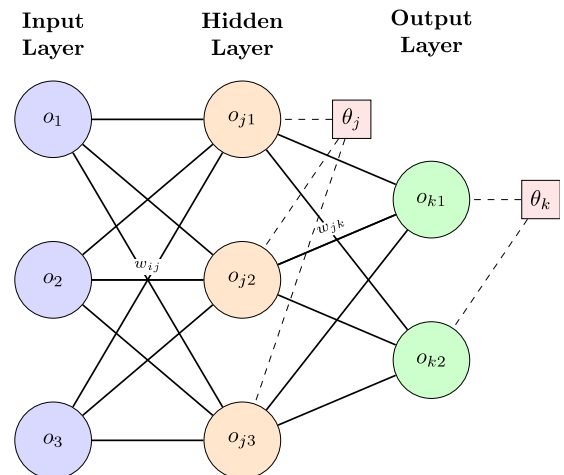


Figure 1. A representation of the DNN architecture, illustrating the input layer, hidden layers, and output layer.

The overall output o_k of the network can be expressed as a composite function of its inputs, weights, and thresholds:

$$o_k = \sum_{j=1}^{N_j} w_{jk} \sigma \left(\sum_{i=1}^{N_i} w_{ij} n_i + \theta_j \right) + \theta_k \quad (7)$$

This differentiable function allows the neural network to learn optimal parameters using training algorithms such as backpropagation.

Applying neural networks to quantum mechanical systems, particularly for solving differential equations like the Schrödinger equation, enables the approximation of solutions using a neural network. For a differential equation of the form

$$H\Psi(r) = f(r) \quad (8)$$

where H is a linear operator and $f(r)$ is a known function, a trial solution $\Psi_t(r)$ can be constructed using a neural network. This solution is parameterized by weights and biases represented by a vector $\mathbf{p}$ and is designed to satisfy boundary conditions.

To find an approximate solution, the problem is converted into a minimization problem where the objective is to minimize the error function:

$$E(\mathbf{p}) = \sum_i \frac{[H\Psi_t(r_i, \mathbf{p}) - f(r_i)]^2}{\int |\Psi_t|^2 d\mathbf{r}} \quad (9)$$

This transformation is achieved using the collocation method, where the differential equation is solved by adjusting the network parameters to minimize the discrepancy between the network output and the target function.

Specifically for the Schrödinger equation, this approach involves defining a trial wavefunction $\Psi_t(r)$ using a neural network and optimizing its parameters to minimize the energy eigenvalues. The trial wavefunction can be represented as:

$$\Psi_t(r) = B(\mathbf{r}, \lambda) N(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \quad (10)$$

where $B(\mathbf{r}, \lambda)$ ensures the boundary conditions are met, and $N(\mathbf{r}, \mathbf{p})$ is the neural network output. By optimizing this network using backpropagation, we can find the parameters that best approximate the eigenvalues of the system under study.

Moreover, this method enables the calculation of multiple energy states by projecting out the already

computed levels from the trial wavefunction. If we have computed orthonormal states $|\Psi_0\rangle, |\Psi_1\rangle, \dots, |\Psi_k\rangle$, a trial state $|\Psi_t\rangle$ orthogonal to all of them can be constructed by projecting out their components from a general function $|\tilde{\Psi}_t\rangle$ that satisfies the boundary conditions:

$$|\Psi_t\rangle = (1 - |\Psi_0\rangle\langle\Psi_0|)(1 - |\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|) \dots \times (1 - |\Psi_k\rangle\langle\Psi_k|) |\tilde{\Psi}_t\rangle \quad (11)$$

This can also be expressed as:

$$|\Psi_t\rangle = (1 - |\Psi_0\rangle\langle\Psi_0| - \dots - |\Psi_k\rangle\langle\Psi_k|) |\tilde{\Psi}_t\rangle \quad (12)$$

This projection method ensures that the new trial wavefunction is orthogonal to all previously computed states, facilitating the systematic calculation of higher energy levels [26-28, 32].

Neural networks, particularly multilayer perceptrons, offer a powerful framework for modeling and solving complex problems in both classical and quantum domains due to their flexibility, differentiability, and capacity to approximate nonlinear functions [26-28, 31].

The Schrödinger equation (SE) for two particles interacting through a symmetric potential in an N -dimensional space can be formulated to describe the quantum states of systems like quarkonium. This equation, as described in Ref. [2], takes the following form:

$$\frac{d^2\Psi(r)}{dr^2} + \frac{N-1}{r} \frac{d\Psi(r)}{dr} - \frac{l(l+N-2)}{r^2} \Psi(r) + 2\mu(E - V(r))\Psi(r) = 0 \quad (13)$$

where l is the angular momentum quantum number, N is the number of spatial dimensions, and μ is the reduced mass of the interacting particles, such as quarks in a quarkonium system.

To simplify the SE for radial solutions, we set the wave function $\Psi(r)$ in terms of a radial function $R(r)$ as $\Psi(r) = r^{\frac{1-N}{2}} R(r)$. Substituting this into Eq. (13) yields the radial Schrödinger equation:

$$\frac{d^2R(r)}{dr^2} = 2\mu(V(r) - E)R(r) + \frac{\left(l + \frac{N-2}{2}\right)^2 - \frac{1}{4}}{2\mu r^2} R(r) \quad (14)$$

To explore the properties of quarkonium, the potential energy function $V(r)$ often combines the Cornell potential term. On the other hand, the quadratic potential introduces additional effects. The potential $V(r)$ is given by:

$$V(r) = ar - \frac{b}{r} + cr^2 \quad (15)$$

where a , b , and c are constants that can be adjusted based on the specific properties of the system [5-7].

The Cornell potential, represented by the terms $ar - b/r$, encapsulates two fundamental characteristics of the strong force between quarks: confinement and asymptotic freedom. The linear term, ar , dominates at large distances, reflecting the confinement phenomenon where quarks are bound together. The inverse term, $-b/r$, is significant at short distances, illustrating asymptotic freedom, where quarks behave almost independently due to the decreasing interaction strength as they get closer [7, 33].

The quadratic potential, represented by the term cr^2 and where the parameter c is related to the mass m of the particle and the square frequency of the oscillation. This potential term is crucial in fine-tuning the model to reflect various quarkonium properties, as noted in Refs. [20, 34, 35].

Substituting the potential function $V(r)$ from Eq. (15) into the radial Schrödinger Eq. (14), we obtain:

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} = 2\mu \left(ar - \frac{b}{r} + cr^2 - E + \frac{(l + (N - 2/2))^2 - 1/4}{2\mu r^2} \right) R(r) \quad (16)$$

This modified Schrödinger equation allows for the exploration of the energy levels and wave functions of quarkonium systems under the influence of both the Cornell and quadratic potentials. The interplay of these potentials enables a detailed study of the quark-antiquark interaction, incorporating both the long-range confinement and short-range asymptotic freedom characteristic of strong interactions, along with additional harmonic confinement effects [34, 36, 37].

The radial wave function corresponding to this equation can be expressed in the form:

$$R_{nl}(r) = C_{nl} r^{-\frac{B}{\sqrt{2A}}-1} e^{\sqrt{2A}r} \left(r^2 \frac{d}{dr} \right)^n \times \left(r^{-2n+\frac{2B}{\sqrt{2A}}} e^{-2\sqrt{2A}r} \right) \quad (17)$$

This solution is obtained by applying the Nikiforov-Uvarov method to Eq. (16) in [14]. The normalization constant C_{nl} is determined by ensuring $\int |R_{nl}(r)|^2 dr = 1$. The parameters A and B in the radial Schrödinger equation are defined as:

$$\begin{aligned} A &= -\mu \left(E - \frac{3a}{\delta} - \frac{6c}{\delta^2} \right), \\ B &= \mu \left(\frac{3a}{\delta^3} + \frac{8c}{\delta^3} + b \right), \end{aligned} \quad (18)$$

where $\delta = 1/r_0$, with r_0 being a characteristic radius of the meson [14, 17].

By analyzing solutions to this equation, one can derive important properties of quarkonium, such as energy eigenvalues and wavefunctions, which are essential for understanding the behavior of heavy quark pairs bound by the strong force [18, 33, 38].

In the comparison with Eq. (17), we parameterize the trial function as:

$$R_t(x) = x^\alpha e^{-\beta x^2} N(x, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{v}), \quad \beta > 0, \alpha \in \mathbb{R}, \quad (19)$$

where N denotes a feed-forward artificial neural network with one hidden layer and m sigmoid hidden units, represented as:

$$N(x, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{v}) = \sum_{j=1}^m v_j \sigma(w_j x + u_j). \quad (20)$$

The minimization problem for this trial function is defined as:

$$\sum_i \frac{[HR_t(x_i - \epsilon R_t(x_i))]^2}{\int |R_t(x)|^2 dx} \quad (21)$$

This formulation leverages the pattern of the radial wave function to optimize the neural network parameters.

Optimization of the trial wavefunction parameters is done through the Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) algorithm, a quasi-Newton method with the advantage of being efficient when dealing with problems described by a nonlinear function. We aim to minimize the total error function E_{total} by optimizing the trial wavefunction's parameters [28, 29].

Optimization for each quantum state begins with a group of initial random parameters, and the BFGS algorithm iteratively updates the parameters to minimize the total error. This optimization is run for a specified number of trials to guarantee convergence to the global minimum [26].

The optimum parameters provide a trial wavefunction that most accurately represents the actual wavefunction of the quantum state in question. These optimized parameters are used to calculate the energy, and the results are compared to experimental results to verify the validity of the model.

This method enables the systematic calculation of energy levels and wavefunctions and offers useful information regarding the $b\bar{c}$ meson system [21, 22, 28].

3. Results

In this section, we present the mass spectra calculations for the $b\bar{c}$ states using the neural network approach with the combined Cornell and quadratic potentials. The results are displayed in Tables 1 and 2 for different quantum states, and we compare them with those from other theoretical studies and available experimental data. The constants used, as presented in [14], are:

$$\begin{aligned} m_b &= 4.823 \text{ GeV}, \\ m_c &= 1.209 \text{ GeV}, \\ a &= 0.2 \text{ GeV}^2, \\ b &= 1.2, \\ c &= 0.04 \text{ GeV}^3. \end{aligned} \quad (22)$$

We trained the network using 200 evenly spaced points with $m = 10$ over the interval $-10 \leq r \leq 10$ and solved Eq. (16) (see Table 1). The loss function curve resulting from the training process, as illustrated in Figure 2, offers valuable insights into the convergence of the neural network. Furthermore, the learning curve of the plot of the error function versus BFGS iteration (Figure 3) also supports and plots the optimizer convergence path. At first, the error function falls very rapidly, dropping sharply over the initial epochs, suggesting that the neural network converges to an optimal value close to the global minimum very rapidly. Following around 50 epochs, the loss converges to a consistently low error plateau. Such consistency validates the effectiveness and stability of the optimization process utilized, showcasing the applicability of having modeled the combined Cornell and quadratic potentials using neural networks. Our method reaches consistent convergence before epoch 50; however, when considering the all $b\bar{c}$ states—which follow the same pattern of convergence—it is generally necessary to extend training up to 300 epochs to ensure stability across all cases. Such stability provides assurance over calculated- B_c meson mass spectra, supporting the robustness and precision of the methodology under consideration.

Table 1. NN Architecture

Table 2. Mass spectra of B_c meson (in GeV) for $N = 3$.

State	Present Work	[25]	[10]	[14]	[18]	[19]	Exp. [12]
1S	6.276	6.274	6.362	6.277	6.264	6.270	6.275
1P	6.669	6.743	6.792	6.666	6.700	6.699	-
1D	7.052	7.046	7.051	-	-	-	-
2S	7.043	6.839	6.911	7.042	6.856	6.835	6.842
2P	7.212	7.187	7.178	7.207	7.108	7.091	-
3S	7.287	7.245	7.284	7.384	7.244	7.193	-

Hidden Layer	Hidden Units	Epoch	BFGS Iteration
1	10	300	100

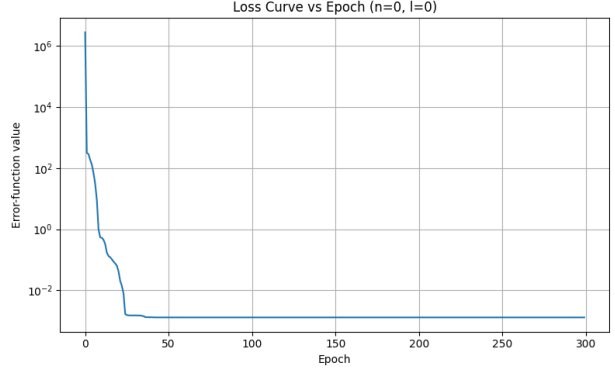


Figure 2. Loss curve illustrating convergence of the neural network training over epochs for the $n = 0, l = 0$ state.

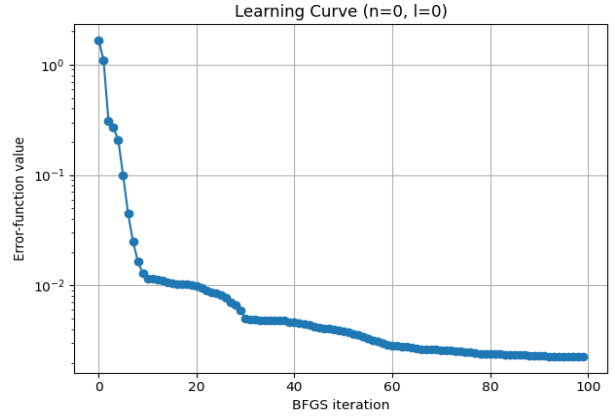


Figure 3. Learning curve illustrating convergence of the neural network training over BFGS iterations for the $n = 0, l = 0$ state.

Table 2 shows the calculated mass spectra of the $b\bar{c}$ meson for $N = 3$ spatial dimensions, which corresponds to our three-dimensional space. The results from our present work are compared with those from other studies, including the NNs used in [25], as well as theoretical models in [10, 14, 19, 39]. Where available, comparisons with experimental data from [12] are also included.

In the first excited state (2S), we calculated the mass to be 7.043 GeV , which is consistent with other theoretical calculations but somewhat greater than the experimental value of 6.842 GeV [14, 18, 19, 25].

3P	7.471	7.467	7.494	-	-	-	-
4S	7.527	7.522	7.593	-	-	-	-

This might be a result of the additional quadratic potential term in our approach, which might raise the calculated masses for the excited states.

Theoretical mass calculated for the $1P$ state comes out to be 6.669 GeV , consistent with the values from the other models, assuring the strength of our method for the calculation of orbital excitations. We find the same consistency in the calculations for the $2P$ and $3P$ states even though we do not possess experimental results for these states for direct comparison.

Table 3 presents the calculated mass spectra for the $b\bar{c}$ meson in a hypothetical four-dimensional space ($N = 4$). These results are compared with those in [14], which uses the same potential model.

The ground state mass, calculated as $1S$, in $N = 4$ dimensions comes out to be 6.350 GeV , which is somewhat larger than the result in the $N = 3$ dimensional case. This can be anticipated because the increased spatial dimension changes the dynamics in the quark-antiquark system. Excited state masses are typically higher than in the $N = 3$ dimensional case.

Specifically, for the $2S$ state, our predicted mass of 6.879 GeV agrees almost exactly with that given in [14], demonstrating the consistency of the neural network method with conventional analytical calculations even at larger dimensions. The calculated masses for the remaining states, including $3S$ and $3P$, agree likewise reasonably well with past results.

Table 3. Mass spectra of B_c meson (in GeV) for $N = 4$.

State	Present Work	[14]
1S	6.350	6.355
1P	6.862	6.883
1D	7.052	-
2S	6.879	6.878
2P	7.165	7.161
3S	7.516	8.035
3P	7.282	-
4S	7.246	-

Results for $N = 4$ dimensions are noteworthy because they provide useful theoretical insight on the variation of the quark-antiquark interaction for systems of larger numbers of dimensions. An increase in spatial dimensions modifies the overall dynamics of a system through a variation of the combined potential, leading to computable observable changes of calculated meson masses. These results are of particular interest for studies of beyond-Standard Model scenarios, e.g., of string models or models of extra spatial dimensions. Such models are, of course, speculative without experimental confirmation but are a useful starting point for investigating the strength and

versatility of theoretical approaches of meson spectroscopy.

4. Discussion and Conclusion

When compared to the results using the literature, it becomes apparent that the method using the neural network is a valid and effective technique to obtain the masses of the spectra of the heavy meson system of $b\bar{c}$. Adding the quadratic potential to the Cornell potential makes the model flexible, especially in the prediction of the excited states [10, 14, 25].

Yet, the minor variations seen in the excited states hint at the possibility of further tuning of the potential parameters or the incorporation of additional physical phenomena, e.g., relativistic correction or spin-spin interaction, to enhance the precision of predictions [7, 23, 40-42].

Overall, the combined Cornell and quadratic potential used in the neural network method presents a wide range of potential for the study of heavy meson spectroscopy, giving results competitive to, and sometimes better than, the conventional theory.

References

- [1] Kuchin, S., Maksimenko, N. 2013. Theoretical estimations of the spin-averaged mass spectra of heavy quarkonia and B_c mesons. *Universal Journal of Physics and Application*, 7(3), 295-298.
- [2] Kumar, R., Chand, F. 2013. Asymptotic study to the N -dimensional radial Schrödinger equation for the quark-antiquark system. *Communications in Theoretical Physics*, 59(5), 528.
- [3] Dib, C. O., Neill, N. A. 2012. $\chi_b(3P)$ splitting predictions in potential models. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, 86(9), 094011.
- [4] Evans, P., Allton, C., Skullerud, J. I. 2014. Ab initio calculation of finite-temperature charmonium potentials. *Physical Review D*, 89(7), 071502.
- [5] Hall, R. L. 1984. Simple eigenvalue formula for the Coulomb-plus-linear potential. *Physical Review D*, 30(2), 433.
- [6] Thacker, B. A., Lepage, G. P. 1991. Heavy-quark bound states in lattice QCD. *Physical Review D*, 43(1), 196.
- [7] Godfrey, S., Isgur, N. 1985. Mesons in a relativized quark model with chromodynamics. *Physical Review D*, 32(1), 189.
- [8] Lepage, G. P., Magnea, L., Nakhleh, C., Magnea, U., Hornbostel, K. 1992. Improved nonrelativistic

- QCD for heavy-quark physics. *Physical Review D*, 46(9), 4052.
- [9] Soto, J. 2007. Overview of non-relativistic QCD. *The European Physical Journal A*, 31, 705-710.
- [10] Ciftci, H., Hall, R. L., Saad, N. 2003. Asymptotic iteration method for eigenvalue problems. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 36(47), 11807.
- [11] Gönül, B., Köksal, K., Bakir, E. 2006. An alternative treatment for Yukawa-type potentials. *Physica Scripta*, 73(3), 279.
- [12] Patrignani, C., Agashe, K., Aielli, G., Amsler, C., Antonelli, M., Asner, D., Baer, H., Banerjee, S., Barnett, R., Basaglia, T. 2016. Review of particle physics.
- [13] Nikiforov, A.F., Uvarov, V.B. 1988. Special functions of mathematical physics (Vol. 205). Springer.
- [14] Abu-Shady, M. 2016. Heavy quarkonia and B_c mesons in the cornell potential with harmonic oscillator potential in the N-dimensional Schrodinger equation. *International Journal of Applied Mathematics Physics*, 2(2), 16-20.
- [15] Vigo-Aguiar, J., Simos, T. 2005. Review of multistep methods for the numerical solution of the radial Schrödinger equation. *International journal of quantum chemistry*, 103(3), 278-290.
- [16] Gupta, P., Mehrotra, I. 2012. Study of heavy quarkonium with energy dependent potential. *Journal of Modern Physics*, 3(10), 1530.
- [17] Kumar, R., Chand, F. 2012. Series solutions to the N-dimensional radial Schrödinger equation for the quark-antiquark interaction potential. *Physica Scripta*, 85(5), 055008.
- [18] Eichten, E.J., Quigg, C. 1994. Mesons with beauty and charm: Spectroscopy. *Physical Review D*, 49(11), 5845.
- [19] Ebert, D., Faustov, R., Galkin, V. 2003. Properties of heavy quarkonia and B_c mesons in the relativistic quark model. *Physical Review D*, 67(1), 014027.
- [20] Abou-Salem, L. 2005. A systematic study on nonrelativistic quark-antiquark interactions. *International Journal of Modern Physics A*, 20(17), 4113-4122.
- [21] Eichten, E., Gottfried, K., Kinoshita, T., Kogut, J., Lane, K., Yan, T.-M. 1976. Spectrum of Charmed Quark-Antiquark Bound States. *Physical Review Letters*, 36(21), 1276.
- [22] Quigg, C., Rosner, J.L. 1979. Quantum mechanics with applications to quarkonium. *Physics Reports*, 56(4), 167-235.
- [23] Alford, J., Strickland, M. 2013. Charmonia and bottomonia in a magnetic field. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, 88(10), 105017.
- [24] Barnes, T., Godfrey, S., Swanson, E. 2005. Higher charmonia. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, 72(5), 054026.
- [25] Mutuk, H. 2019. Cornell potential: a neural network approach. *Advances in High Energy Physics*, 2019(1), 3105373.
- [26] Lagaris, I.E., Likas, A., Fotiadis, D.I. 1997. Artificial neural network methods in quantum mechanics. *Computer Physics Communications*, 104(1-3), 1-14.
- [27] Haykin, S. 1994. Neural networks: a comprehensive foundation. Prentice Hall PTR.
- [28] Yadav, N., Yadav, A., Kumar, M. 2015. An introduction to neural network methods for differential equations. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*.
- [29] Spining, M., Darsey, J., Sumpter, B., Nold, D. 1994. Opening up the black box of artificial neural networks. *Journal of chemical education*, 71(5), 406.
- [30] Darsey, J., Noid, D., Upadhyaya, B. 1991. Application of neural network computing to the solution for the ground-state eigenenergy of two-dimensional harmonic oscillators. *Chemical physics letters*, 177(2), 189-194.
- [31] Barron, A. R. 1993. Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function. *IEEE Transactions on Information theory*, 39(3), 930-945.
- [32] Karakoc, M., Boztosun, I. 2006. Accurate iterative and perturbative solutions of the Yukawa potential. *International Journal of Modern Physics E*, 15(06), 1253-1262.
- [33] Gönül, B., Cançelik, Y. 2017. Remarks on the treatments of nonsolvable potentials. *Turkish Journal of Physics*, 41(4), 326-336.
- [34] Chen, J. K. 2013. Spectral method for the Cornell and screened Cornell potentials in momentum space. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, 88(7), 076006.
- [35] Chung, H.S., Lee, J., Kang, D. 2008. Cornell potential parameters for S-wave heavy quarkonia. *arXiv preprint arXiv:0803.3116*.
- [36] Eichten, E., Gottfried, K., Kinoshita, T., Lane, K., Yan, T.-M. 1980. Charmonium: comparison with experiment. *Physical review D*, 21(1), 203.
- [37] Fulcher, L.P. 1994. Matrix representation of the nonlocal kinetic energy operator, the spinless Salpeter equation and the Cornell potential. *Physical Review D*, 50(1), 447.

- [38] Vega, A., Flores, J. 2016. Heavy quarkonium properties from Cornell potential using variational method and supersymmetric quantum mechanics. *Pramana*, 87, 1-7.
- [39] Brambilla, N., Eidelman, S., Heltsley, B., Vogt, R., Bodwin, G., Eichten, E., Frawley, A., Meyer, A., Mitchell, R., Papadimitriou, V. 2011. Heavy quarkonium: progress, puzzles, and opportunities. *The European Physical Journal C*, 71, 1-178.
- [40] Lichtenberg, D. 1987. Energy levels of quarkonia in potential models. *International Journal of Modern Physics A*, 2(06), 1669-1705.
- [41] Akan, T. 2024. Exploring machine learning models for predicting meson mass and width. *Physica Scripta*, 99(2), 125305.
- [42] Assi, B., Wagman, M. L. 2023. Baryons, multihadron systems, and composite dark matter in nonrelativistic QCD. *Physical Review D*, 108(9), 096004.

Çizgelerde Ağırlıklı Bağlama Sayısı Üzerine

Şevket KESER¹, Ersin ASLAN²

^{1,2} Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü,
45400, Manisa, Türkiye

(Alınış / Received: 08.07.2025, Kabul / Accepted: 07.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Çizge teori,
Ayrıt bütünlüğü,
Algoritmalar

Öz: Lojistik ağları, internet ağları, su ve kanalizasyon ağları, elektrik ağları gibi tüm ağlar çizge teori yardımıyla modellenmektedir. Bu ağların güvenilirliği, sağlamlığı, taşıyabilme kapasiteleri gibi benzer durumlar için incelenmesi gerekmektedir. Bu incelemeler, çizge teorideki zedelenebilirlik parametreleri yardımıyla sağlanabilmektedir. Ağırlıklı çizgeler yardımıyla, ağırlıklı zedelenebilirlik ölçümleri kullanılabilmektedir. Ağırlıklı olmayan çizgelerde tepe ağırlıkları 1 olarak kabul edilmektedir. Böylece ağırlıklı zedelenebilirlik ölçümleri hem ağırlıklı hem de ağırlıksız çizgeler için ayırt edici olmaktadır. Bu makalede ilk kez ağırlıklı bağlama sayısı tanımı verilecektir. Bu kavram detaylıca açıklanmıştır. Bu ağırlıklı bağlama sayısı için algoritma ve pseudo kod verilecektir. Ağırlıklı çizgelerin bazı durumlarda daha iyi bir ayırt edici olduğu verilmiştir. Bu parametrenin bazı çizgeler için önemi detaylıca açıklanmıştır.

On the Weighted Binding Number of Graphs

Keywords

Graph theory,
Edge integrity,
Algorithms

Abstract: All networks such as logistics networks, internet networks, water and sewer networks, and electricity networks can be modeled with the help of graph theory. These networks need to be examined for similar situations such as reliability, durability and carrying capacity. These investigations can be achieved with the help of vulnerability parameters in graph theory. With the help of weighted graphs, weighted vulnerability measurements can be used. In unweighted graphs, vertex weights are assumed to be 1. Thus, weighted vulnerability measurements are discriminative for both weighted and unweighted graphs. In this article, the definition of weighted binding number will be given for the first time. This concept is explained in detail. The algorithm and pseudo code for this weighted binding number will be given. It has been shown that weighted graphs are better discriminators in some cases. The importance of this parameter for some graphs is explained in detail.

1. Giriş

Ağların; güvenliği, iyileştirilmesi, korunması önemli çalışma konularındandır. Ağlarda oluşabilecek problemlere çözüm önerileri için bu problemlerin modellenmesi gerekmektedir. Bu problemleri ya da ağ yapılarını matematiksel olarak modellemek için çizge teori kullanılmaktadır [1]. Çizge teoride, bir modeldeki noktaya ya da merkeze tepe karşılık gelmektedir ve benzer şekilde bir modeldeki kenar, hat ya da bağlantılara ayrıt karşılık gelir. Çizge teoride tepeler kümesi $V(G)$, ayrıtlar kümesi $E(G)$ olarak gösterilir [2]. Bu makalede kullanılan tanımlar [2] kitabından alınmıştır.

Ağ yapıların elemanlarının zarara uğraması sonrası durumlar için zedelenme kavramı ortaya çıkmaktadır [1]. Bir ağın ya da yapının merkezlerinin ya da bağlantı hatlarının zarar gördükten sonra ağın ya da yapının işlevini yitirene kadar gösterdiği direnç ya da dayanma gücüne zedelenebilirlik denir [1]. Zedelenebilirlik kavramını incelemek için internet sağlayıcıları bir örnek olarak ele alınabilir. Çizgede; her bir müşteri merkezi, müşteriler arasındaki hatlar da ayrıtları temsil etsin. Burada, internet sağlayıcısının tüm müşterilerine mümkün olan en iyi hizmeti sunması hedeflenmiştir. İnternet sağlayıcısı, birtakım durumlardan dolayı sorunlar

yaşayabilecektir. Örneğin sadece bir müşteride var olan bir sıkıntı bütün herkese etki etmeyebilir. Ağ uygun bir şekilde çalışmakta olup sadece müşterinin sorunu giderilerek makul bir sürede sorun aşılmış olacaktır. Benzer şekilde bir mahallede birtakım sorunlar olduğunda durum incelendiğinde, sorunların çözümü için bu mahalleye yeni bir hat döşenmesi çözüm olabilir veya mahallenin bakıma alınması durumları ele alınmalıdır. Burada önemli olan durum, bu sıkıntının çözümünün zaman ve faaliyet açısından irdelenmesidir. Daha genel olarak il bazında sorunlar oluşabilecektir. Çözüm için başka bölgelerden sıkıntılı ile internet akışı sağlanabilmesi gibi vb. başka çözümler önceden üretilecektir. Amacımız, sorunlar oluşmadan önce bu durumları göz önüne alıp yapılabilecek tüm çözümleri hazır hale getirmektir.

Çizgilerde zedelenebilirlik kavramı için çizgelerin tepeleri, ayrıtları, komşuluk ve ağırlıklandırılma durumları incelenebilmektedir. Bunlarla ilgili olarak birçok zedelenebilirlik ölçümleri ortaya çıkmıştır.

Zedelenebilirlikte tepe durumlarını incelemek için bir örnek verelim. İnternet ağı için merkez olarak gösterilen müşterileri ve internet sağlayıcıları düşünelim. Müşterilerde var olan sıkıntılar ya da internet sağlayıcıları için bazı sıkıntılar ortaya çıkabilir. Burada birkaç durum ortaya çıkar. Bunlar yapı zarar gördükten sonra kaç parçaya bölündü, geriye kalan yapıda hizmete devam eden en çok kaç müşteriye sahip ya da kaç müşteri zarar gördü vb. sorunlar olmaktadır. Bu sorunları incelemek için bağlantılılık sayısı [1], saçılım sayısı [3] gibi zedelenebilirlik ölçümleri tanımlanmıştır.

Zedelenebilirlikte ayrıtların durumlarını incelemek için bir örnek verelim. Lojistik taşıma ağını ele alalım. Karayollarında ortaya çıkabilecek durumları incelediğimizde yol yapım çalışmaları, kazalar ya da meteorolojik hava durumlarına göre yollar kapanabilmektedir. Bu tarz durumlarda merkezler arasında yollar hâlâ var mı, ya da lojistik ağı kaç parçaya bölündü, ya da birbiriyle etkileşimli kaç merkez vardır? Bu tarz soruları arttırabiliriz. Bu durumların yanıtları için ayrıt bütünlük değeri [1], ayrıt saçılım sayısı [4,5] gibi zedelenebilirlik ölçümleri tanımlanmıştır.

Zedelenebilirlikte komşuluk durumları için inceleme yaptığımız durum olarak bir örnek verelim. Bilgisayar ağları için bazı durumlarda virüs girerek ağa zarar verdiği durumu ele alalım. Bu durumlarda merkez ve ağdaki bu merkeze komşu olan tüm merkezler de zarar görür. Bu durumlarda ağda iletişim devam ediyor mu, ya da ağ kaç kısma bölündü, ya da kaç merkez zarar gördü şeklinde sorular üretilebilir. Bu sorunlar için bağlama sayısı [6], komşu saçılım sayısı [7] gibi zedelenebilirlik ölçümleri tanımlanmıştır.

Çizgelerde tepeler ağırlıklandırılmış ise bu çizgelere ağırlıklı çizgeler denir [2]. Zedelenebilirlikte ağırlıklı

ağ yapılarını incelemeyi bir örnek ile açıklayalım. Su taşıma ağını ele alalım. Barajlar ya da su kaynaklarından tüm hane halkına ya da kullanıcılara su ulaşması gerekmektedir. Taşınan su miktarının hane halkına yetmesi gerekmektedir. Bunun için var olan ağların merkezlerine ağırlık verilerek ağ içinde taşıma durumuyla birlikte müşterilere suyun ulaşması sağlanmaktadır. Burada önemli olan barajların ya da kaynakların korunmasıdır. Su hatları zarara uğradığında su dağıtımının yine devam etmesi gereklidir. Ayrıca taşınan su miktarının hane halkına yetmesi gerekmektedir. Bu kaynaklar zarara uğradığında yine benzer sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlara çözüm bulmak için ağırlıklı saçılım sayısı [7], ağırlıklı bütünlük sayısı [8] kavramları tanımlanmıştır.

Yukarıda verilen örnekler dışında birçok zedelenebilirlik parametreleri tanımlanmış ve birçok çalışma yapılmıştır [9-14].

2. Ağırlıklı Bağlama Sayısı

Zedelenebilirlik parametreleri incelendiğinde bazı durumlarda var olan parametre ayırt edici özellikte olamamaktadır. Örneğin saçılım sayısı her durum için uygun sonuç üretilemediği için tepelerin ağırlıklı durumları için ağırlıklı saçılım sayısı üretilmiştir. Benzer durumdan bağlama sayısı için bu geliştirme yöntemiyle ağırlıklı bağlama sayısı ilk kez bizim tarafımızdan verilecektir.

2.1. Tanım

Ağırlıklı bağlama sayısının tanımı aşağıda verilecektir.

Tanım 1. G bağlantılı, $v \in V(G)$ ve $w: V \rightarrow R \geq 0$ ağırlık fonksiyonlu bir çizge olmak üzere **ağırlıklı bağlama sayısı**; $bind_{vw}(G)$ ile gösterilir ve tanımı

$$bind_{vw}(G) = \min_{S \in F(G)} \left\{ \frac{w(N(S))}{w(S)} \right\} \quad (1)$$

Burada S , çizgede seçilen kümeyi, $w(S) = \sum_{v \in S} w(v)$ ise çizgede seçilen kümedeki tepe kümesindeki ağırlıklar toplamını, $N(S)$: çizgeden seçilen tepelere komşu olan tepeler kümesini, $w(N(S)) = \sum_{v \in N(S)} w(v)$ ise çizgede seçilen tepelere komşu tepelerin ağırlıkların toplamını ifade eder. Burada $F(G) = \{ S \subseteq V(G) \mid S \neq \emptyset, N(S) \neq V(G) \}$ olmalıdır.

Ağırlıklı bağlama sayısında istenen çözümün minimum olması istenmektedir.

2.2 Motivasyon

Bağlama sayısı çizgeler için zedelenebilirlik parametresi olarak kullanılsa da, bazı özel çizgeler için ayırt edici parametre olarak kullanılamamaktadır. Ağırlıksız çizgelerde tepelerin ağırlığı 1 kabul edilmektedir. Ağırlıklı çizgeler, ağırlıksız çizgeleri de

içerdiği için çoğu çizge için ayırt edici bir parametre olarak kullanılabilir.

Teorem 1 [6]. $n \geq 1$ çift tepeli yol çizgesi için

$$bind(P_n) = 1, \quad (2)$$

n tek tepeli yol çizgesi ise,

$$bind(P_n) = \frac{(n-1)}{n-2}. \quad (3)$$

Teorem 2 [6]. $n \geq 1$ yıldız çizgesi için

$$bind(K_{1,n}) = \frac{1}{n}. \quad (4)$$

Örnek 1. Ağırlıksız yol çizgenin bağlama sayı değeri tüm çift ve tek tüm durumlarda aynı değeri verecektir. Ancak ağırlıklı bağlama sayısı durumunda ağırlıklı yol çizgesi için farklı değerler olacağından çizgeler için ayırt edicidir.

Örnek 2. Ağırlıksız yıldız çizge için bağlama sayısı her durumda $\frac{1}{n}$ olacak olup ağırlıklı yıldız çizge için ağırlıklı bağlama sayısı her durumda farklı olacaktır.

Örnek 1 ve 2' den kolayca görülebileceği üzere ağırlıklı çizgeler ağırlıksız çizgeleri de içerdiği için birçok durumda daha iyi ayırt edici özelliğe sahiptir.

3. Ağırlıklı Bağlama Sayısı Algoritması ve Pseudo Kodu

Zedelenebilirlik parametrelerinin algoritmalarıyla ya da pseudo kodlarıyla ilgili olarak şimdiye kadar birçok çalışma yapılmıştır [15-18].

Bu bölümde yeni tanımladığımız ağırlıklı bağlama sayısı için bu parametrenin değerini bulan algoritma, pseudo kodu ve karmaşıklık değeri verilmiştir.

3.1 Algoritma.

- Ağırlıklı Bağlama Sayısı ($bind_{vw}$) Algoritması

1. Girdi: G Çizgesi
2. G çizgesi için S_i seçimlerinden tüm iterasyonları üret ve oluşun sonuçları listeye (s_vertex_list) ekle. ($n = |V(G)|$; $|S_i| = |s_vertex_list| = 2^n - 2$)
3. **Tüm** S_i seçim iterasyonunda;
 - 3.1. S_i seçim iterasyonu için, G çizgesine uygulayıp geriye kalan tepeleri hesapla ve elde edilen sonuçları listeye ata ($cutted_vertex_list$)
 - 3.2. **Tüm** S_i seçim iterasyonunda;
 - 3.2.1. **Tüm** S_i seçim iterasyonu elemanı için;
 - 3.2.1.1. S_i seçim kümesindeki iterasyon için elemanların komşuluklarını bul ve bu tepeleri listeye (n_vertex_list) ekle. (G_{adj} matrisi kullanarak geriye kalan tepeler için listelerde komşulukları incele.)

3.2.1.2. Komşuluk bitmiş ise bu tepayı diğer tepeler ($other_vertex_list$) listesi elemanı olarak ekle.

3.3. Komşu tepeler listesindeki (n_vertex_list) aynı elemanları temizle

3.4. Diğer tepeler listesindeki ($other_vertex_list$) aynı elemanları temizle

3.5. $F(G)$ ağırlıklı bağlama sayısı şartına uygun olan S_i seçim iterasyonlarında;

3.5.1. S_i seçim iterasyonundaki ağırlıklar toplamını hesapla. ($w(S_i)$)

3.5.2. S_i seçim iterasyonundaki komşuluktaki tepelerin toplam ağırlıklarını hesapla. ($w(N(S_i)_i)$)

3.5.3. Tanımdan $w(N(S_i)_i) / w(S_i)$ oranını S_i için $bind_{vwi}$ değerini bulup hesapla ve değeri listeye ekle ($sample_bindw_list$)

3.5.4. S_i , n_vertex_list , $bind_{vwi}$ değerlerini $sample_result_list$ listesine ekle

4. Hesaplanan $bind_{vwi}$ değerleri ($sample_bindw_list$) içerisinden, minimum olanı G çizgesi için ağırlıklı bağlama sayısı ($bind_{vw}$) değeri olarak sakla.

5. Çıktı: G çizgesinin ağırlıklı bağlama sayısını ($bind_{vw}$) değeri olarak yaz.

3.2. Pseudo Kodu

Ağırlıklı Bağlama Sayısı ($bind_{vw}$) Pseudo Kodu

Girdi: G , ağırlıklı çizge

Çıktı: G çizgesi için ağırlıklı bağlama sayısını ($bind_{vw}$) Başla

SET $sample_bindw_list$ TO []

S_i kümesi için $bind_{vwi}$ hesaplamalarını saklar.

SET $sample_result_list$ TO [] # S_i kümesi için S_i , n_vertex_list ve $bind_{vwi}$ durumlarını saklar.

SET G_{adj} TO $sample_list[sample_index][0].copy()$

G çizgesi için $adjoint$ matris

SET G_w TO $sample_list[sample_index][1].copy()$

G çizgesinin ağırlıkları

SET $sample_vertex_count$ TO $len(G_{adj})$

G çizgesi tepe sayısı

S_i seçim iterasyonları bulunmakta

SET $iteration_vertex_list$ TO $list(powerset(range(1, sample_vertex_count + 1)))$

FOR s_vertex_list IN $iteration_vertex_list$:

($2^n - 2$ kez çalışmaktadır)

SET n_vertex_list TO []

S_i kümesinin komşuluklarını tutar ($N(S_i)_i$)

SET $other_vertex_list$ TO []

$Other$, N_i 'nin komşularını tutar ($O(N_i)_i$)

S_i kümesi G 'ye uygulandığında çizgedeki geriye

kalan tepeleri bul. (n^2 defa çalışmaktadır)

SET $cutted_vertex_list$ TO

$core.find_cutted_vertex(s_vertex_list,$

$sample_vertex_count)$

FOR s_vertex_index IN $range(0, len(s_vertex_list))$:

($n-1$) defa uygulanır

SET s_vertex TO $s_vertex_list[s_vertex_index]$

seçilen tepe numarasını sakla G_{adj} içinde a index'i

ile $cutted_vertex$ 'nolu tepe için komşulukları arıyor.

```

FOR g_index IN range(0, sample_vertex_count):
# n defa çalışır incelenen tepe, seçilen tepeye KOMŞU
# ise koşul şartları sağlanmalı.
IF Gadj[s_vertex - 1][g_index] EQUALS 1 and g_index + 1:
# koşul sağlandığında: cutted_vertex numaralı tepe,
# a + 1, ile komşu tepedir
n_vertex_list.append(g_index + 1)
# n-1 komşu tepe listesine ekle
ELSE:
IF g_index + 1 not IN s_vertex_list and g_index + 1 IN
cutted_vertex_list:
# incelenen tepe (g_index + 1); seçilen kümesine
# dahil değil ve seçilen kümede de komşu olan tepe
# değil ve geriye kalan tepeler dahil olma durumunda
other_vertex_list.append(g_index + 1)
# FOR3: end
# FOR2: end
# n_vertex_list ile other_vertex_list listeleri içinden
# aynı elemanlar siliniyor.
SET n_vertex_list TO list(dict.fromkeys(n_vertex_list))
SET other_vertex_list TO
list(dict.fromkeys(other_vertex_list))
IF len(n_vertex_list) < sample_vertex_count:
# F(G) genel şartımız
SET s_count TO len(s_vertex_list)
# seçim kümesi için tepe sayısı
SET n_count TO len(n_vertex_list)
# komşuluk için tepe sayısı
SET bind TO (n_count / s_count)
# bind değeri bulundu
SET Sw TO
core.calculate_s_vertex_weight(s_vertex_list, Gw)
# w(Si) (n kez)
SET Nw TO
core.calculate_n_vertex_weight(n_vertex_list, Gw)
# w(Ni) (n kez)
SET bindw TO Nw / Sw # bindvwi değerini bul
sample_bindw_list.append(bindw)
# sonuç listesine bindvwi değerini ekle
# FOR1: end
SET BINDw TO min(sample_bindw_list)
# G çizgesi için bulunan bindvw değeri
# END of Program

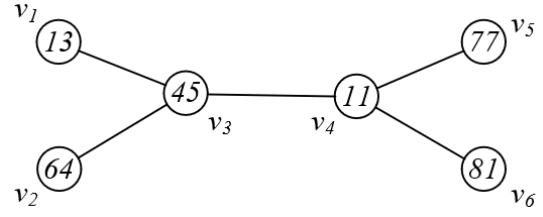
```

Bu algoritmamızda tek bir seçim iterasyonundan oluşan karmaşıklık $O(n^2)$ ' dir. Var olan her seçim stratejisi dahil edildiğinde elde edilen karmaşıklık değerimiz $O(2^n)$ ' dir. Buradan algoritma için genel karmaşıklığımız $O(2^n)$ ' olacaktır.

4. Ağırlıklı Bağlama Sayısı Algoritma Uygulaması

Ağırlıklı Bağlama Sayısı ($bind_{vw}$) hesaplaması aşağıda verilen örnek uygulama ile açıklanmıştır.

Örnek 3. Şekil 1'de örnek olarak 6 tepeli, ağırlıklı bir G çizgesi ele alınmıştır. Bu çizgelerin tepelerinin ağırlıkları sırasıyla $v_1=13$, $v_2=64$, $v_3=45$, $v_4=11$, $v_5=77$, $v_6=81$ dir.



Şekil 1. Ağırlıklı G çizgesi.

Şekil 1' deki 6 tepeli G çizgesi ele alındığında, S_i kümesi için $F(G)$ şartını sağlayan iterasyonlarda incelenecek küme sayısı $S_i = 2^6 - 2 = 62$ olarak elde edilir. Tüm S_i kümeleri için $bind_{vw}$ değerleri bulunmaktadır.

Tüm durumlar Tablo 1' de verilmiştir. Burada S_i : seçim iterasyonlarını, $N(S)$: seçim kümesinin komşuluklarını, $w(N(S))/w(S)$: ağırlıklar cinsinden tanımdaki toplamalarının oranını, $bind_{vw}$ değeri olacak şekilde aşağıda verilen Tablo 1'de gösterilmiştir. Tabloda, $F(G)$ şartını sağlamayan seçim iterasyonları için hesaplamaya tanımdan dolayı dahil edilmemiştir.

Tablo 1. G çizgesinde ağırlıklı bağlama sayısı ($bind_{vw}$) durumları

$S_i = S$	$N(S)$	$w(N(S)) / w(S)$	$bind_{vw}$
$S_1 = \{v_1\}$	$\{v_3\}$	45 / 13	3.462
$S_2 = \{v_2\}$	$\{v_3\}$	45 / 64	0.703
$S_3 = \{v_3\}$	$\{v_1, v_2, v_4\}$	88 / 45	1.956
$S_4 = \{v_4\}$	$\{v_3, v_5, v_6\}$	203 / 11	18.455
$S_5 = \{v_5\}$	$\{v_4\}$	11 / 77	0.143
$S_6 = \{v_6\}$	$\{v_4\}$	11 / 81	0.136
$S_7 = \{v_1, v_2\}$	$\{v_3\}$	45 / 77	0.584
$S_8 = \{v_1, v_3\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 58	2.293
$S_9 = \{v_1, v_4\}$	$\{v_3, v_5, v_6\}$	203 / 24	8.458
$S_{10} = \{v_1, v_5\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 90	0.622
$S_{11} = \{v_1, v_6\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 94	0.596
$S_{12} = \{v_2, v_3\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 109	1.220
$S_{13} = \{v_2, v_4\}$	$\{v_3, v_5, v_6\}$	203 / 75	2.707
$S_{14} = \{v_2, v_5\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 141	0.397
$S_{15} = \{v_2, v_6\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 145	0.386
$S_{16} = \{v_3, v_4\}$	$\{v_1, v_2, v_4, v_3, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{17} = \{v_3, v_5\}$	$\{v_1, v_2, v_4\}$	88 / 122	0.721
$S_{18} = \{v_3, v_6\}$	$\{v_1, v_2, v_4\}$	88 / 126	0.698
$S_{19} = \{v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_5, 6, v_4\}$	214 / 88	2.432
$S_{20} = \{v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_5, 6, v_4\}$	214 / 92	2.326
$S_{21} = \{v_5, v_6\}$	$\{v_4\}$	11 / 158	0.070
$S_{22} = \{v_1, v_2, v_3\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 122	1.090
$S_{23} = \{v_1, v_2, v_4\}$	$\{v_3, v_5, v_6\}$	203 / 88	2.307
$S_{24} = \{v_1, v_2, v_5\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 154	0.364
$S_{25} = \{v_1, v_2, v_6\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 158	0.354

$S_{26} = \{v_1, v_3, v_4\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{27} = \{v_1, v_3, v_5\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 135	0.985
$S_{28} = \{v_1, v_3, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 139	0.957
$S_{28} = \{v_1, v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 101	2.119
$S_{30} = \{v_1, v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 105	2.038
$S_{31} = \{v_1, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 171	0.327
$S_{32} = \{v_2, v_3, v_4\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{33} = \{v_2, v_3, v_5\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 186	0.715
$S_{34} = \{v_2, v_3, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 190	0.700
$S_{35} = \{v_2, v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 152	1.408
$S_{36} = \{v_2, v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 156	1.372
$S_{37} = \{v_2, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 222	0.252
$S_{38} = \{v_3, v_4, v_5\}$	$\{v_1, v_2, v_4, v_3, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{39} = \{v_3, v_4, v_6\}$	$\{v_1, v_2, v_4, v_3, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{40} = \{v_3, v_5, v_6\}$	$\{v_1, v_2, v_4\}$	88 / 203	0.433
$S_{41} = \{v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 169	1.266
$S_{42} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{43} = \{v_1, v_2, v_3, v_5\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 199	0.668
$S_{44} = \{v_1, v_2, v_3, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 203	0.655
$S_{45} = \{v_1, v_2, v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 165	1.297
$S_{46} = \{v_1, v_2, v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 169	1.266
$S_{47} = \{v_1, v_2, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_4\}$	56 / 235	0.238
$S_{48} = \{v_1, v_3, v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{49} = \{v_1, v_3, v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{50} = \{v_1, v_3, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 216	0.616
$S_{51} = \{v_1, v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 182	1.176
$S_{52} = \{v_2, v_3, v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{53} = \{v_2, v_3, v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{54} = \{v_2, v_3, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 267	0.498
$S_{55} = \{v_2, v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 233	0.918
$S_{56} = \{v_3, v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_1, v_2, v_4, v_3, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{57} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-

$S_{58} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{59} = \{v_1, v_2, v_3, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4\}$	133 / 280	0.475
$S_{60} = \{v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_5, v_6, v_4\}$	214 / 246	0.870
$S_{61} = \{v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-
$S_{62} = \{v_2, 3, v_4, v_5, v_6\}$	$\{v_3, v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}$	-	-

G çizgesi için tüm seçim kümeleri ele alındığında Tablo1'deki veriler elde edilir. $bind_{vw}$ değerlerinden minimum olan değer ortalama bağlama sayısı olarak seçilir.

$$\begin{aligned}
 & bind_{vw}(G) \\
 &= \min_{S \in F(G)} \left\{ \begin{array}{l} 3.462, 0.703, 1.956, 18.455, 0.143, 0.136, 0.584, \\ 2.293, 8.458, 0.622, 0.596, 1.220, 2.707, 0.397, \\ 0.386, 0, 0.721, 0.698, 2.432, 2.326, \mathbf{0.070}, 1.090, \\ 2.307, 0.364, 0.354, 0, 0.985, 0.957, 2.119, 2.038, \\ 0.327, 0, 0.715, 0.700, 1.408, 1.372, 0.252, 0, 0, \\ 0.433, 1.266, 0, 0.668, 0.655, 1.297, 1.266, 0.238, \\ 0, 0, 0.616, 1.176, 0, 0, 0.498, 0.918, 0, 0, \\ 0, 0.475, 0.870, 0, 0 \end{array} \right\} \\
 &= 0.070
 \end{aligned}$$

Bulunan değerler içinden S_{21} 'nolu iterasyonun en küçük değer 0,070 olduğu görülmektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Karşılaşılan problemler için bu problemleri çözebilmek ya da çözüm önerileri getirilmesi gerekmektedir. Günümüzde en önemli sorunlarından biri bu problemleri modelleyebilmektir. Çizge teori yardımıyla bu problemler modellenenbilmektedir. Zedelenebilirlik parametreleri ile sorunlarla karşılaşmadan önce modelin güvenilirliğiyle ilgili bilgi elde edilebilmektedir.

Zedelenebilirlik parametreleriyle ilgili olarak yaptığımız yeni parametre vasıtasıyla, çizgeler için ayırt edici bir parametre elde edilmiştir. Yeni tanımladığımız ağırlıklı bağlama sayısı, ağırlıklı ve ağırlıksız her çizge için değişken değerler göstermektedir.

Ağırlıklı bağlama sayısını hesaplayan algoritma ve pseudo kodu oluşturulmuştur. Ağırlıklı bağlama sayısı, Python dilinde detaylıca yazılmış ve birçok çizge için doğru çalıştığı görülmüştür. Ağırlıklı bağlama sayısının ayırt edilmesi için minimum olması gerekmektedir.

Algoritma bölümünde açıklandığı gibi, algoritmamızda tek bir seçim iterasyonundan oluşan karmaşıklık $O(n^2)$ 'dir. Var olan her seçim durumu stratejisi dahil edildiğinde elde edilen karmaşıklık değerimiz $O(2^n)$ 'dir. Buradan algoritma için genel karmaşıklığımız $O(2^n)$ olacaktır.

Avantaj: Elde edilen sonuçlardan; ağırlıklı bağlama sayısının her durumda aynı çizgeler için bile ayırt edici ve daha hassas bir parametre olduğu görülmektedir. Ağırlık kavramı ile tüm durumlar detaylıca incelenebilir. Böylece oluşturduğumuz parametrenin yapılan çalışmalar doğrultusunda iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Dezavantaj: Algoritmamızın, çok tepeli çizgeler için sonuçlar vermesi uzun zaman almaktadır.

Etik Beyanı

*Bu çalışma birinci yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Barefoot, C. A., Entringer, R., Swart, H.C. 1987. Vulnerability in graphs- a comparative survey. J. Combin. Math. Combin. Comput., 1: 13-22.
- [2] Harary, F. Graph Theory. (1969). Addison-Wesley Publishing, 1-274 s.
- [3] Jung, H.A. 1978. On a class of posets and the corresponding comparability graphs. J. Combin. Theory Ser. B 24, 125-133.
- [4] Aslan, E. 2014. A Measure of Graphs Vulnerability: Edge Scattering Number. Bull.Soc.Math.Banja Luka, 4, 53 - 60.
- [5] Aslan, E., Kürkcü, Ö. 2015. Edge Scattering Number of Gear Graphs. Bull.Soc.Math.Banja Luka, 5, 25-31.
- [6] Woodall, D. R. 1973. The binding number of a graph and its Anderson number. J. Combinatorial Theory Ser. B 15 225-255.
- [7] Li, F., Li, X. 2007. The neighbour-scattering number can be computed in polynomial time for interval graphs. Computers & Mathematics with Applications, 54 (5), 679-686.
- [8] Ray, S., Kannan, R., Zhang, D., Jiang H. 2006. The weighted integrity problem is polynomial for interval graphs, Ars Combin., 79, 77-95.
- [9] Arumugam, S., Velammal, S. 1998. Edge Domination in Graphs. Taiwanese Journal of Mathematics, 2(2) 173-179.
- [10] Aytaç A., Turacı, T., Odabaş, Z.N. 2013. On the bondage number of middle graphs. Mathematical Notes, 93, 95-101.
- [11] Aytaç A., Turacı, T., Odabaş, Z.N. 2016. Bondage and Strong-Weak Bondage Numbers of Transformation Graphs G_{xyz} , Inter. Jour.of Pure and App. Math., 106,(2), 689-698.
- [12] Bagga, K.S., Beineke, L.W., Lipman M.J., Pippert, R.E. 1994. Edge-integrity: a survey. Discrete Mathematics, 124, 3-12.
- [13] Kaval, B., Kırlangıç, A. 2024. Domination Scattering Number in Graphs. Journal of New Theory, 49, 53 - 61.
- [14] Tokat, H., Kırlangıç, A. 2019. On the Domination Integrity. International Journal of Foundations of Computer Science, 30(5), 811-826.
- [15] Aslan, E. Tosun, M.A., 2021. Computing the weighted neighbor isolated tenacity of interval graphs in polynomial time. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 37(3), 2540-2549.
- [16] Durgut, R., Turacı, T., Kutucu, H. 2019. A heuristic algorithm to find rupture degree in graphs. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 7: 3433 - 3441.
- [17] Golumbic, M.C. 1980. Algorithmic Graph Theory and Perfect Graphs. Computer Science and Applied Mathematics Academic Press, New York.
- [18] Li, F., Zhang, X., Broesmersma, H. 2019. A polynomial algorithm for weighted scattering number in interval graphs. Discrete Applied Mathematics, 264, 118-124.

Corrosion Performance and Protection of Centrifuged Hot-Dip Galvanized Coatings (CHDG) on St37 Steel Hooks in GFRC Façade Systems: A Case Study

Hüsni GERENGİ¹, Muhammed MARAŞLI², Doğu RAMAZANOĞLU³, Kader COŞKUN⁴, Mesut YILDIZ⁵, Gözen BEREKET⁶

^{1,5}Düzce University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Corrosion Research Laboratory, 81620 Düzce, Türkiye

^{2,4}Fibrobeton Company R&D Center, 81100 Düzce, Türkiye

³Istanbul Gedik University, Engineering Faculty, Department of Nanotechnology Engineering, 34876, Istanbul, Türkiye

⁶Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Arts and Science, Department of Chemistry, 26480 Eskisehir, Türkiye

(Alınış / Received: 06.05.2025, Kabul / Accepted: 08.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Corrosion resistance,
Centrifuged hot-dip
galvanization,
St37 steel,
Hook,
GFRC

Abstract: St37 steel hooks are used to attach glass fiber-reinforced concrete (GFRC) panels to the surface of buildings. The corrosion products formed on the surface of the hooks cause tensile stresses in the surrounding concrete, resulting in cracking and potentially decreasing the load-carrying capacity of the hooks. It is, therefore, essential to protect these hooks from corrosion. Centrifugal hot-dip galvanizing (CHDG) is the preferred process, particularly for protecting small metal parts used in outdoor applications. This study is the first one aiming to investigate the protection effect of the CHDG coating on hooks used in the assembly of GFRC panels. GFRC panel hooks are often used in three different configurations during the assembly process. To evaluate this, the three most common hook assemblies were tested: unmounted (A), hooks embedded in GFRC (PD), and mounted with the hot-dip galvanized profile (KT). These were investigated for 96 hours at 35 ± 2 °C in a continuous salt fog environment with 5 wt.% NaCl solution, according to ASTM B117 standards. The cross-sectional morphologies of the St37 steel hook coated with CHDG before and after the salt spray test were examined using a scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS). The test results show the absence of red rust in all the test specimens, indicating that the CHDG coating protects the tested hooks from corrosion. The formed ZnO layer allows the repair of coating defects and provides physical protection of the coatings against the penetration of aggressive ions.

GFRC Cephe Sistemlerinde St37 Çelik Kancalar Üzerinde Santrifüjlü Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamaların (CHDG) Korozyon Performansı ve Korunumu: Bir Vaka Çalışması

Anahtar Kelimeler

Korozyon direnci,
Santrifüjlü sıcak daldırma
galvaniz,
St37 çelik,
Kanca,
GFRC

Öz: St37 çelik kancalar, cam elyaf takviyeli beton (GFRC) panelleri binaların yüzeyine tutturmak için kullanılmaktadır. Kancaların yüzeyinde oluşan korozyon ürünleri çevredeki betonda çekme gerilmelerine neden olarak çatlamalara yol açmakta ve kancaların yük taşıma kapasitesini potansiyel olarak azaltmaktadır. Bu nedenle, bu kancaları korozyondan korumak çok önemlidir. Santrifüj sıcak daldırma galvanizleme (CHDG), özellikle dış mekan uygulamalarında kullanılan küçük metal parçaların korunması için tercih edilen bir işlemdir. Bu çalışma, GFRC panellerin montajında kullanılan kancalar üzerinde CHDG kaplamanın koruma etkisini

araştırmayı amaçlayan ilk çalışmadır. GFRC panel kancaları, montaj işlemi sırasında genellikle üç farklı konfigürasyonda kullanılmaktadır. Bunu değerlendirmek için en yaygın üç kanca düzeneği test edilmiştir: monte edilmemiş (A), GFRC'ye gömülü kancalar (PD) ve sıcak daldırma galvanizli profil ile monte edilmiş (KT). Kancalar, ASTM B117 standartlarına göre %5 NaCl çözeltisi ile sürekli tuz sisi ortamında 35 ± 2 °C'de 96 saat süreyle incelenmiştir. Tuz püskürtme testinden önce ve sonra CHDG ile kaplanmış St37 çelik kancanın kesit morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) kullanılarak incelenmiştir. Test sonuçları, tüm test numunelerinde kırmızı pas bulunmadığını göstererek CHDG kaplamanın kancaları korozyondan koruduğunu ortaya koymuştur. Oluşan ZnO tabakası kaplama kusurlarının onarılmasına olanak tanır ve kaplamaların agresif iyonların nüfuzuna karşı fiziksel olarak korunmasını sağlamaktadır.

1. Introduction

Corrosion is a significant challenge in maintaining the integrity and longevity of materials, particularly metals like steel, which are widely used in critical infrastructure. The deterioration of these materials occurs due to chemical or electrochemical reactions with their environment, leading to loss of structural integrity and functionality [1-3]. To combat corrosion, various protective strategies are employed, including cathodic and anodic protection, protective coatings, and the use of inhibitors [4-6].

St37 carbon steel is commonly employed in the construction industry due to its advantageous mechanical characteristics, ease of fabrication, and economic feasibility [7,8]. A notable area of application involves the use of St37 steel hooks to connect or support GFRC components. These hooks play a crucial role in transferring loads and securing prefabricated concrete panels to the main structural framework. Since GFRC panels are frequently used in exterior façade and cladding systems, the durability of the embedded steel elements under environmental exposure becomes a key concern. In particular, corrosion in humid or saline atmospheres can significantly compromise the structural reliability of these connectors. Therefore, implementing effective corrosion protection strategies is essential. Among these, hot-deep galvanizing is a highly effective method, offering both barrier and sacrificial protection by forming a durable zinc coating that shields the steel from corrosive attack, thereby extending its service life in aggressive environments [9-11].

Hot-dip galvanizing is an established surface treatment technique in which steel components are coated by immersion in molten zinc, resulting in a continuous and adherent protective layer. The process ensures a strong metallurgical bond between the zinc coating and the steel substrate, enhancing the material's resistance to oxidation and corrosive environments. Hot-dip galvanizing is typically employed for coating larger metallic components, whereas the centrifugal hot-dip galvanizing (CHDG) technique is specifically developed for smaller-sized

parts. This method involves spinning the steel item within a crucible to apply centrifugal force, which facilitates the removal of surplus zinc from the surface. This approach results in a thinner, more evenly distributed zinc coating that enhances both the quality and durability of the protective layer [2].

CHDG is a process that involves immersing steel in molten zinc at approximately 450°C. This method not only provides a robust metallurgically bonded coating but also enhances the corrosion resistance of steel through a dual protective mechanism. The zinc coating acts as a physical barrier against corrosive agents while also serving sacrificially; it corrodes preferentially to protect the underlying steel from corrosion even if the surface coating is compromised [12-16].

The application of CHDG is prevalent across various industries such as automotive, construction, and appliances due to its numerous advantages, including strength, formability, low weight, cost-effectiveness, and recyclability. Research has demonstrated the effectiveness of CHDG in improving the corrosion resistance of steel grades like St37 under various environmental conditions [17-20].

Previous studies have shown that spin hot-deep galvanizing coatings, commonly used on small components such as screws and bolts, not only enhance mechanical strength but also alter the failure mechanism, leading to detachment of the zinc layer under stress [21]. In a study, the application of four different oxide-based coatings to St37 low-carbon steel via plasma spraying was found to significantly improve its surface properties [22]. A recent study investigated the application of tungsten carbide and chromium carbide–nickel chromium coatings on St37 steel surfaces using the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) spraying technique, revealing notable improvements in the mechanical and tribological properties of the coated material [23]. Another study examined the application of a nanoceramic sealant over white zinc coatings to improve the durability of metallic fasteners exposed to corrosive environments. Although the sealant significantly reduced the corrosion rate, its poor adhesion resulted in limited

wear resistance [24]. A ZnAl coating was applied to SKL14 tension clamps to improve corrosion resistance. While uncoated samples rusted completely within 1 hour, the coated samples showed only ~3% rust after 720 hours in 5% NaCl, demonstrating a significant improvement in durability [25].

CHDG and other advanced coatings offer a versatile approach to corrosion control [26]. By understanding the mechanisms behind these protective strategies - whether through physical barriers or electrochemical modifications- engineers can make informed decisions regarding material selection and treatment processes. This knowledge is vital for ensuring the longevity and reliability of structures exposed to corrosive environments [27].

Through rigorous testing methods such as the Neutral Salt Spray Test (NSS) under controlled conditions, this research aims to elucidate the performance characteristics of CHDG-coated steel in real-world scenarios [28]. The findings will not only advance theoretical knowledge but also provide practical insights for industry applications where corrosion poses a persistent threat.

While CHDG is a well-known method for enhancing the corrosion resistance of small steel components, limited research exists on its performance when applied to St37, particularly in structurally critical applications like GFRC panel anchorage. In our previous study, CHDG-coated nut samples were subjected to a 13-day corrosion test following ASTM B117, and SEM-EDS analyses confirmed the protective effectiveness of the zinc layer. The formation of a stable zinc patina through sequential reactions with oxygen, moisture, and carbon dioxide contributes significantly to long-term corrosion resistance [2].

This study specifically investigates how CHDG-coated St37 steel hooks used in GFRC panel assemblies can mitigate corrosion risks associated with their deployment in outdoor environments. Since corrosion products can induce tensile stresses leading to cracking in surrounding concrete structures, understanding and enhancing protective measures for these hooks is essential for maintaining their load-carrying capacity and overall structural integrity.

2. Material and Method

2.1. Test specimens

The specimens examined in this study consisted of St37 steel hook units categorized as follows: unmounted hooks (referred to as A), hooks embedded in GFRC panels (referred to as PD), and unmounted hook sets (referred to as KT).

These hook units were selected due to their prevalence in various engineering and construction

applications. Each specimen was carefully prepared to ensure uniformity in surface conditions and dimensions (Figure 1).

2.2. Methods

2.2.1. Test standards

The corrosion resistance evaluation followed the ASTM B117 standard [29] (Table 1), utilizing the Neutral Salt Spray Test methodology. This standard is widely recognized for its applicability in assessing the corrosion performance of materials exposed to corrosive atmospheres.

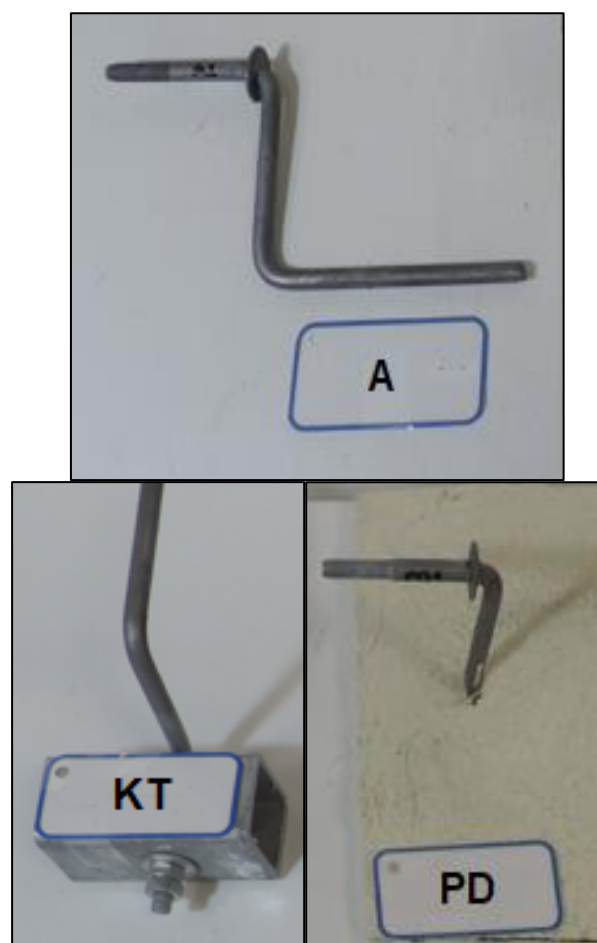


Figure 1. General view of the specimens before the test

Table 1. The ASTM B117 standard

Test Name	Test Standard	Intermediate Control Time	Test Duration
Neutral Salt spray experiments	ASTM B117	48 and 72 hours	96 hours

2.2.2. Test conditions

To replicate corrosive environmental conditions, the hook units were subjected to controlled conditions within a Salt Fog Test Chamber MT-SIS-087 (Q-LAB). The test chamber was maintained at a temperature of $35 \pm 2^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $50 \pm 5\%$ in a 5% NaCl

environment, by ASTM B117 requirements (Figure 2). The 5% NaCl solution was prepared using deionized water and analytical grade sodium chloride. The specimens were exposed to the salt spray for 96 hours. Visual inspections were conducted at 48 and 72 hours.



Figure 2. Salt spray test chamber

2.2.3. Visual assessment

The data collected from visual assessments were analyzed to determine the corrosion resistance exhibited by the CHDG St37 steel hook units. The specimens used in the test are named and sized as shown in Table 2.

Table 2. St37 steel hook units used in the test

Specimens Names	Size
A	8 cm vertical, 11 cm horizontal length with L-shaped sample
PD	25x25 cm
KT	8x4 cm
	15x4 cm

2.2.4. SEM-EDS analysis

The FEI Quanta FEG 250 model scanning electron microscope (SEM) with an energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) detector was used to observe the changes that occurred on the surfaces of the metals and to determine the elemental composition of the St37 steel hook before and after the salt spray experiments.

3. Results

3.1. Visual assessment findings

Upon completing the 96-hour neutral salt spray test, visual assessments of the St37 steel hook units with CHDG coatings revealed distinct corrosion behaviors across different specimen categories.

Observations included the presence of white rust, discoloration, and the absence of red rust. The extent of corrosion was evaluated on a percentage scale based on the surface area exhibiting corrosion-related phenomena. Visual inspection after the salt spray test revealed that specimens A and KT exhibited white rust and blackening on 40-50% of their test surfaces, while specimen PD exhibited these effects on 20-30% of its surface. Importantly, no red rust was observed on any specimen.

3.1.1. Hook units (A)

Figure 3 shows the appearance of the St37 steel hook unit-A before the neutral salt spray test. For hook unit A, visual inspections revealed corrosion primarily affecting 40% to 50% of the total surface area. White rust formation and localized discoloration were observed. Notably, there was no evidence of red rust on the samples, indicating a significant level of corrosion resistance (Figures 4, 5 and 6).



Figure 3. Appearance of unit-A before the salt spray test



Figure 4. Appearance of unit-A after the 48th hour interim control



Figure 5. Appearance of unit-A at the 72nd hour interim control

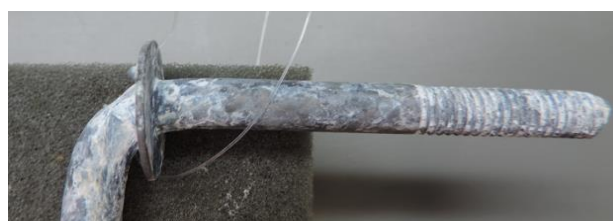


Figure 6. Appearance of unit-A after the 96th hour

3.1.2. Embedded hooks (PD)

The appearance of the St37 steel hook unit-PD before the neutral salt spray test is shown in Figure 7. In contrast to unit-A, the embedded hooks, PD, exhibited corrosion effects covering approximately 20% to 30% of their respective surfaces. The rust amount increased as the salt spray exposure time extended. Before and after the salt spray test results are shown in Figures 8, 9, and 10.

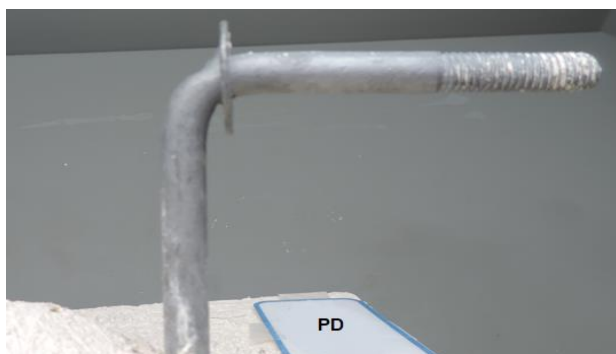


Figure 7. Appearance of unit-PD before salt spray test



Figure 8. The appearance of unit-PD, after the 48th hour



Figure 9. The appearance of unit-PD, after the 72nd hour



Figure 10. The appearance of unit-PD, after the 96th hour

White rust formation and localized discoloration were again noted, while the absence of red rust suggested moderate corrosion resistance. The metal parts

embedded in the concrete panel were tested for corrosion due to water-salt penetration using 'bonding pad test' device. It was observed that the parts separated under a force of 350 kN. No discoloration due to corrosion was detected on the removed metal anchor element (Figure 11).

3.1.3. Hook sets (KT)

Figure 12 shows the appearance of the St37 steel hook sets before the neutral salt spray test. The hook sets exhibited similar corrosion patterns to the hook units, with approximately 40% to 50% of the surface area affected. White rust and localized discoloration were observed, but red rust was not evident (Figures 13, 14, and 15).



Figure 11. No rust was observed on embedded parts after severe corrosion



Figure 12. The appearance of the hook sets, before the salt spray test



Figure 13. The appearance of the hook sets, after the 48th hour interim control



Figure 14. The appearance of the hook sets after the 72nd hour interim control



Figure 15. The appearance of the hook sets after the 96th hour interim control

The results from visual assessments indicate that all specimens exhibited varying degrees of corrosion resistance. The absence of red rust across all specimen categories suggests that the CHDG coatings effectively protected against severe corrosion.

3.2. SEM-EDS analysis

The cross-sectional SEM images were obtained for the St37 steel hook coated by the CHDG method before (Figure 16) and after (Figure 17) the salt spray test, and the compositional analysis was performed by EDS.

Galvanic protection through the CHDG process enhances the overall corrosion resistance of zinc by keeping the steel passive while allowing Zn to form ZnO (Figure 18) [30]. The protective capabilities of the CHDG coating are attributed to three main effects: the barrier effect, the galvanic protection, and the self-healing ability. These properties enable their widespread use in industry by significantly extending the lifespan of metals in corrosive environments. The barrier effect occurs when zinc coatings prevent direct contact between the underlying metal and the corrosive environment, inhibiting the ingress of water and oxygen, thereby effectively reducing corrosion rates. This effect is primarily achieved by coatings that prevent corrosive agents from reaching the metal surface. Notably, even if the zinc coating is damaged, the barrier effect continues to provide protection against environmental factors [31].

Figure 16 shows that the coating thickness of the St37 steel hook coated by the CHDG method before the experiment was 82.79 μm . The results of the EDS and elemental mapping analyses showed that the metal surface was coated with Zn. The EDS analysis performed on Spot 1 showed a composition of 89.4% Zn, 7.6% Fe, and 3.1% O, while the results from Spot 2 showed a Fe ratio of 97.3% and an O ratio of 1.3%, with no Zn detected. Examination of the SEM images taken from the section after the corrosion test revealed that the coating thickness had increased to 135.83 μm (Figure 17). The increase in the thickness of the zinc (Zn) layer can be attributed to the formation of oxide layers on the surface. EDS analysis of the cross-section of the St37 steel hook after the salt spray test revealed the elemental composition at Spot 1 as follows: 39.2% Zn, 55.2% O, and 0.5% Fe. The EDS results obtained from Spot 2 showed a composition of 71.5% Zn, 19.2% O and 5.8% Fe. In contrast, the EDS results from Spot 3 showed a different composition consisting of 94.7% Fe and 1.6% O, with no detectable zinc present. Based on the EDS and elemental mapping results, it was observed that distinct oxide layers had formed on the upper surfaces of the coating. These results indicate a significant chemical transformation, probably due to oxidation processes during the test or environmental exposure. Elemental mapping clearly highlighted the distribution of oxygen across the surface, indicating that oxide formation was concentrated in the upper regions of the coating. According to the EDS results from Spot 1 and Spot 2 in Figure 16 and Figure 17, the increase in O ratio (52.1%) and decrease in Zn (50.2%) ratio on the St37 steel hook's surface could be attributed to the formation of various oxide and hydroxide layers.

Potential substances that might be responsible for the corrosion layer seen on the CHDG-coated surface include zinc oxide (ZnO), zinc hydroxide chloride hydrate ($\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$), and zinc carbonate hydroxide ($\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$) [32]. Among these compounds, white rust—which is largely made up of zinc hydroxide ($\text{Zn}(\text{OH})_2$) and basic zinc salts like $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ —typically occurs in environments with high humidity and low oxygen levels. Although white rust can serve as a temporary shield initially, it is generally viewed as an unfavorable corrosion product in the long run due to its porous and weakly attached quality. In contrast to stable and tightly bonded ZnO layers, which provide long-lasting protection, white rust has poor adhesion and barrier characteristics, ultimately diminishing the overall effectiveness of corrosion resistance over time [33]. Still, the findings from this study indicate that the CHDG technique successfully safeguards the St37 steel hook from corrosion, as demonstrated by the lack of red rust on all the specimens tested [34].

4. Discussion and Conclusion

The results of this research confirm that CHDG coatings significantly enhance the corrosion protection of St37 hooks used in GFRC panel façades. The absence of red rust in all samples tested highlights the effectiveness of CHDG in corrosive environments. A noteworthy observation was the thin ZnO layer formed on the surface of the coated hooks, which not only covers any cracks but also provides self-healing properties to areas where the coating may have deteriorated. This uniform thickness of the ZnO layer ensures prolonged protection for the steel substrate, even when the coating experiences surface damage or interruptions. The SEM-EDS analysis reveals the morphology of the samples and elemental distribution, demonstrating that the CHDG method is an effective way to safeguard St37 steel hooks against corrosion.

These findings hold considerable practical implications for materials engineering and design, especially in applications where corrosion poses a critical challenge. The incorporation of CHDG coatings in infrastructure and construction can greatly extend the service life and structural integrity of vulnerable components exposed to harsh climatic conditions.

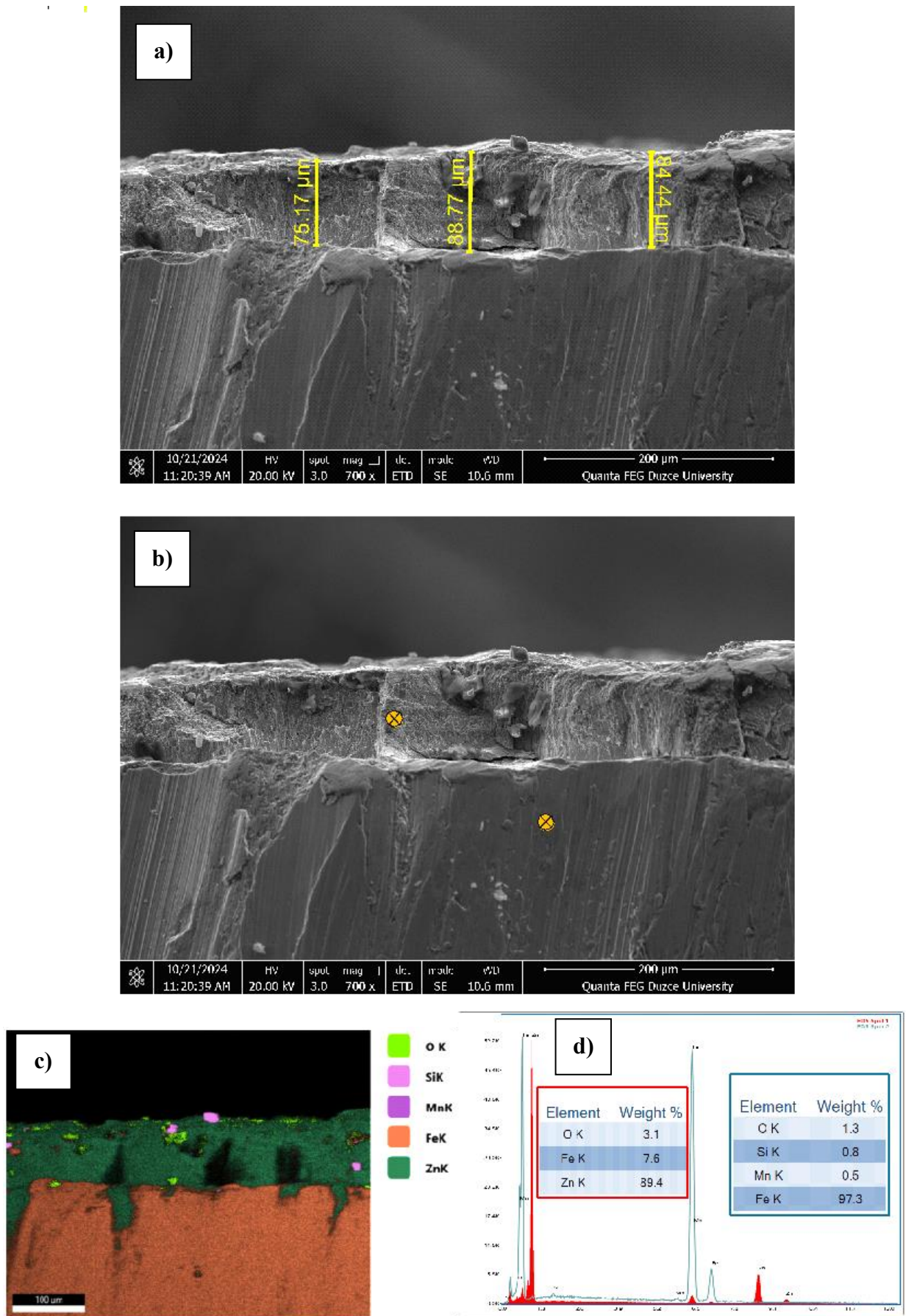


Figure 16. SEM-EDS analysis of the cross-section of CHDG coated St37 steel hook before salt spray test; a) thickness of the coating, b) SEM image (200 µm), c) elemental mapping, d) EDS spectrum

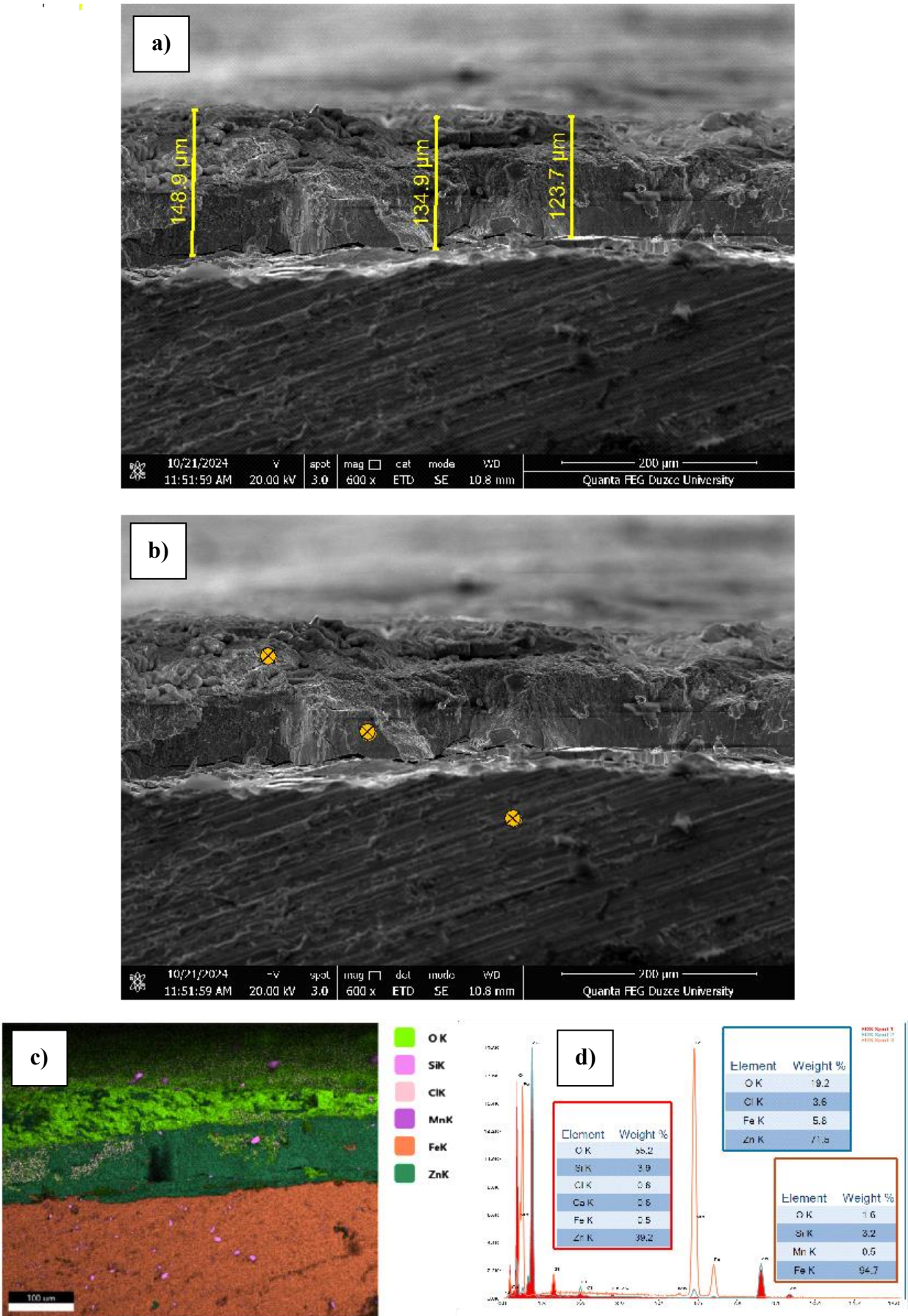


Figure 17. SEM-EDS analysis of the cross-section of CHDG coated St37 steel hook after salt spray test; a) thickness of the coating, b) SEM image (200 μm), c) elemental mapping, d) EDS spectrum

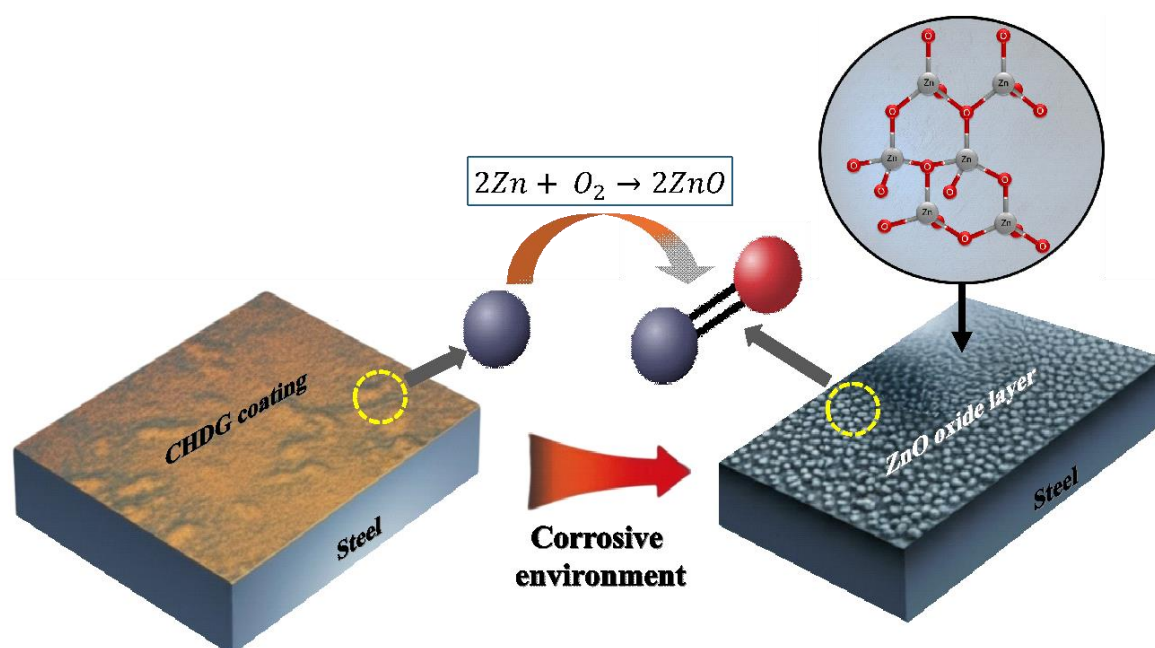


Figure 18. The formation of ZnO on the surface of steel coated with CHDG in a corrosive environment

Future research should focus on exploring the long-term performance of CHDG-coated components in a variety of environmental conditions to validate and expand upon existing findings. To achieve this, it would be beneficial to apply simulated real-world test protocols involving cyclic changes in temperature, humidity, etc. and electrochemical corrosion measurement methods. Such dynamic environmental testing will provide valuable data on the durability of the coatings, while also elucidating the effect of increased ZnO film thickness on corrosion resistance and structural integrity. To effectively demonstrate the advantages of CHDG coatings, future studies should also include comparative analyses with uncoated (bare) St37 steel façades. Results obtained under identical environmental and mechanical conditions will reveal the protective benefits provided by the coating.

This study clearly demonstrates that CHDG coatings significantly improve the corrosion resistance of St37 steel hooks used in GFRC façades, providing durable solutions for the construction industry and paving the way for future research in this field.

Acknowledgment

This scientific study was conducted through a university-industry collaboration between the Corrosion Research Laboratory of Düzce University and the R&D Centre of Fibrobeton Company. The authors would like to extend their sincere thanks to Faik Ali Birinci, Volkan Özdal, Volkan Akmaz, Sedat Enveş, Yasemin Hatipoğlu, and from the Fibrobeton R&D Centre, as well as Buse Tezcan from DİBA Research and Development Engineering Co., for their valuable contributions to the research.

This work was supported by the Düzce University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project No: 2024.06.05.1549), titled 'Investigation of the Corrosion Mechanism of Metals Coated by Centrifugal Hot-Dip Galvanizing (CHDG) Method

References

- [1] Gerengi, H., Maraşlı, M., Kohen, B., Ramazanoğlu, D., Coşkun, K. 2025. Effectiveness of zinc-rich coating in preventing weld zone corrosion in GFRC facade anchorage elements. 9th International Engineering and Technology Management Congress, April - May 29-30-01, Istanbul, Türkiye.
- [2] Gerengi, H., Maraşlı, M., Yıldız, M., Coşkun, K., Güner, Y., Aşıkoğlu, B. 2025. The effect of Centrifugal Hot-Dip Galvanisation (CHDG) Process on the Corrosion on Nuts. Duzce University Journal of Science and Technology, 13, 13-25.
- [3] Wang, J., An, L., Wang, J., Gu, J., Sun, J., Wang, X. 2023. Frontiers and advances in N-heterocycle compounds as corrosion inhibitors in acid medium: Recent advances. Advances in Colloid and Interface Science, 321, 103031.
- [4] Kurtay, M., Gerengi, H., Chidiebere, A., Yıldız, M. 2022. Corrosion inhibition of reinforcement steel in mixture water by caffeine and L-arginine. Journal of Adhesion Science and Technology, 36, 134-167.
- [5] Ananthkumar, M., Mini, K.M., Thilagavathy, P. 2025. Eco-friendly corrosion protection of steel in simulated concrete environments using cassia fistula leaf extract: Electrochemical and surface

- characterization study. *South African Journal of Chemical Engineering*, 54, 44–49.
- [6] Liu, Y., Shi, J. 2025. Exploring a feasible inhibitor-coating protective system for corrosion protection of steel in mortar. *Cement and Concrete Composites*, 161, 106109.
- [7] Gerengi, H., Uygur, I., Solomon, M., Yildiz, M., Goksu, H. 2016. Evaluation of the inhibitive effect of *Diospyros kaki* (Persimmon) leaves extract on St37 steel corrosion in acid medium. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 4, 57–66.
- [8] Solomon, M.M., Gerengi, H., Kaya, T., Umoren, S.A. 2017. Enhanced corrosion inhibition effect of chitosan for St37 in 15% H₂SO₄ environment by silver nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104–A, 638–649.
- [9] Liu, Y., Gao, H., Wang, H., Tao, X., Zhou, W. 2024. Study on the corrosion behavior of hot-dip galvanized steel in simulated industrial atmospheric environments. *International Journal of Electrochemical Science*, 19, 100445.
- [10] Guo, Y., Chen, R., Zhang, C., Xiao, H., Wu, G. 2025. Assessment of the corrosion state of carbon steel galvanized layers based on laser-induced breakdown spectroscopy. *Measurement*, 253–B, 117518.
- [11] Ghazaee, A., Pour-Ali, S., Mahdavi, S., Tavangar, R., Khalili, M. 2024. Corrosion inhibition of steel rebar in chloride-contaminated concrete pore solution: Ecofriendly glutamic acid inhibitor and its synergy with galvanized coating. *Inorganic Chemistry Communications*, 167, 112832.
- [12] Coşkun, K., Gerengi, H., Maraşlı, M., Birinci, F.A., Özdal, V. 2023. Use of corrosion inhibitors in stainless steel anchors used in glass fiber reinforced concrete (GRC) precast facade elements. *The European Journal of Research and Development*, 3, 1–15.
- [13] Gerengi, H., Maraşlı, M., Rizvi, M., Kohen, B., Taşkıran, I. 2024. Protection of steel hooks embedded in glass-fiber-reinforced concrete against macrocell corrosion. *Petroleum Research*, 9, 317–326.
- [14] Özdal, V., Marasli, M., Gerengi, H., Dikmen, K. 2023. Corrosion behavior of embedded pad hook in glass fiber reinforced concrete. *Civil Engineering Design*, 5, 18–24.
- [15] Pop, A.B., Iepure, G., Titu, A.M., Ravai-Nagy, S. 2023. Characterization and corrosion behavior of zinc coatings for two anti-corrosive protections: A detailed study. *Coatings*, 13, 1460.
- [16] Šmak, M., Kubíček, J., Kala, J., Podaný, K., Vaněrek, J. 2021. The Influence of Hot-dip galvanizing on the mechanical properties of high-strength steels. *Materials*, 14, 5219.
- [17] Anaee, R.A., Salih, W.M., Abdullah, H.A. 2017. Anodic inhibitor doped polypyrrole coating to reduce corrosion in petroleum medium. *Engineering and Technology Journal*, 35, 878–886.
- [18] Poppy, P., Chrisye, A., Aripriharta Jeefferie, A. R., Mirza Abdillan Pratama, M. 2020. Corrosion resistance analysis of st37 carbon steel material using phosphate conversion coating in various immersion durations. *Key Engineering Materials*, 851, 61–67.
- [19] Qingdong, Z., Rohwerder, M., Zhao, Z., Hamidah, I., Wati, R., Hamdani, R. A. 2018. Analysis of AISI 304 tensile strength as an anchor chain of mooring system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 367, 012058.
- [20] Yang, N., Wang, W., Cai, W., Lu, K. 2020. Corrosion and tribocorrosion mitigation of perhydropolysilazane-derived coatings on low carbon steel. *Corrosion Science*, 177, 108946.
- [21] Abeln, B., Pinger, T., Richter, C., Feldman, M. 2023. Adhesion of batch hot-dip galvanized components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 5197–5209.
- [22] Benli, B., Celik, I., 2024. Surface Modification and Analysis of St37 Steel with Al₂O₃-TiO₂, ZrO₂, and Cr₂O₃ Ceramic Coatings: Structural, Mechanical, and Tribological Properties. *Tribology International*, 191, 109183.
- [23] Celik, I., Benli, B. 2024. The effect of WC-12Co and CrC-NiCr hard coatings applied by HVOF method on the microstructure, mechanical, and surface properties of steel. *Metallurgical Research & Technology*, 121, 318.
- [24] Krelling, A.P., Jeronimo, J.L., Bonetti, I., Rabethge, G. 2024. Micro-Scale Abrasive Wear Resistance of a Nanoceramic Sealant Applied on Galvanized Low Carbon Steel. *Tribology in Industry*, 46, 116–125.
- [25] Dursunlar, M., Taş, Z., Çelebi, M., Akgül, B., Çuğ, H. 2025. Enhanced corrosion resistance of high-speed railway fastening systems: ZnAl coating on 38Si7 steel. *Kovove Materialy*, 63, 119–134.
- [26] Saleh, B., Fathi, R., Shi, H., Wei, H. 2023. Advanced Corrosion Protection through Coatings and Surface Rebuilding. *Coatings*, 13, 180.
- [27] Li, G., Du, M., Wang, J., Huang, G., Ma, L. 2023. Effect of hydrogen on pitting corrosion of 2205 duplex stainless steel under alternating dry/wet marine environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 17983–17994.
- [28] Ozakgul, K., Baydogan, M., Piroglu, F. 2023. Postfire damage assessment of a steel industrial building exposed to fire. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 37, 04023055.

- [29] Wan, Y., Macha, E. N., Kelly, R. G. 2012. Modification of ASTM B117 salt spray corrosion test and its correlation to field measurements of silver corrosion. *Corrosion*, 68.
- [30] Baird, L. M., Patchan, M. W., Morris, M., Maisano, A. J., Phillips, T. E., Benkoski, J. J., Srinivasan, R. 2015. Synergy between galvanic protection and self-healing paints. *Langmuir*, 31, 10610–10617.
- [31] Zhang, X. G. 1996. *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*, Springer: New York.
- [32] Zhang, K., Song, R., Gao, Y. 2019. Corrosion behavior of hot-dip galvanized advanced high strength steel sheet in a simulated marine atmospheric environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 14, 1488–1499.
- [33] Meng, Y., Liu, L., Zhang, D., Dong, C., Yan, Y., Volinsky, A.A., Wang, Lu. 2019. Initial formation of corrosion products on pure zinc in saline solution. *Bioactive Materials*, 4, 87–96.
- [34] Gerengi, H., Maraşlı, M., Solomon, M. M., Coskun, K., Guner, Y. 2024. Corrosion of Centrifuged Hot Dip Galvanized Pad Hooks used in GFRC Panels. *Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 60(5), 1-7.

RMR, Q ve RMQR Kaya Kütle Sınıflama Sistemlerinin Demirkapı Tüneli'ne (İbradı-Antalya) Uygulanması

Muhammet BEYHAN¹, Mahmut MUTLUTÜRK²

¹Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta

(Alınış / Received: 19.03.2025, Kabul / Accepted: 17.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Demirkapı Tüneli,
RMR,
Q,
RMQR,
Sınıflama

Öz: "Demirkapı Tüneli" Akdeniz bölgesini daha kısa bir yol güzergahı ile İç Anadolu'ya bağlayan Antalya-Konya yol güzergahı üzerinde Antalya İbradı ilçesi sınırlarında inşa edilmiştir. Tünel güzergahında kazı sırasında geçilen birimlerin kaya kütle sınıflandırması bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Anamas-Akseki Otoktonuna ait kaya birimlerinden oluşan tünel güzergahı, yerinde yapılan jeolojik çalışmalar ve kayaların mühendislik özelliklerine göre benzer davranış gösteren bölgelere ayrılmış ve her bir bölgeye ait en iyi, en kötü ve ortalama koşulları temsil eden jeomekanik özellikler detaylı bir şekilde ortaya konmuştur. Elde edilen jeomekanik verilere dayalı olarak her yapısal bölge için RMR, Q ve RMQR kaya kütle sınıflama sistemleri kullanılarak sınıflama sistemleri uygulanmıştır. Buna göre RMR ve Q sistemleri düşük dayanım ve ayrışma durumunun gözlemlendiği alanlarda uyum sergilerken RMR ve RMQR nispeten daha yüksek ve az ayrışmış bölgelerde benzer kaya tanımlama sınıfında yer almaktadır. Ayrıca saha çalışmalarıyla ve RMR ile Q değerleri ayrı ayrı kullanılarak ampirik yöntemle elde edilen RMQR kaya sınıflandırmalarının genellikle aynı tanımlama aralığında yer aldığı belirlenmiştir.

Application of RMR, Q and RMQR Rock Mass Classification Systems to Demirkapı Tunnel (Ibradi-Antalya)

Keywords

Demirkapı Tunnel,
RMR,
Q,
RMQR,
Classification

Abstract: The "Demirkapı Tunnel" has been constructed on the Antalya-Konya route, which connects the Mediterranean region to Central Anatolia, within the borders of Antalya's İbradı district. The rock mass classification of the units encountered during excavation along the tunnel route constitutes the main focus of this study. The tunnel route, consisting of rock units belonging to the Anamas-Akseki Autochthon, has been divided into regions exhibiting similar behavior based on geological studies and engineering characteristics of rocks observed on-site. For each region, geomechanical properties representing the best, worst, and average conditions have been detailed. Based on the obtained geomechanical data, rock mass classification systems such as RMR, Q, and RMQR have been applied for each structural zone. The RMR and Q systems showed consistency in areas characterized by low strength and weathered rock, whereas RMR and RMQR yielded similar rock classification results in relatively stronger and less weathered zones. Additionally, it was determined that the RMQR rock classifications obtained through field studies, as well as those empirically derived using RMR and Q values separately, generally fall within the same classification range.

1. Giriş

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin artması mevcut ulaşım imkanlarının standartlarının da artmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, şehir içi, şehirlerarası,

uluslararası ulaşımında, petrol-gaz gibi akışkan taşınmasında, içme, sulama, kullanma suyu iletiminde, yeraltı santralleri ve depolama amaçlı çeşitli mühendislik projelerinde yeraltı kazıları yapılmaktadır. Yeraltı kazılarında, güzergâh seçimi,

en kesit ve boy kesit belirlenmesi sırasında yapılan ön inceleme aşamasında mühendislik jeolojisi ve jeoteknik çalışmalar önem kazanmaktadır. Özellikle yeraltı kazılarında, kaya kütlesi sınıflamaları ön inceleme, fizibilite çalışmaları ile uygulama projelerine temel oluşturmaktadır. Ülkemizin dağlık yapısı nedeniyle, birçok bölgede zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla tünel açılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. İç Anadolu'yu Akdeniz'e bağlayan yollardan bir tanesi olan Konya-Seydişehir-Akseki-Manavgat-Antalya yolu engebeli bir yapıya sahip olup kara yolu ile geçilmesi oldukça meşakkatlidir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından Konya ilinin Antalya'ya bağlanması için planlanan proje kapsamında mevcut durumda toplam 304 km uzunluğunda olan yol, planlanan tünel ve yapılan yollar ile Konya - Antalya güzergâhını yaklaşık olarak 100 km kısaltmaktadır [1]. Başlar ve Beydiğin (İbradı-Antalya) köyleri arasında planlanan Demirkapı tüneli (Km:33+832-38+740) ve Taşağıl-İbradı yol güzergahı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanında Demirkapı tünelinin yeri

Tünel açma aşamasında destekleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi projenin duraylılığı açısından önemlidir. Destek çalışmalarının kaya yapısına bağlı olarak kullanılacak destekleme ekipmanları projenin maliyetine etki etmektedir. Bu sebeple destek hesaplamalarında tünel güzergahındaki kaya sınıflamalarının doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Kaya kütle sınıflama sistemlerinden ulaşılabilen ilk sınıflama, Agricola [2] tarafından 1556 yılında önerilen nitel bir sınıflamadır [3]. Özellikle tünel tasarımı için destek gereksinimlerini belirlemeye yönelik ampirik bir yaklaşımı sistemleştirmeye çalışan Ritter'in [4] çalışması, Terzaghi [5] ve Stini'nin [6] sınıflandırmaları, modern kaya sınıflandırma sistemlerinin temellerini oluşturmuştur. Yeraltı kazılarının sayısının artış göstermesi ve buna bağlı olarak veri miktarında ortaya çıkan artış, sınıflama sistemlerinin çoğalmasına olanak sağlamıştır. Bieniawski [7], [8], tarafından önerilen Kaya kütle derecelendirmesi (RMR) ve Barton vd [9] tarafından geliştirilen Q sistemi yaygın olarak kullanılan sınıflama sistemleridir. Yakın zamanda ise Aydın vd [3] tarafından Kaya Kütleli Kalite Derecelendirmesi (RMQR) sistemi ortaya konulmuştur. Yazarlar tarafından önerilen bu yeni sınıflamanın

kullanılabilirliği pek çok araştırmacı tarafından irdelenmiştir [10], [11], [12].

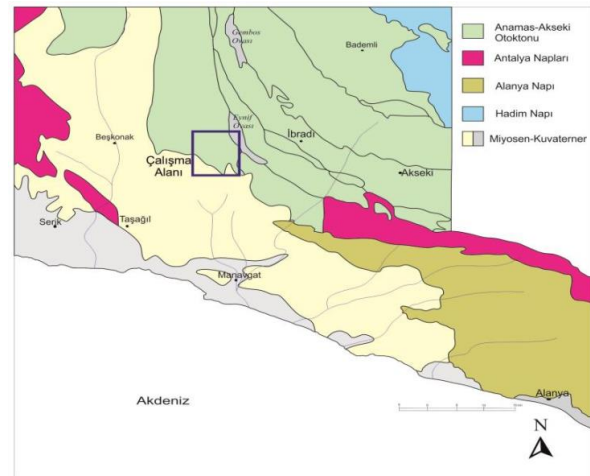
Bu çalışmada, Demirkapı tüneli (İbradı- Antalya) güzergahını litolojik, yapısal, mühendislik ve diğer özellikler bakımından benzer davranış gösteren yapısal bölgelere ayırarak, her yapısal bölge için farklı kaya kütle sınıflama sistemlerinin (RMR, Q, RMQR) uygulanması amaçlanmıştır.

2. Materyal Metot

2.1 Jeoloji

Akdeniz Bölgesi kıyıları, Toros Dağları tarafından mevcut görünümünü almıştır. Toros Dağları'nın Antalya Körfezi çevresindeki kısmı Batı Toroslar, Antalya sınırlarından yaklaşık Mersin'e kadar uzanan bölümü Orta Toroslar, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan kısmı ise Güneydoğu Toroslar veya Doğu Toroslar olarak tanımlanmaktadır. Toros Dağları, otokton birimler ile bu birimler üzerinde yer alan bir dizi allokon birimleri kapsar. Buna bağlı olarak, Akdeniz kıyısına paralel uzanan ve “nap” olarak tanımlanan bir dizi tektonik birlik bölgenin morfolojisini belirlemektedir (Şekil 2).

Orta Toroslar bölgesinde kalan inceleme alanı, Anamas-Akseki otoktonunun güneyinde yer almaktadır. Tektonik hareketliliğin yoğun olduğu bölgede yer alan inceleme alanı Anamas-Akseki Otoktonu ile Antalya Napılarının sınır bölgesindedir. Platform çökellerden oluşan Anamas-Akseki Otoktonu üzerine, Orta Eosen sonrası tektonizmaya bağlı olarak, Akseki bloğu Akdağ Yelekdağ bloğu üzerine yerleşmiş, Akdağ Yelekdağ Bloğu ise Pirnos Tepedağ üstüne tektonik olarak yerleşmiştir [10].



Şekil 2. Batı Toroslardaki tektonik birimleri gösterir harita [13]

İnceleme alanında, temelde ince-orta tabakalı kahverengi ve sarı renkli kumtaşı ve şeyllerden oluşan Kasımlar formasyonu (Trk) yer almaktadır. Üstte dolomit ve dolomitik kireçtaşından oluşan dağılgan yapıda gri-acık gri renkli Mentese dolomiti

(TRm) ve Menteşe dolomitinin üstünde Leylek kireçtaşı (TRL) bulunur. Sarı, pembe, gri renkli, tabaka kalınlığı orta-kalın, bol megalodont fosilli kireçtaşlarından oluşan Leylek kireçtaşının üzerinde yer alan Üzümdere formasyonu ile geçişlidir. Üzümdere Formasyonu'nun üzerinde, kalsitürbidit ve mikritlerden meydana gelen Dumanlı Formasyonu yer almaktadır [14]. Çalışma alanına ait düşey kesit Şekil 3'te sunulmuştur.

Üst Sistem	Sistem	Seri	Blok	Formasyon	Simge	Kalınlık(m)	Litoloji	Açıklamalar
Senozoyik	Kuvaterner				Qal	25		Tutulmamış kil kum silttaşı
MESOZOYİK	Kretase	Kampaniyen - Maastrichtiyen	Yelekdagi/ Pinosi/Oğuz	Dumanlı	Kd	350		Killi-kumlu kireçtaşları, Yersel çörtlü miktiller
		Resiyen - Erken Lias	Yelekdagi/ Pinosi/Oğuz	Üzümdere	TRu	370		Kumtaşı, konglomera, kilitaşı, çakilitaşı, killi-kumlu kireçtaş,
	Triyas	Resiyen	Pinosi/ Melikdağ	Leylek	TRl	250		Megalodont'lu kireçtaşı
		Noriyen - Resiyen	Pinosi/ Melikdağ	Menteşe	TRm	325		Dolomit ve dolomitik kireçtaşı
	Anisiyen-Noriyen							
					TRk	1500		Kilitaşı, silttaşı, kumtaşı, şeyil, kumlu-killi kireçtaşı ara düzeyleri gözlenir

Şekil 3. Araştırma alanı ve çevresine ait genelleştirilmiş düşey kesiti

Saha çalışmalarında, tünel güzergahı ve yakın çevresine ait jeolojik birimlerin stratigrafik konumları ve litolojik özellikleri belirlenmiş ve 1/25000 ölçekli jeoloji-mühendislik jeolojisi haritası ile tünel güzergahına ait mühendislik jeolojisi kesiti hazırlanmıştır (Ek A)

2.2. Kaya kütle sınıflamaları

Yapılan çalışmada, Demirkapı tünel güzergahı için oluşturulan her yapısal bölgeye RMR, Q ve RMQR sınıflama sistemleri uygulanmıştır.

Jeomekanik sınıflama olarak da bilinen RMR kaya kütle sınıflama sistemi, Bieniawski (1973) tarafından ortaya konmuştur [7] ve ilerleyen yıllarda birçok çalışma ve uygulama sonuçlarından yararlanarak sınıflama sistemi 1989 yılında yapılan değişiklikler ile son halini almıştır [8]. RMR kaya kütle sınıflama sistemi kullanılarak kaya dayanımı, kaya karot kalitesi, süreksizliklerin özellikleri, su durumu gibi özellikler yardımı ile kaya kütleleri yeraltı kazılarında kazı-destek sistemlerinin belirlenmesi için sınıflandırılmaktadır.

Bir başka sınıflama sistemi olan Q kaya kütle sınıflama sistemi, ilk kez Barton (1976) tarafından ortaya konulmuştur [9]. Q sınıflama sistemi, kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi ve yeraltı kazılarında kazı-destek sistemlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Zaman içinde Q sistemi temel parametreleri değişmemiş ancak gerilme azaltma faktörü değiştirilmiştir. Bunun nedeni yüksek basınç ve gerilme etkisi altındaki sağlam kayalar, eski sınıflamanın SRF değeriyle hesaplanan Q değerine dayalı destek sistemlerine kıyasla daha fazla desteğe ihtiyaç duymaktadır. Q sınıflama sisteminin parametreleri; RQD, süreksizliklerin pürüzlülük ve alterasyon özellikleri, su ve gerilme azaltma faktörleridir [16].

RMQR sınıflama sistemi, Aydan vd [3] tarafından ortaya konulan yeni sayılabilecek bir sınıflama sistemidir. RMR ve Q kaya kütle sınıflama sistemlerinin bir birleşimi olarak nitelendirilebilecek önerilen sistem, kayanın bozunma derecesi, süreksizliklerin sayısı, aralığı, miktarı, süreksizlik durumu gibi özellikleriyle su durumunu içermektedir [1].

2.3. Tünel mühendislik jeolojisi

Akdeniz bölgesinde önemli bir ticaret limanı bulunan, tarım ve turizm merkezi olan Antalya'nın diğer illere bağlantısını sağlamak amacı ile KGM tarafından Antalya-Konya arasında bir yol güzergahı planlanmıştır. Bu yol güzergahının, Antalya ili, İbradı ve Manavgat İlçeleri arasında Başlar-Taşağıl Köyleri arasında morfolojik zorluklar nedeni ile uzunluğu 4.908 km ve boyutları 12X12 m olan Demirkapı Tüneli inşaatı tasarlanmıştır [18]. Ön projelendirme aşamasında tünel güzergahı boyunca KGM tarafından 5 adet temel sondaj yapılmıştır [18].

Bu çalışma kapsamında, Demirkapı Tünel güzergahını da içine alan bir alanda yer alan jeolojik birimlerin stratigrafik, litolojik ve yapısal özellikleri ile güzergahta yer alan kaya birimlerinin süreksizliklerinin mühendislik özellikleri olan konum, aralık, açıklık, devamlılık, dolgu gibi özellikleri ISRM (1981) standartlarına göre belirlenmiştir. Ayrıca proje aşamasında yapılan temel sondaj ve laboratuvar verileri de kullanılarak güzergahın jeoteknik değerlendirmesi yapılarak Demirkapı Tünel güzergahı, kaya kütle sınıflamalarından RMR, Q ve RMQR sınıflama sistemlerine göre sınıflandırılmıştır.

Tünel güzergahı boyunca yapılan çalışmalar, hazırlanan jeoloji haritası ve tünel kazı aynalarında yapılan gözlemler kullanılarak tünel güzergahına ait mühendislik jeolojisi boy kesiti hazırlanmıştır. Hazırlanan kesit, jeoteknik hesaplamalara esas teşkil etmesi açısından güzergah girişi ve çıkışı aynaları ayrı olmak üzere, benzer litolojik, yapısal, mühendislik

özelliklerine göre yapısal bölgelere ayrılmıştır (Tablo 1, Ek B).

Tablo 1. Demirkapı Tünelinde ayrılan yapısal bölgeler

Yapısal Bölgeler (Km)	Litoloji
Tünel Giriş	
0+000-0+250	A1 Kasımlar Frm.
0+250-0+975	A2 Kasımlar Frm.
0+975-1+670	B1 Leylek Kireçtaşı
1+670-1+690	A3 Kasımlar Frm.
1+690-1+700	D Fay Zonu
1+700-2+220	A4 Kasımlar Frm.
2+220-4+250	B2 Leylek Kireçtaşı
4+250-4+640	C1 Üzümdere Frm.
Tünel Çıkış	
4+640-4+908	C2 Üzümdere Frm.

Kaya kütlelerinin tanımlanabilmesi için süreksizliklerin konum, süreksizlik aralığı, süreksizlik devamlılığı, pürüzlülük durumu, açıklık, dolgu malzemesi durumu, bozunma derecesi ve su durumu gibi mühendislik özellikleri incelenmiştir. Süreksizlik ölçümleri sırasında, jeolog pusulası kullanılarak süreksizliklerin konumu, eğim yönü ve eğim miktarları belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Dumanlı formasyonuna ait süreksizlikler

3. Bulgular

Sondaj çalışmaları: Çalışma alanında, KGM [18] tarafından proje öncesi aşama kapsamında 4'ü tünel giriş ve çıkışında olmak üzere 5 adet sondaj gerçekleştirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Demirkapı tüneli sondaj yeri ve derinlikleri

Sondaj No.	Sondajın Yeri	Sondajın Derinliği (m)
Sondaj Kuyusu -1	Tünel Girişi (sağ yamaç, Km:33+860)	30.0
Sondaj Kuyusu -2	Tünel Girişi (sol yamaç, Km:33+860)	30.0
Sondaj Kuyusu -3	Km:38+695	70.0
Sondaj Kuyusu -4	Tünel Çıkışı (sağ yamaç, Km:38+690)	55.0
Sondaj Kuyusu -5	Tünel Çıkışı (sağ yamaç, Km:38+690)	55.0

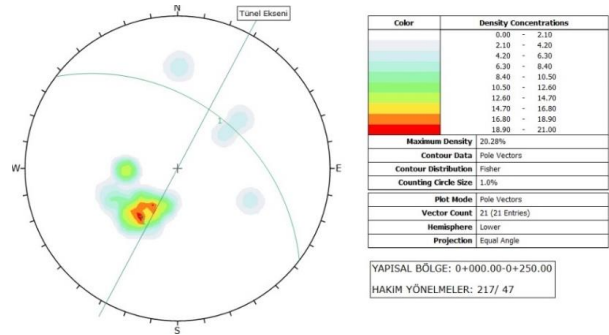
Ön etüt sırasında yapılan sondajlardan alınan numunelerden proje firması tarafından yapılan deneysel çalışmalar incelenmiş, kaya kütleleri sınıflamalarında kullanılabilecek nokta yük deney

sonuçları değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Yapısal bölgelere göre değerlendirilen nokta yük dayanım deney sonuçları

Yapısal Bölge (Km)	Is(50) En iyi koşul (MPa)	Is(50) En kötü koşul (MPa)	Is(50) Ortalama koşul (MPa)
A1	2,53	1,12	2,03
A2	2,53	1,12	2,03
B1	5,07	3,95	4,58
A3-A4	2,53	1,12	2,03
B2	5,07	3,95	4,58
C1	3,51	1,98	2,58
C2	3,51	1,98	2,58

Konum: Tünel güzergahında yer alan kaya birimlerinde gözlenen eklem ve tabakalara ait eğim ve eğim yönleri ölçülmüş her bir yapısal bölge için ayrı ayrı konum verileri stereografik izdüşüm diyagramları kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5). Yapısal bölgelere ait süreksizlik konumları ise Tablo 4'te sunulmaktadır.



Şekil 5. A1 yapısal bölgesine ait örnek kontur diyagramı

Tablo 4. Yapısal bölgelere ait hakim süreksizlik eğim ve eğim yönü özellikleri

Yapısal Bölge	Birinci Eklem Seti	İkinci Eklem Seti	Üçüncü Eklem Seti
	(eğim / eğim yönü)		
A1	44 / 037	32 / 032	
A2	47 / 057	55 / 108	
B1	47 / 057	55 / 018	
A3-A4	42 / 049		
B2	14 / 138	23 / 102	
C1	44 / 232	26 / 058	
C2	42 / 191	34 / 250	45 / 101

Aralık: İki süreksizlik yüzeyi arasındaki mesafeyi ifade eden süreksizlik aralığı için yapısal bölgelere ait sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Yapısal bölgelere ait süreksizlik aralık özellikleri ve tanımlamaları

Yapısal Bölge (Km)	En iyi koşullar	En kötü koşullar	Ortalama koşullar
	cm	cm	cm
A1	6-20	<2	2-6
A2	2-6	<2	2-6
B1	>60	6-20	20-60
A3-A4	6-20	<2	2-6
B2	60-200	<2	6-
	Tanım	Tanım	Tanım
A1	YA	ÇDA	DA
A2	DA	ÇDA	DA
B1	İDGA	YA	ODA
A3-A4	YA	ÇDA	DA
B2	GA	ÇDA	YA

C1	6-20	YA	<2	ÇDA	20	DA
C2	20-60	ODA	<2	ÇDA	2-6	DA

*ÇDA: Çok Dar Aralıklı, DA: Dar Aralıklı, YA: Yakın Aralıklı, ODA: Orta Derece Aralıklı, GA: Geniş Aralıklı, İDGA: İleri Derece Geniş Aralıklı

Devamlılık: Bir süreksizliğin yüzeydeki izinin uzunluğu ölçülerek belirlenen devamlılık özelliği, bir süreksizliğin yeraltındaki uzanımının tahmininde de kullanılan bir ölçüdür ve yapısal bölgelere ait sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Yapısal bölgelere ait süreksizlik devamlılık özellikleri ve tanımlamaları

Yapısal Bölge (Km)	En iyi koşullar		En kötü koşullar		Ortalama koşullar	
	mm	Tanım	mm	Tanım	mm	Tanım
A1	<1	ÇDD	<1	ÇDD	<1	ÇDD
A2	<1	ÇDD	<1	ÇDD	<1	ÇDD
B1	<1	ÇDD	3-10	OD	1-3	DD
A3-A4	<1	ÇDD	<1	ÇDD	<1	ÇDD
B2	<1	ÇDD	3-10	OD	1-3	DD
C1	<1	ÇDD	1-3	DD	1-3	DD
C2	<1	ÇDD	1-3	DD	1-3	DD

*ÇDD: Çok Düşük Devamlılık, DD: Düşük Devamlılık, OD: Orta Devamlılık

Açıklık: Saha çalışmaları sırasında, süreksizliklerin alt ve üst kısımlarında iki yüzey arasındaki dik mesafe ölçülerek belirlenen süreksizlik açıklıklarına ait sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Yapısal bölgelere ait süreksizlik açıklıkları ve tanımlamaları

Yapısal Bölge (Km)	En iyi koşullar		En kötü koşullar		Ortalama koşullar	
	mm	Tanım	mm	Tanım	mm	Tanım
A1	<0,1	ÇSA	1-10	ÇGA	0,5-2,5	AA
A2	<0,1	ÇSA	1-10	ÇGA	0,5-2,5	AA
B1	0,25-0,5	KAA	10-100	AGA	2,5-10	ODG
A3-A4	<0,1	ÇSA	1-10	ÇGA	0,5-2,5	AA
B2	0,25-0,5	KAA	10-100	AGA	2,5-10	ODG
C1	0,1-0,25	Sıkı	1-10	ÇGA	0,5-2,5	AA
C2	0,25-0,5	KAA	1-10	ÇGA	0,5-2,5	AA

*(ÇSA: Çok Sıkı Açıklık, KAA: Kısmen Açık Açıklık, ÇGA: Çok Geniş Açıklık, AGA: Aşırı Geniş Açıklık, AA: Açık Açıklık, ODGA: Orta Derecede Geniş Açıklık)

Dolgu: Saha çalışmaları esnasında, süreksizliklerin açıklıklarının kalsit, kil, silt, breş dolgulu olduğu ve yer yer boşlukların yer aldığı gözlenmiştir. ISRM

tarafından önerilen sınıflamaya göre dolgu durumu değerlendirilmiştir [19].

Buna göre, tünel girişi olan A1, A2, A3, A4, C1 ve C2 yapısal bölgelerinde süreksizliklerin dolgu durumunun S4 sınıflamada yer alan "Sert zemin", B1 ve B2 yapısal bölgelerindeki kireçtaşlarının da kalsit dolgulu olduğu ve R3 "Orta Derecede Sağlam Kayaç" kategorisinde olduğu değerlendirilmiştir.

Su durumu: Süreksizliklerin su durumu kazı aynasında tabaka ve eklemlerde yapılan gözlemlere göre değerlendirilmiştir [19]. A1 ve A2 yapısal bölgelerindeki su durumu "dolgu malzemesinin yıkanmış – ıslanmış olduğuna ilişkin izler ve sürekli su akışı izleniyor" sınıfında, B1, A3, A4, B2, C1 ve C2 yapısal bölgelerindeki su durumu ise "Dolgu malzemesi aşırı derecede konsolide olmuş malzemeden oluşuyor ve geçirgenliğinin az olması sebebi ile önemli bir akışı gözlenmiyor" olarak değerlendirilmiştir.

Süreksizlik yüzeyi: Süreksizlik kaya duvarının ayrışma durumunun da bir ölçüsü olan süreksizlik yüzeyi durumu, yapısal bölge A1, A2, A3, A4, C1 ve C2'de "Orta derecede bozunmuş", yapısal bölge B1 ve B2'de "Bozunmamış" ve "Az bozunmuş" olarak belirlenmiştir [19].

3.1. Demirkapı Tüneli'nin jeoteknik özelliklerinin değerlendirmesi

Demirkapı Tüneli'nin jeoteknik özellikleri; tünel güzergâhı ile yakın çevresindeki jeolojik birimlerin stratigrafik, litolojik ve yapısal özellikleri ile mühendislik nitelikleri, sondaj ve laboratuvar verilerinin değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Elde edilen bütün veriler yardımı ile yapısal bölgelere ayrılan tünel güzergahında bulunan birimlerin jeomekanik özellikleri sınıflama ve tanımlamalar yardımı ile ortaya konulmuştur [19]. Her yapısal bölge için ayrı ayrı kaya kütle sınıflama sistemleri uygulanmıştır. Öncelikle benzer davranış özelliklerine göre ayrılmış olan her bir yapısal bölge RMR, Q, RMQR kaya sınıflama sistemine göre en iyi, ortalama, en kötü koşullar dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 8 ile Tablo 10 arasında verilmiştir.

Tablo 8. RMR sistemi için kaya kütle sınıfları

Yapısal Bölgeler (km)	Koşullar	Nokta Yük Dayanımı (MPa)	RQD	Süreksizlik aralığı	Devamlılık	Açıklık	Pürüzlü	Dolgu	Bozunma	Yeraltı suyu	Temel RMR	Süreksizlik düzeltme değeri	Patlatma düzeltme değeri	Düzeltilmiş RMR	Kaya Kütle Sınıfı
A1	En iyi	2,53 (7)	48 (8)	60-200 (8)	<1 (6)	<0,1 (5)	Pürüzlü (5)	SD <5 (4)	ODB (3)	Kuru (15)	61	-2	0,85	50	Orta kaya
	Ortalama	2,03 (7)	22 (3)	20-60 (5)	<1 (6)	0,5-2,5 (4)	Az pürüzlü (3)	SD <5 YD <5 (3)	ODB (3)	Nemli (10)	44	-5	0,85	33	Zayıf kaya
	En kötü	1,12 (4)	0 (3)	<20 (5)	<1 (6)	1-10 (0)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODB (3)	Nemli (10)	36	-5	0,8	25	Zayıf kaya
A2	En iyi	2,53 (7)	50 (13)	20-60 (5)	<1 (6)	1-10 (0)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODB (3)	Kuru (15)	63	-2	1	61	İyi kayalık
	Ortalama	2,03 (7)	23 (3)	20-60 (5)	<1 (6)	0,5-2,5 (4)	Az pürüzlü (3)	SD <5 YD <5 (3)	ODB (3)	Nemli (10)	44	-5	0,85	33	Zayıf kayalık
	En kötü	1,12 (4)	0 (3)	<20 (5)	<1 (6)	0,5-2,5 (4)	Az pürüzlü (3)	SD <5 YD <5 (3)	ODB (3)	Islak (7)	33	-5	0,8	22	Zayıf kayalık
B1	En iyi	5,07 (12)	70 (13)	>6000 (20)	3-10 (2)	10-100 (1)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODB (3)	Kuru (15)	84	0	0,9	76	İyi kayalık
	Ortalama	4,58 (12)	45 (8)	200-600 (10)	1-3 (4)	2,5-10 (0)	Az pürüzlü (3)	SD <5 (4)	ODB (3)	Kuru (15)	59	0	0,9	53	Orta kayalık
	En kötü	3,95 (7)	0 (3)	60-200 (8)	1-3 (4)	2,5-10 (0)	Az pürüzlü (3)	SD <5 (4)	ODB (3)	Nemli (10)	39	0	0,8	31	Zayıf kayalık
A3-A4	En iyi	2,53 (7)	48 (8)	60-200 (5)	<1 (6)	1-10 (0)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODP (3)	Kuru (15)	58	-2	1	57	Orta kayalık
	Ortalama	2,03 (7)	23 (3)	20-60 (5)	<1 (6)	<0,1 (5)	Pürüzlü (5)	SD <5 (4)	ODP (3)	Nemli (10)	44	-5	0,85	33	Zayıf kayalık
	En kötü	1,12 (4)	0 (3)	<20 (5)	<1 (6)	0,5-2,5 (4)	Az pürüzlü (3)	SD <5 YD <5 (3)	ODP (3)	Nemli (10)	36	-5	0,8	25	Zayıf kayalık
B2	En iyi	5,07 (12)	73 (13)	600-2000 (15)	3-10 (2)	10-100 (0)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODP (3)	Kuru (15)	79	-2	1	75	İyi kayalık
	Ortalama	4,58 (12)	50 (8)	60-200 (8)	<1 (6)	0,25-0,5 (4)	Pürüzlü (5)	SD <5 (4)	AB (5)	Kuru (15)	58	-5	1	53	Orta kayalık
	En kötü	3,95 (7)	0 (3)	<20 (5)	1-3 (4)	2,5-10 (1)	Az pürüzlü (3)	SD <5 (4)	ODP (3)	Nemli (10)	35	-5	0,9	27	Zayıf kayalık
C1	En iyi	3,51 (7)	53 (13)	60-200 (8)	1-3 (4)	1-10 (0)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODP (5)	Kuru (15)	67	-5	0,9	56	Orta kayalık
	Ortalama	2,58 (7)	20 (3)	20-60 (5)	<1 (6)	0,1-0,25 (4)	Pürüzlü (5)	SD <5 (4)	ODP (5)	Nemli (10)	40	-5	0,9	35	Zayıf kayalık
	En kötü	1,98 (4)	12 (3)	<20 (5)	1-3 (4)	0,5-2,5 (4)	Az pürüzlü (3)	SD <5 YD <5 (3)	ODP (5)	Nemli (10)	36	-10	0,9	23	Zayıf kayalık
C2	En iyi koşul	3,51 (7)	53 (13)	200-600 (10)	1-3 (4)	1-10 (0)	Az pürüzlü (3)	YD <5 (2)	ODB (5)	Kuru (15)	69	-2	0,9	60	Orta kayalık
	Ortalama koşul	2,58 (7)	20 (3)	20-60 (5)	<1 (6)	0,1-0,25 (4)	Pürüzlü (5)	SD <5 (4)	ODB (5)	Kuru (15)	49	-5	0,9	40	Zayıf kayalık
	En kötü koşul	1,98 (4)	12 (3)	<20 (5)	1-3 (4)	0,5-2,5 (4)	Az pürüzlü (3)	SD <5 (4)	ODB (5)	Nemli (10)	37	-5	0,9	29	Zayıf kayalık

* ODB: Orta düzeyde bozunmuş, AB: Az bozunmuş, SD: Sert Dolgu, YD: Yumuşak Dolgu

*Parantez içindeki sayılar sınıflama puan değerlerini göstermektedir.

Tablo 9. Q sistemine göre kaya kütle sınıflaması

Yapısal Bölgeler (Km)	Koşullar	RQD	Süreksizlik Seti (jn)	Süreksizlik Pürüzlülük Sayısı (Jr)	Süreksizlik Alterasyon Sayısı (Ja)	Su Azaltma Koşulu (Jw)	Gerilme Azaltma Faktörü (SRF)	Q değeri	Kaya Kütle Sınıfı
A1	En iyi	48	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	2,4	Zayıf kayaç
	Ortalama	22	İETDE (6)	Düz, veya düzlemsel (1)	Orta ayrışma (4)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,183	Çok zayıf kayaç
	En kötü	10	İETDE (6)	Düz, veya düzlemsel (1)	Orta ayrışma (4)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,083	Son derece zayıf kayaç
A2	En iyi	50	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kilsiz, Sağlam kayada bir kesme zonu, (kazı derinliği > 50 m) (2.5)	5	Orta kayaç
	Ortalama	23	İETDE (6)	Düz veya düzlemsel (1)	Az ayrışma (2)	Orta düzeyde su gelişi veya basınç, eklem dolguları yer yer yıkanması (0,66)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,253	Çok zayıf kayaç
	En kötü	10	İETDE (6)	Düz, veya düzlemsel (1)	Az ayrışma (2)	Orta düzeyde su gelişi veya basınç, eklem dolguları yer yer yıkanması (0,66)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,11	Çok zayıf kayaç
B1	En iyi	50	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Yüzeysel kirlenme (1)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kilsiz, Sağlam kayada bir kesme zonu (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	10	İyi kayaç
	Ortalama	45	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Yüzeysel kirlenme (1)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kilsiz, Sağlam kayada bir kesme zonu, (kazı derinliği > 50 m) (2.5)	9	Orta kayaç
	En kötü	10	İETDE (6)	Düz veya düzlemsel (1)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kilsiz, Sağlam kayada bir kesme zonu (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,166	Çok zayıf kayaç
A3-A4	En iyi	48	İETDE (3)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	4,8	Orta kayaç
	Ortalama	23	Bir eklem takımı ve dağılan eklem (3)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	2,3	Zayıf kayaç
	En kötü	10	Bir eklem takımı (2)	Düz veya düzlemsel (1)	Orta ayrışma (4)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,25	Çok zayıf kayaç
B2	En iyi	73	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Yüzeysel kirlenme (1)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kilsiz, Sağlam kayada bir kesme zonu, (kazı derinliği > 50 m) (2.5)	14,6	İyi kayaç
	Ortalama	50	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Yüzeysel kirlenme (1)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kilsiz, Sağlam kayada bir kesme zonu, (kazı derinliği > 50 m) (2.5)	10	İyi kayaç
	En kötü	10	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,5	Çok zayıf kayaç
C1	En iyi	53	İETDE (6)	Pürüzlü (3)	Yüzeysel kirlenme (1)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	5,3	Orta kayaç
	Ortalama	20	İETDE (6)	Düz, veya düzlemsel (1)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı, veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,333	Çok zayıf kayaç
	En kötü	12	İETDE (6)	Düz, veya düzlemsel (1)	Az ayrışma (2)	Orta düzeyde su gelişi veya basınç, eklem dolguları yer yer yıkanması (0,66)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,132	Çok zayıf kayaç
C2	En iyi	56	ÜETDE (12)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	1,4	Zayıf kayaç
	Ortalama	26	ÜETDE (12)	Pürüzlü (3)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,65	Çok zayıf kayaç
	En kötü	13	Üç eklem takımı (9)	Düz, düzlemsel (1)	Az ayrışma (2)	Kuru yapılan kazı veya küçük sızmalar (1)	Kil içeren/ayırışmış, bir kesme zonu, (kazı derinliği ≤ 50 m) (5)	0,144	Çok zayıf kayaç

* İki eklem takımı ve rastgele dağılan eklemler

* Üç eklem takımı ve rastgele dağılan eklemler

*Parantez içindeki sayılar sınıflama puan değerlerini göstermektedir.

Tablo 10. RMQR sınıflama sisteminde kaya kütle sınıfı

Yapısal Bölgeler (Km)	Koşullar	Bozunma Derecesi	Süreksizlik Seti Miktarı	Süreksizlik Açıklığı, RQD	Süreksizlik Durumu	Su Akıntı Durumu	Su Emme Durumu	RMQR	Kaya Kütle Sınıfı
A1	En iyi	AB (9)	İES (12)	48 (4)	Pürüzlü (15)	Nemli (7)	Düşük (4)	51	Orta kayaç
	Ortalama	ODB (6)	İES (12)	22 (0)	Pürüzlü (15)	Nemli (7)	Orta (3)	44	Orta kayaç
	En kötü	ODB (6)	İES (12)	0 (0)	Ayrılmış ve dolgulu (7)	Islak (5)	Orta (3)	33	Zayıf kayaç
A2	En iyi	AB (9)	İES (12)	50 (4)	Pürüzlü (15)	Nemli (7)	Düşük (4)	51	Orta kayaç
	Ortalama	ODB (6)	İES (12)	23 (1)	Pürüzlü (15)	Islak (5)	Orta (3)	42	Orta kayaç
	En kötü	ODB (6)	İES (12)	0 (0)	Ayrılmış ve dolgulu (7)	Islak (5)	Orta (3)	33	Zayıf kayaç
B1	En iyi	Lekeli (12)	İES (12)	70 (4)	Az pürüzlü (22)	Kuru (9)	Kılcal (5)	64	İyi kayaç
	Ortalama	AB (9)	İES (12)	45 (4)	Az pürüzlü (22)	Kuru (9)	Kılcal (5)	61	İyi kayaç
	En kötü	AB (9)	İES (12))	0 (0)	Pürüzlü	Nemli (7)	Düşük	47	Orta kayaç
A3-A4	En iyi	AB (9)	BES (16)	48 (4)	Pürüzlü (15)	Kuru (9)	Düşük (4)	56	Orta kayaç
	Ortalama	AB (9)	BES (16)	23 (1)	Pürüzlü (15)	Kuru (9)	Düşük (4)	54	Orta kayaç
	En kötü	ODB (6)	BES (16)	0 (0)	Ayrılmış ve dolgulu (7)	Kuru (9)	Orta (3)	41	Orta kayaç
B2	En iyi	AB (9)	ÜES (8)	56 (4)	Az pürüzlü (22)	Kuru (9)	Düşük (4)	56	Orta kayaç
	Ortalama	ODB (6)	ÜES (8)	26 (1)	Pürüzlü (15)	Kuru (9)	Düşük (4)	43	Orta kayaç
	En kötü	ODB (6)	ÜES (8)	13 (1)	Pürüzlü (15)	Kuru (9)	Orta (3)	42	Orta kayaç
C1	En iyi	Lekeli (12)	İES (12)	73 (4)	Az pürüzlü (22)	Kuru (9)	Kılcal (5)	64	İyi kayaç
	Ortalama	AB (9)	İES (12)	50 (4)	Az pürüzlü (22)	Kuru (9)	Kılcal (5)	61	İyi kayaç
	En kötü	ODB (6)	İES (12)	0 (0)	Pürüzlü (15)	Islak (5)	Düşük (4)	42	Orta kayaç
C2	En iyi	AB (9)	İES (12)	53 (4)	Az pürüzlü (22)	Kuru (9)	Düşük (4)	60	Orta kayaç
	Ortalama	ODB (6)	İES (12)	20 (1)	Pürüzlü (15)	Kuru (9)	Düşük (4)	47	Orta kayaç
	En kötü	ODB (6)	İES (12)	12 (1)	Pürüzlü (15)	Nemli (7)	Orta (3)	44	Orta kayaç

*ODB: Orta Düzeyde Bozunmuş; AB: Az Bozunmuş, BES: Bir eklem seti, İES: İki eklem seti, ÜES: Üç eklem seti

*Parantez içindeki sayılar sınıflama puan değerlerini göstermektedir.

Tünel güzergahı için üç farklı sınıflama sisteminden yararlanılarak elde edilen puanlar, her birinin kendi ölçütlerine göre yorumlanmış ve sınıflama sonuçları tek bir tabloda bir araya getirilerek karşılaştırmalı bir değerlendirme imkânı sunulmuştur. Böylece,

sınıflama sistemleri arasındaki benzerlik ve farklılıklar ortaya konmuş, sınıflama sistemine yönelik daha bütüncül bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlanmıştır (Tablo 11).

Tablo 11. RMQR, Q ve RMQR sınıflama sistemlerine ait tanımlama ve puanlar

Yapısal Bölgeler (Km)	Koşullar	RMR		Q		RMQR	
		Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan
A1	En iyi	Orta kaya	50	Zayıf kayaç	2.4	Orta kayaç	51
	Ortalama	Zayıf kaya	33	Çok zayıf kayaç	0.183	Orta kayaç	44
	En kötü	Zayıf kaya	25	Son derece zayıf kayaç	0.083	Zayıf kayaç	33
A2	En iyi	İyi kayaç	61	Orta kayaç	5	Orta kayaç	51
	Ortalama	Zayıf kayaç	33	Çok zayıf kayaç	0.253	Orta kayaç	42
	En kötü	Zayıf kayaç	22	Çok zayıf kayaç	0.11	Zayıf kayaç	33
B1	En iyi	İyi kayaç	76	İyi kayaç	10	İyi kayaç	64
	Ortalama	Orta kayaç	53	Orta kayaç	9	İyi kayaç	61
	En kötü	Zayıf kayaç	31	Çok zayıf kayaç	0.166	Orta kayaç	47
A3-A4	En iyi	Orta kayaç	57	Orta kayaç	4.8	Orta kayaç	56
	Ortalama	Zayıf kayaç	33	Zayıf kayaç	2.3	Orta kayaç	54
	En kötü	Zayıf kayaç	25	Çok zayıf kayaç	0.25	Orta kayaç	41
B2	En iyi	İyi kayaç	75	İyi kayaç	14.6	Orta kayaç	56
	Ortalama	Orta kayaç	53	İyi kayaç	10	Orta kayaç	43
	En kötü	Zayıf kayaç	27	Çok zayıf kayaç	0.5	Orta kayaç	42
C1	En iyi	Orta kayaç	56	Orta kayaç	5.3	İyi kayaç	64
	Ortalama	Zayıf kayaç	35	Çok zayıf kayaç	0.333	İyi kayaç	61
	En kötü	Zayıf kayaç	23	Çok zayıf kayaç	0.132	Orta kayaç	42
C2	En iyi koşul	Orta kayaç	60	Zayıf kayaç	1.4	Orta kayaç	60
	Ortalama koşul	Zayıf kayaç	40	Çok zayıf kayaç	0.65	Orta kayaç	47
	En kötü koşul	Zayıf kayaç	29	Çok zayıf kayaç	0.144	Orta kayaç	44

Tablo 11'e göre A1, A2, A3-A4, C1 ve C2 yapısal bölgelerinde RMR ve Q sistemi tarafından önerilen tanımlamaların özellikle ortalama ve kötü koşullarda daha uyumlu olduğu görülmektedir. Söz konusu yapısal bölgeler için yapılan nokta yük deneylerinde diğer yapısal bölgelere kıyasla daha düşük dayanım değerleri sunmakta olup bu bölgelerin ayrışma düzeyleri yapılan saha çalışmalarında gözlenmiştir. Diğer yandan RMR ve RMQR sistemleri iyi koşullarda daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. B1 ve B2 gibi dayanımı yüksek ve ayrışma düzeyi düşük olan bölgede üç sınıflama sistemi de birbiriyle nispeten daha benzer tanımlama sergilemiştir.

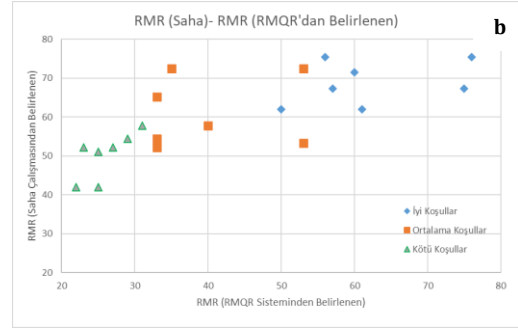
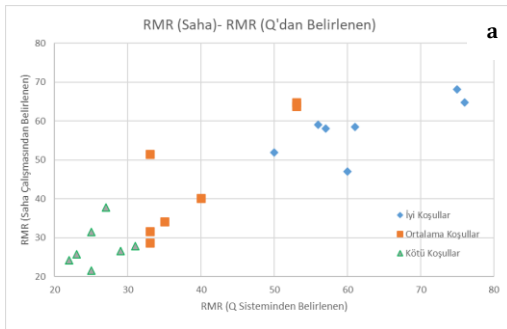
RMR, Q ve RMQR sistemlerinin birbiri arasında ampirik ilişkiler kullanılarak elde edilmesine olanak sağlayan ampirik ilişkiler geliştirilmiştir. Aydan vd. [3] RMR ve Q sınıflama sistemi puanlar kullanılarak RMQR değerinin elde edilebileceğini belirtmiştir. Bieniawski [20]. Q kullanarak RMR elde edilmesine yönelik bir ilişki ortaya koymuştur. Araştırmacılar tarafından önerilen eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$RMQR = 100 \frac{RMR}{RMR + 1.1(100 - RMR)} \quad (1)$$

$$RMQR = 16.7 \log(Q) + 50 \quad (2)$$

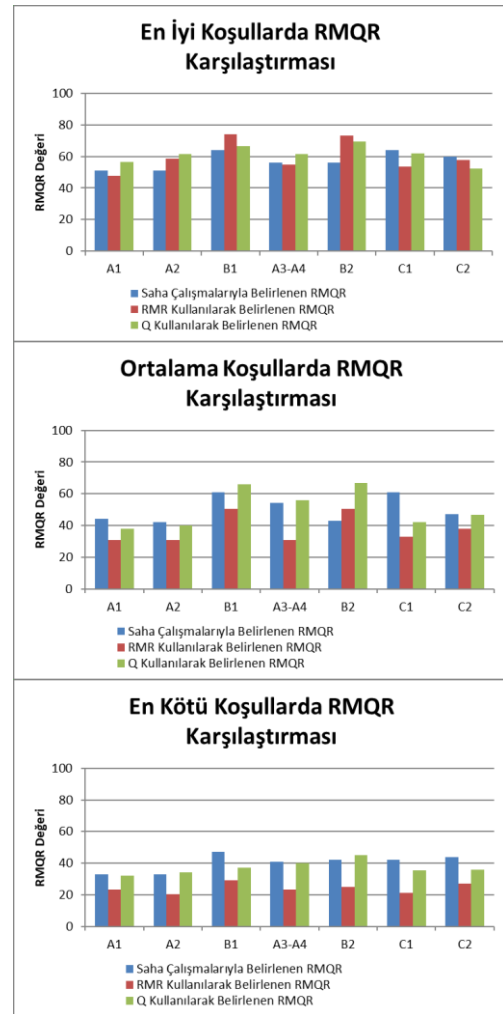
$$RMR = 9 \ln(Q) + 44 \quad (3)$$

Q sistemi ve RMQR sistemi kullanılarak RMR değerleri elde edilmiş ve bu sonuçlar sahadan elde edilen RMR değeri ile kıyaslanmıştır (Şekil 6). Buna göre Q puanından elde edilen RMR değeri tüm koşullarda yakın sahadan belirlenen RMR sistemi bazı aykırı sonuçlar olmakla beraber yakın puanlama değeri sunmaktadır (Şekil 6.a). RMQR değeri ile elde edilen RMR değerleri, saha verilerine dayalı RMR değerlerine kıyasla genel olarak daha düşük sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 6.b).



Şekil 6. Q sistemi ve RMQR sistemi kullanılarak belirlenen RMR değerlerin karşılaştırılması

Yukarıdaki denklemlerde yapılan saha çalışmalarından RMR değeri ve Q değeri kullanılarak RMQR değerleri ayrıca belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Araştırmadan belirlenen RMQR ile RMR ve Q sistemi kullanılarak belirlenen RMQR değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 7'ye göre araştırmada elde edilen RMQR değeri ile RMR ve Q puanları kullanılarak elde edilen RMQR değerleri en iyi, ortalama ve kötü koşullarda elde edilen puanlama değeri kısmen birbirinden farklı olsa da büyük ölçüde aynı tanımlama aralığında kaldığı görülmüştür. Ayrıca sahadan yapılan çalışmalarla elde edilen RMQR değeri ile Q puanı kullanılarak Aydan

vd. [3] tarafından önerilen ampirik yöntem ile belirlenen RMQR değerinin tüm koşullarda oldukça yakın puanlama değeri sunduğu belirlenmiştir.

Kullanılan üç sistemde nadir de olsa bazı puanlamaların birbirinden oldukça farklı çıkması, yapısal bölgeye ait zemin koşullarına göre her sınıflama sistemin parametreler arasındaki belli başlı farklılıklardan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu araştırma çerçevesinde, Antalya il sınırları içerisinde yer alan Taşağıl (Manavgat) yolu ile Başlar (İbradı) yolunun, Km: 33+832,199 – 38+740 arasında bulunan Demirkapı tünel güzergâhı ve çevresinin jeolojik, mühendislik jeolojisi özellikleri ortaya konulmuştur.

İncelenen alanda, yaş sırasına göre, Kasımlar formasyonu (Anisiyen-Noriyen), Menteşe dolomiti (Noriyen-Resiyen), Leylek kireçtaşı (Resiyen), Üzümdere formasyonu (Resiyen-Erken Liyas), yaşlı Dumanlı formasyonu (Kampaniyen-Maastrichtiyen) ve son olarak alüvyon (Kuvaterner) yüzeylemeleri gözlemlenmektedir.

Demirkapı tünel hattının büyük bir bölümü Leylek kireçtaşı ve Menteşe dolomiti birimlerinden geçmekte olup, bu birimler tünel güzergâhın orta kısımlarında yer almaktadır. Tünel giriş kısmında Kasımlar formasyonu, çıkış kısmında ise Üzümdere formasyonu yer almaktadır.

Tünel güzergâhı, tünel giriş ve çıkış noktaları, fay hatları ve formasyon gibi unsurlar dikkate alınarak benzer davranış gösteren farklı yapısal bölgelere ayrılmış; bu bölgelerde RMR, Q ve RMQR sınıflama sistemleri uygulanarak en iyi, en kötü ve ortalama koşullar ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışmada, yapısal bölgelere yönelik gerçekleştirilen RMR ve RMQR sınıflama sistemleri, kısmen benzer kaya tanımlamaları sunarken, Q sisteminin aynı yapısal bölgelerde çoğunlukla daha düşük tanımlama içeren ve sınıflama kategorilerine girdiği gözlemlenmiştir.

RMR ve Q sistemleri, özellikle ortalama ve kötü koşullardaki A1, A2, A3-A4, C1 ve C2 yapısal bölgelerinde daha uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu bölgelerde düşük dayanım ve diğer bölgelere göre daha fazla ayrışma gözlenmiştir. Öte yandan, iyi koşullarda RMR ile RMQR sistemleri daha uyumludur. Yüksek dayanım ve düşük ayrışmaya sahip B1 ve B2 bölgelerinde ise üç sınıflama sistemi birbirine daha yakın sonuçlar sunmuştur.

Farklı yöntemlerle hesaplanan RMQR değerleri, puanlama değerinde farklılıklar göstermelerine

rağmen genellikle aynı kaya sınıfı tanımlama aralığında yer almıştır.

Yapısal bölge tanımlamasında Km:1+690-1+700 arası Fay Zonu (D) olarak ayırtlanmıştır. Fay zonları kazıda ve desteklemede risk taşıyan bölgeler olup, daha detaylı yöntemler kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada kaya kütlesi sınıflamaları üzerinde durulduğu için fay zonu hesaplamada kapsam dışı bırakılmıştır.

Bu çalışmada sınıflama sistemleri (RMR, Q ve RMQR) kullanılarak kaya sınıfı tanımlamalarının birbiriyle ilişkisi ve uyumu irdelenmiş olup destek sistemleriyle ilgili bir değerlendirme içermemektedir. Özellikle, tünel güzergâhlarında yapılan kaya kütlesi sınıflamaları için saha verilerinin elde edilmesinin önemli olduğu ve yaygın olarak kullanılan kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin karşılaştırmalı olarak kullanılmasının destek sistemlerinin belirlenmesinde daha doğru sonuçlar elde edilmesinde yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Saha çalışmalarında göstermiş oldukları anlayıştan dolayı Demirkapı tüneli çalışanlarına ve proje verilerini kullanmamıza olanak sağlayan KGM Antalya 13. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

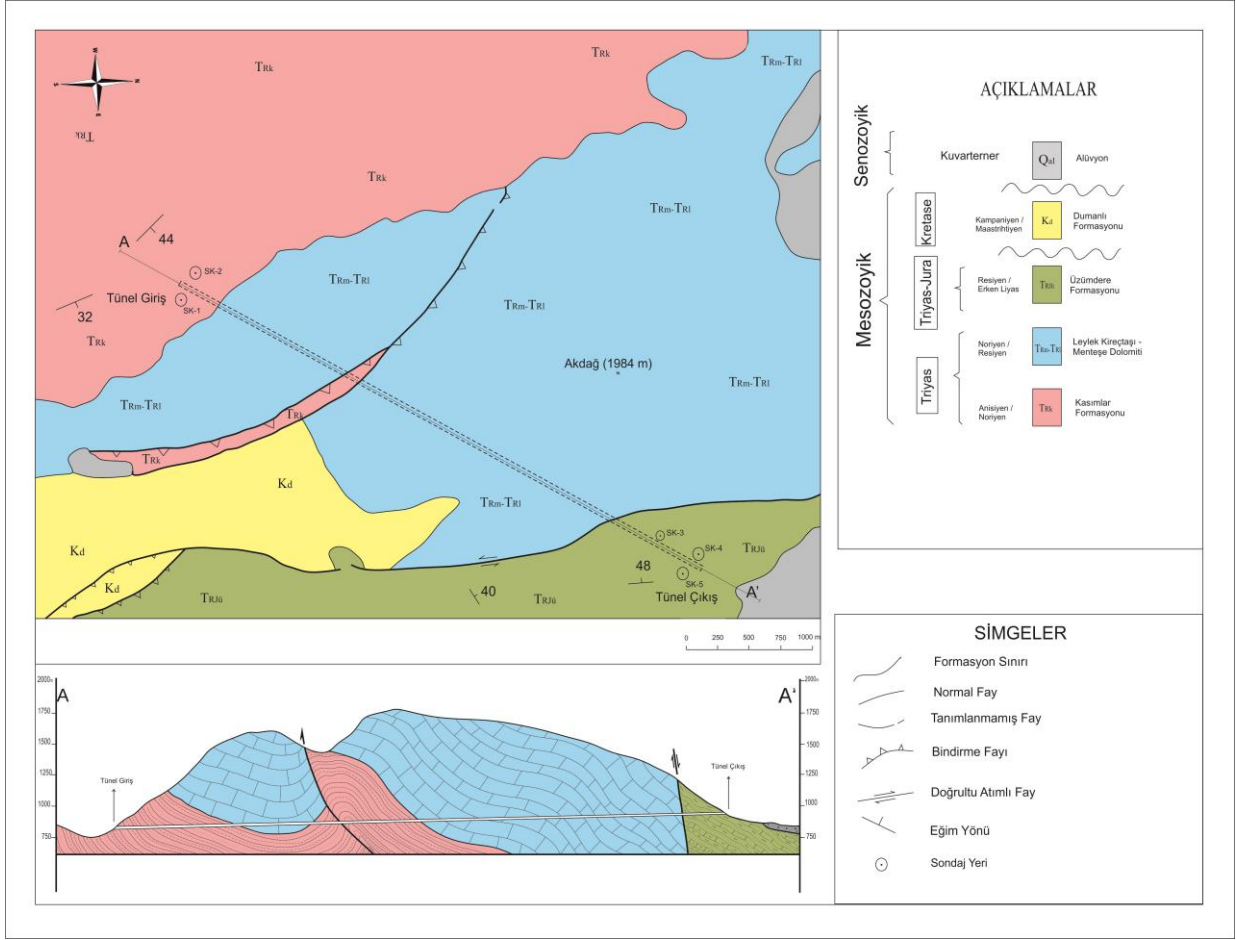
Kaynakça

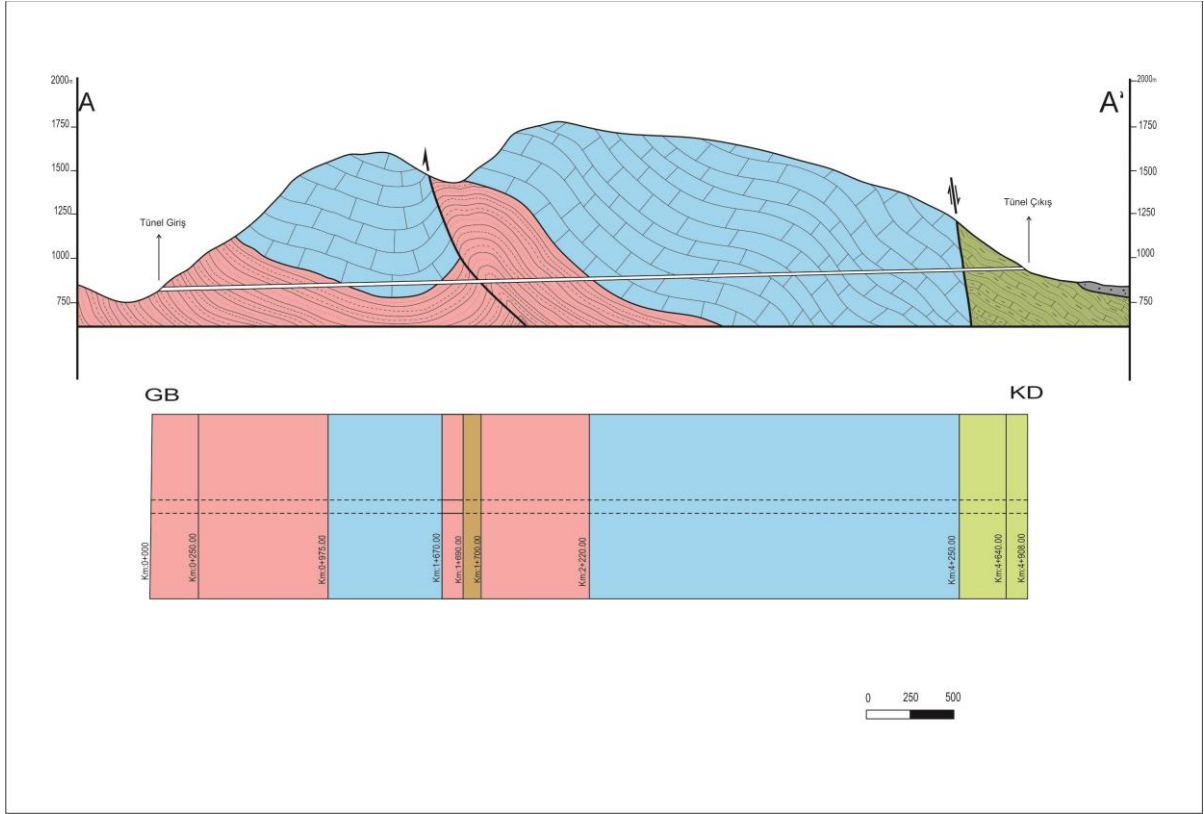
- [1] Beyhan, M. 2016. Demirkapı Tüneli (İbradı-Antalya) Mühendislik Jeolojisi İncelemesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94 s. Isparta.
- [2] Agricola, G. 1556. De re metallica. Translated from the first Latin edition of 1556 by H.C. Hoover and L.H. Hoover, 1950. Dover Publications, Inc., New York
- [3] Aydan, Ö. Ulusay, R. Tokashiki, N. 2013. A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses.
- [4] Ritter, W. 1879. Die Statik der Tunnelgewölbe. Berlin: Springer.
- [5] Terzaghi, K. 1946. Rock defects and loads on tunnel support. In: Proctor RV, White T (eds) Rock tunneling with steel supports. Commercial Shearing & Stamping Co., Youngstown, pp 43–64.
- [6] Stini, J. 1950. Tunnelbaugeologie. Springer, Vienna.
- [7] Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans South Afr Inst Civil Eng 15:335–344.

- [8] Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications. Wiley, New York.
- [9] Barton, N. Lien, R. Lunde, I. 1976. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech 6(4):189-239.
- [10] Aydan, Ö., Tokashiki, N., ve Ulusay, R., 2015. Rock Mass Quality Rating (RMQR) for Rock Engineering. International Jurnal of the JCRM. Volume 11, Number 1, October 2015, pp.17-20.
- [11] Mutlutürk, M., Altındağ, R., Demirdağ, S., Şengün, N., 2018. WMES 2018, World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium, 3 - 07 Eylül 2018, (Özet Bildiri)
- [12] Karakaplan E., Akkaya, D., Basarir, H., 2022. RMQR Sisteminin Honaz Tüneli İçin Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi. Conference: 27th International Mining Congress and Exhibition of Turkey.
- [13] Şenel M., Dalkılıç, H., Gedik, İ., Serdaroğlu, M., Metin, S., 1998. Orta Toroslar'da Güzelsu koridoru ve kuzeyinin stratigrafisi, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 120.
- [14] Altuğ, S., 1971. Manavgat-Oymapınar rezervuarındaki Mesozoyik birimlerin stratigrafisi. Elektrik işleri etüt idaresi raporu No:39-71, Ankara, (yayımlanmamış).
- [15] Ulusay, R., 2007. Hacettepe üniversitesi, Mühendislik Fakültesi , Ankara, TMMOB jeoloji mühendisleri odası yayınları 60, Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri kitabı S.13-62, 123-138.
- [16] Erik, D., 2004. Boğsak karayolu tünelleri (Taşucu-Mersin) Jeoteknik tasarımı, Doktora tezi, Isparta.
- [17] Barton, N., Lien , R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support rock mechanical 6(4), 189-239.
- [18] KGM, 2012. Karayolları Genel Müdürlüğü. (Antalya-Manavgat) Ayrımı-(Başlar-İbradı) Ayrımı Yolu Demirkapı Tüneli Varyantı (Km:33+832.199-38+740) Mühendislik Jeolojisi Raporu.
- [19] ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E.T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 p. 108.
- [20] Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classification. John Willey and Sons, 237p.

EKLER

Ek A. Bölgenin jeoloji haritası [1]



Ek B. Yapısal bölge ayırımı [1]

Pandemi Süreçlerinde S-I-R Gruplarının Tahmini: Farklı Regresyon ve Diferansiyel Modellerin Performans Analizi

Hamit ARMAĞAN^{*1}, Ulaş YAMANCI²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Enformatik Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstatistik Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 24.04.2025, Kabul / Accepted: 21.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Covid-19,
SIR Yayılım Modeli,
Gauss Regresyonu,
Fourier Regresyonu,
Sinüs Regresyonu,
Diferansiyel Denklem
Tabanlı Regresyon

Öz: Bu çalışmanın amacı, pandemi süreçlerinde hastalık şüphesi taşıyan sağlıklı bireyler (S- susceptible), hastalığa yakalanan bireyler (I- infected) ve iyileşen ya da vefat eden bireylerden (R- recovered) oluşan S-I-R gruplarının sayısını tahmin etmek için farklı regresyon modellerinin performansını değerlendirmektir. Türkiye'deki COVID-19 verileri Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı'nın resmi internet sitesinden alınmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti, pandeminin başlangıcından itibaren seçilen zaman dilimini kapsamakta ve günlük S-I-R grup sayılarını içermektedir. Polinom regresyonu, Fourier regresyonu, Gauss regresyonu ve sin toplamı regresyonu gibi farklı regresyon modelleri incelenmiş ve tahmin performansları analiz edilmiştir. Ayrıca, Chebyshev polinomlarına dayalı doğrusal olmayan bir denklem sistemi olan SIR modelinin diferansiyel çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Performans ölçütleri olarak R^2 (RSquare- Determination Coefficient) ve Ortalama Hatanın Karekökü (RMSE- Root Mean Squared Error) kullanılmıştır. Sonuçlar, farklı regresyon modellerinin S-I-R gruplarının sayısını tahmin etmedeki performansını değerlendirerek pandemi süreçlerinin analizi için en uygun modelin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Prediction of S-I-R Groups in Pandemic Processes: A Performance Analysis of Various Regression and Differential Models

Keywords

Covid-19,
SIR Spread Model,
Gaussian Regression,
Fourier Regression,
Sine Regression,
Differential Equation Based
Regression

Abstract: The aim of this study is to evaluate the performance of various regression models in predicting the number of individuals in the S-I-R groups during pandemic processes: susceptible individuals (S), infected individuals (I), and those who have recovered or passed away (R). The COVID-19 data used in the study were obtained from the official website of the Ministry of Health of the Republic of Türkiye. The dataset covers a selected time period starting from the onset of the pandemic and includes daily counts of the S-I-R groups. Various regression models, such as polynomial regression, Fourier regression, Gaussian regression, and sine sum regression, were analyzed and their prediction performances were evaluated. Additionally, these models were compared with the differential solutions of the SIR model based on Chebyshev polynomials, which constitutes a nonlinear system of equations. The performance metrics used in the evaluation were the coefficient of determination (R^2) and the root mean squared error (RMSE). The results contribute to identifying the most appropriate model for analyzing pandemic dynamics by assessing the effectiveness of different regression approaches in predicting S-I-R group counts.

1. Giriş

Salgın hastalıkların tanınması ve kontrol altına alınması, insan sağlığının korunmasında önemli bir unsurdur. Bu sebeple SIR modeli epidemiyolojideki en önemli araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. 1927 yılında Kermack ve McKendrick [3] tarafından ortaya atılan SIR modeli, salgın hastalıkların nasıl yayıldığını ve yönetilebileceğini anlamada temel bir model olmuştur. Basit olmasına rağmen SIR modeli, kısa ve uzun vadeli salgın dinamiklerini tanımak için güçlü bir model sunar. Nüfusu üç ana gruba ayırır: Duyarlı bireyler (S), enfekte bireyler (I) ve iyileşmiş ya da vefat etmiş bireyler (R). Bu basit sınıflandırma, hastalığın nasıl yayıldığını ve popülasyon üzerindeki etkisini modellerken matematiksel analiz ve tahminler için alt yapı oluşturur.

SIR modeli, çok sayıda araştırmacının çeşitli salgın hastalıkları incelemesine ve modellemesine imkân sağlamıştır. Bu modelin uygun parametre çözümleri, hastalık dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına ve etkili müdahale stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bhattacharya ve arkadaşları [1] hastalığın yayılma oranını ve pandeminin potansiyel boyutunu değerlendirmek için SIR modelini ve varyasyonlarını incelemiştir. COVID-19 pandemisi süresince, SIR modeli ve türevleri, virüsün yayılma dinamiklerini anlamak ve kontrol stratejileri geliştirmek açısından kritik bir rol oynamıştır. Örneğin, Uddin ve Algehyne [13] COVID-19'un yayılmasını modellemek için diferansiyel denklemler kullanmış ve zaman içinde koruma, maruz kalma ve ölüm oranlarındaki değişiklikleri incelemiştir. Zhu ve Shen [14] gibi diğer araştırmacılar, pandeminin dinamiklerini değerlendirmek ve müdahale stratejilerine rehberlik etmek için SIR modeline dayalı varyasyon modeller geliştirmiştir. Ayrıca SIR modelinin yaklaşık çözümleri Hermite serileri kullanılarak elde edilmiştir [10].

Geniş çapta kabul gören SIR modeli, hastalık yayılımını anlamak ve kontrol stratejileri geliştirmek için matematiksel biyoloji ve epidemiyoloji alanlarında temel bir araç olmaya devam etmektedir. Bu model, salgınların kontrolündeki zorlukları aşmada ve gelecekteki olası salgınlara karşı daha etkin hazırlık yapmada önemli katkılar sunmaktadır.

Yapay zeka algoritmalarında, veriler arasındaki ilişkilerin modellenmesinde polinom çekirdekli regresyon algoritmaları yaygın biçimde tercih edilmektedir. Ancak birçok durumda, yalnızca tek bir girdi değişkeni kullanan doğrusal regresyon yöntemleri, özellikle günlük yaşamdan elde edilen verilerle oluşturulan modellerde yeterli tahmin doğruluğu sağlayamamaktadır [8]. Bu durum, araştırmacıları birden fazla girdi değişkenini aynı anda değerlendiren doğrusal olmayan regresyon tekniklerine yönlendirmiştir [6,9]. Bununla birlikte, bu tür modellerin doğrudan veya optimizasyon süreci

olmadan uygulanması, regresyon analizlerinde istenilen başarı düzeyine ulaşılmasını engelleyebilmektedir. Özellikle bazı veri kümelerinde, modelin performansını artırmak amacıyla polinom derecesinin yükseltilmesi ya da algoritmada kullanılan parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Ancak, polinom derecesinin artırılması modelin yapısını daha karmaşık hale getirebilmekte ve aşırı uyum (overfitting) riskini beraberinde getirmektedir [11,12]. Bu durum, yazılım algoritmalarının verimliliğini azaltmakta ve işlem süresini önemli ölçüde artırmaktadır. Buna karşın, parametre optimizasyonu ile desteklenen parametrik matematiksel modeller kullanan algoritmalar, daha yüksek başarı oranı ve işlem hızıyla öne çıkmaktadır [15,16].

Regresyon modelleri, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki matematiksel fonksiyonlar aracılığıyla sürekli değişkenlerin yanıtlarını tahmin eder [6,8]. Regresyon modellemesi, bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkinin bir fonksiyon ile temsil edilmesidir [6,9]. Bu fonksiyonun temel amacı, modellenen sistemle ilgili tanım kümesindeki değerlere dayanarak tahminleri hesaplamaktır [6]. Literatürde birçok regresyon modeli olup, bu modellerden polinom regresyon, Fourier regresyon, Gaussian regresyon, sin regresyon ve diferansiyel denklem tabanlı regresyon bu çalışmada tercih edilmiştir [9,12].

Bu çalışmanın amacı, pandemi süreçlerinde S-I-R gruplarındaki bireylerin sayısını tahmin etmek için farklı regresyon modellerinin performansını değerlendirmektir. Bu amaçla polinom, Fourier, Gaussian, Sinus ve diferansiyel denklem bazlı çeşitli regresyon modelleri Türkiye'deki COVID-19 verileri kullanılarak incelenmiş ve tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, pandemi süreçlerinin analizinde en uygun tahmin modelinin belirlenmesini amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan COVID-19 verileri, Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı'nın resmi internet sitesinden elde edilmiştir [2]. Sağlık Bakanlığı, pandeminin başlangıcından bu yana Türkiye'deki günlük vaka, iyileşme, test ve ölüm sayıları gibi çeşitli istatistikleri yayınlamıştır. Bu veriler, Türkiye'deki pandeminin seyrini anlamak için çok önemlidir. Analizde kullanılan veri seti, pandeminin başlangıcından itibaren seçilen zaman dilimini kapsamakta ve üç ana gruba ayrılan nüfus bilgilerini içermektedir: hastalıktan şüphelenilen sağlıklı bireyler (S), hastalığa yakalanan bireyler (I) ve iyileşen yada vefat eden bireyler (R).

Bu çalışmada, Türkiye'de COVID-19 pandemisi sırasında üç ana grubun (S, I, R) sayısını tahmin etmek için farklı regresyon modelleri incelenmiştir. Bu

modeller arasında polinom regresyonu, Fourier regresyonu, Gauss regresyonu, sinus regresyonu ve diferansiyel bazlı regresyon yer almaktadır. Her model belirli matematiksel formüllere göre özelleştirilmiş ve veri setine uygulanmıştır.

Modellerin performansı R^2 (Determination Coefficient), RMSE (Root Mean Squared Error) ve MAPE (Mean Absolute Percentage Error) gibi istatistiksel ölçütler kullanılarak değerlendirilmektedir. R^2 değeri modelin bağımsız değişkenlerin hedef değişkeni ne kadar iyi açıkladığını ölçen bir istatistiktir. RMSE değeri ise modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar sapıp saptığını bir göstergesidir. MAPE (Mean Absolute Percentage Error) yüzdelik hata miktarını göstermekte olup tahmin hatalarının gerçek değerlere göre yüzdesel büyüklüğünü ifade eder. Bu metrikler modeller arasında karşılaştırma yapılmasını ve en uygun modelin seçilmesini sağlamıştır.

2.1. Matematiksel modelleme

Bu çalışmada polinom regresyon (1), gauss regresyon (2), sigmoidal lojistik regresyon (3), fourier regresyon (4) ve sinus regresyon (5) modelleri kullanılmıştır. Her bir model, hastalığın yayılma dinamiklerinin farklı yönlerini ve karakteristiklerini yansıtmada özgün yeteneklere sahiptir. Örneğin, Fourier serisi mevsimsel değişimleri ve periyodik yapıları etkili biçimde modelleyebilirken; Gauss modeli, veri setindeki tepe noktalarını ve yoğunluk dağılımını temsil etmede güçlüdür. Sinüs toplamı modeli ise, periyodik olmayan dalgalanmalara odaklanarak daha karmaşık dalga biçimlerini yakalayabilme kapasitesine sahiptir.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^3 a_i \exp \left(-\frac{(x - b_i)^2}{c_i^2} \right) \quad (2)$$

$$f(x) = d + \frac{a - d}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b} \quad (3)$$

$$f(x) = y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx) \quad (4)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^5 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (5)$$

2.1.1. Polinom regresyon

Polinom regresyon, bağımlı bir değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi ifade etmek için polinom fonksiyonları kullanarak bir regresyon modeli oluşturma yöntemidir. Genel olarak, n. dereceden bir polinom regresyon modeli aşağıdaki gibidir:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n. \quad (6)$$

Burada, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ katsayıları modelin öğrenilen parametreleridir ve değerleri regresyon analizi ve doğrusal denklem sistemleri ile hesaplanır. Polinom regresyonu uygularken modelin derecesini seçmek önemlidir. Bunun nedeni, düşük dereceli bir modelin veri setinin karmaşıklığını yakalayamaması ve benzer şekilde yüksek dereceli bir modelin aşırı uyuma yol açabilmesidir. Bu model, değişkenler arasındaki karmaşık veya doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için kullanılır.

2.1.2. Gauss regresyonu

Gauss regresyon modeli kullanılarak, veri setindeki çeşitli eğilimleri ve düzensizlikleri modellemek için Gauss fonksiyonlarının kombinasyonu kullanılmıştır.

$$f(x) = \sum_{i=1}^3 a_i \exp \left(-\frac{(x - b_i)^2}{c_i^2} \right) \quad (7)$$

Bu formüldeki a_1, a_2 ve a_3 katsayıları her bir Gauss fonksiyonunun yüksekliğini belirlerken, b_1, b_2 ve b_3 katsayıları fonksiyonun merkezini, yani x eksenindeki tepe noktasının konumunu ayarlar. c_1, c_2 ve c_3 katsayıları fonksiyonun genişliğini kontrol eder.

Gauss regresyon modeli, özellikle zaman serisi verilerindeki karmaşık eğilimleri ve dalgalanmaları yakalama kabiliyeti nedeniyle pandemi gibi dinamik ve hızlı değişen durumları modellemek için en uygun seçimlerden biridir. Bu modelin yüksek doğruluğu ve düşük hata oranı, sağlıklı bireylerin sayısını tahmin etmede büyük başarı sağlamış ve pandemi yönetiminde kullanılan önemli modellerden biri olmuştur. Dolayısıyla, sağlık politikaları ve müdahale stratejileri geliştirilirken bu matematiksel modellerin kullanılması daha doğru ve etkili kararlar alınmasına yardımcı olmaktadır.

2.1.3. 4-Parametrelili sigmoidal lojistik regresyon

4-P Sigmoidal lojistik regresyon modelinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$f(x) = d + \frac{a - d}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b} \quad (8)$$

Bu modelde a parametresi fonksiyonun üst sınırını, d parametresi ise fonksiyonun alt sınırını temsil etmektedir. c parametresi eğimin derecesini belirler. b parametresi x eksenini boyunca kayma miktarını temsil eder ve eğrinin orta noktasının yerini belirler. Bu model, belirli bir duruma veya koşula duyarlı nüfus oranının belirli bir zaman aralığında nasıl değiştiğini modellemek için kullanılabilir. a, b, c ve d parametreleri, modelin hastalık yayılımı üzerindeki etkilerini yansıtmak şeklinde optimize edilir. 4-P sigmoidal lojistik model, bir hastalığın yayılma hızının başlangıçta yavaş olduğu, orta derecede hızlandığı ve

sonunda bir doygunluğa ulaştığı durumları modellemek için özellikle uygundur.

2.2.4. Fourier regresyonu

Fourier regresyonu, periyodik bir fonksiyonu sinüs ve kosinüs terimlerinin toplamı olarak ifade eden bir regresyon yöntemidir. Genel olarak Fourier regresyon modeli denklem 9'da verilmiştir:

$$f(x) = y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx) \quad (9)$$

Model, mevsimsel etkileri, yayılma dönemlerindeki artış ve azalışları ve hastalık verilerinde gözlemlenen diğer periyodik özellikleri yakalamayı amaçlamaktadır. Her bir terim, farklı frekanslarda hastalığın yayılma dinamiklerindeki dalgalanmaları temsil etmektedir. Bu, modelin hastalık vakalarının zaman içinde nasıl değişebileceğini daha kesin bir şekilde tahmin etmesini sağlar.

a_0 terimi veri setinin genel ortalamasını ifade eder ve sabit bir değerdir. Cosinus ve Sinus terimleri farklı frekanslardaki dalgalanmaları modellemek için kullanılır ve $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ katsayıları dalgalanmaların genliklerini (yükseklikleri ve derinlikleri) belirler. w dalgaının açısal frekansını ifade eder.

2.2.5 Sinüs toplamı modeli

Sinüs toplam modelleri, bir dizi sinüs fonksiyonunun toplamı olarak temsil edilir. Bu model Fourier serisine benzer, ancak genellikle daha basit bir formdadır ve belirli sayıda terimle sınırlıdır. Bu model, hastalık verilerinin periyodik olmayan ancak dalgalanan karakterini modellemek için kullanılabilir. Sinüs toplam modeli, hastalığın zamana göre değişen yayılma oranını yakalayabilir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^5 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (10)$$

Modelin her bir bileşeni, farklı frekanslarda hastalığın yayılmasındaki dalgalanmaları ifade eder. Özellikle, hastalık vakalarının zaman içinde nasıl değişebileceğine dair daha ayrıntılı bir analiz sağlar.

a_i ($i=1,2,\dots,5$) katsayıları dalgalanmaların genliklerini göstermektedir. b_i ($i=1,2,\dots,5$) katsayıları dalgalanmaların frekanslarını belirler. Bu, hastalığın yayılma hızındaki periyodik değişikliklerin ne sıklıkla meydana geldiğini gösterir. c_i ($i=1,2,\dots,5$) sabitleri dalgalanmaların zaman eksenindeki konumunu, yani her bir dalgalanmanın başlangıç noktasını belirler.

2.2.6 SIR modeli

SIR salgın modeli matematiksel olarak doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemler kümesi aşağıdaki formüller ile temsil edilebilir

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -\frac{\alpha}{P} S(t)I(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \frac{\alpha}{P} S(t)I(t) - \mu I(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \mu I(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Burada $S(0) = S_0, I(0) = I_0, R(0) = R_0$ başlangıç koşulları ve $P = S(t) + I(t) + R(t)$ dir.

[2]'de bildirilen ilk tarih 4 Nisan 2020 olduğundan, S_0, I_0 ve R_0 'nin başlangıç değerleri olarak 4 Nisan 2020'de Türkiye'deki şüpheli kişi sayısı ile enfekte ve iyileşen/vefat eden kişi sayısı alınmıştır. Popülasyon büyüklüğünün 84.000.000, enfekte kişi sayısının 3013 ve iyileşen/vefat eden kişi sayısının 378 (günde 76 ölüm ve günde 302 iyileşme) olduğu varsayıldığında, duyarlı birey sayısı 83.996.609'dur. Bireylerin COVID-19'a maruz kaldığından şüpheleniliyorsa önerilen karantina süresi 14 gün olduğundan dolayı bulaşma oranı $\alpha=1/14 \approx 0,0714$ olarak alınmaktadır. 4 Nisan 2020'de enfekte olan toplam kişi sayısı 23934 ve iyileşen/vefat eden toplam kişi sayısı 1287 (toplam 501 ölüm ve toplam 786 iyileşen hasta) olduğundan, iyileşme oranı $\mu=1287/23934 \approx 0.0538$ 'dir [7].

3. Bulgular

3.1. Duyarlı birey sayısı (S) ve zaman modeli

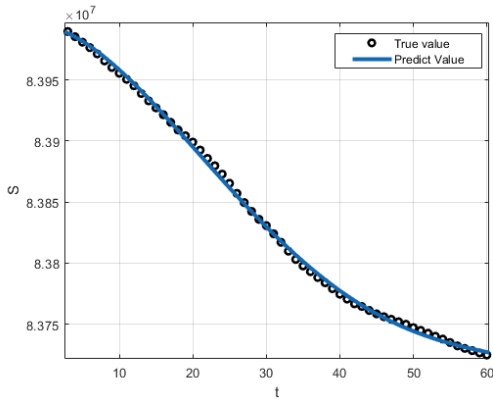
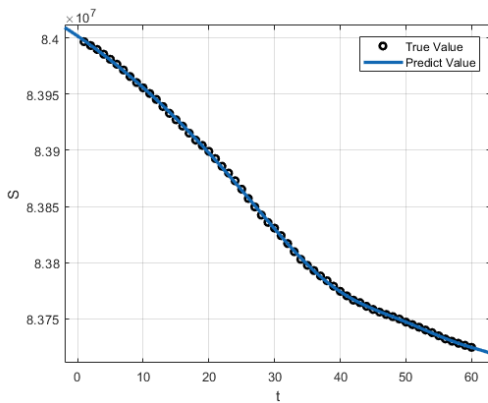
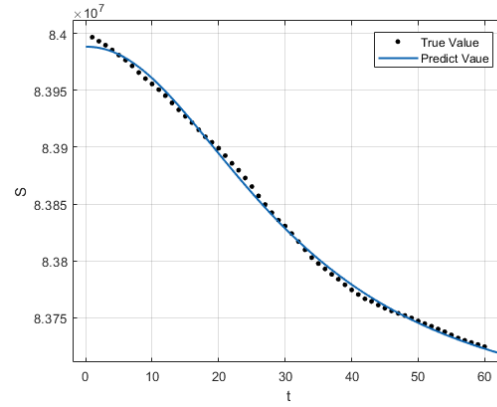
Hastalık şüphesi taşıyan sağlıklı bireylerin sayısını tahmin etmek için farklı regresyon modelleri geliştirilmiş ve bu modellerin performansları karşılaştırılmıştır. Polinom, Gauss ve sigmoidal lojistik regresyon modelleri seçilen zaman dilimi için Türkiye örneğinde geliştirilmiş ve her modelin R^2 , RMSE, MAE ve MAPE gibi hata ölçütleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Polinom regresyon modeli 0.99926'lık yüksek R^2 değeri ve 2519.7'lik kök ortalama kare hatası (RMSE) ile karakterize edilirken, gauss regresyon modeli 0.99993'lük en yüksek R-kare değeri ve 813.97'lik en düşük RMSE değeri ile daha iyi performans göstermektedir. Sigmoidal lojistik regresyon modeli 0.99842 R^2 ve 3658.6 RMSE değerine sahiptir.

Öte yandan, polinom ve sigmoidal lojistik regresyon modelleri de yeterli bir performans sergilemiş, ancak Gauss regresyon modeli daha yüksek tahmin doğruluğu ve daha düşük hata değerleri ile öne çıkmıştır. Bu sonuçlar, pandemi sürecinde kullanılan matematiksel modellerin seçiminde Gauss regresyonunun tercih edilebileceğini ve daha etkili tahminler sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 2. S-t regresyonu hata ve yaklaşım değerleri

Regresyon Modeli	R ²	MAE	MAPE	RMSE
polinom (derece=4)	0.99926	2057.33	0.0025	2412.4
gaussian (terim sayısı=3)	0.99993	597.84	0.00071	750.44
4 parametrelili lojistik (sigmoidal)	0.99842	3051.4	0.0036	3534.6

Uzman görüşleri, pandemi sürecinde S parametresindeki azalmanın devam edeceğinin altını çizmektedir. Bu doğrultuda, seçilen zaman aralığında S parametresindeki azalma oranına bağlı olarak Gauss regresyon fonksiyonu en uygun model olarak bulunmuştur. Farklı regresyon modellerinin etkin bir şekilde kullanılabileceği ve uzman görüşlerinin bu süreçte hayati bir rol oynadığı da belirlenmiştir. SIR modelinin Chebysev polinomundan yararlanılarak elde edilen yaklaşık değerlerin gerçek değerleri sağlamadığı da gözlemlenmiştir [7].

**Şekil 1.** S-t Polinom regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri**Şekil 2.** S-t Gauss regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri**Şekil 3.** S-t Sigmoidal regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri

3.2. Enfekte birey sayısı (I) ve zaman modeli

Türkiye'deki vaka çalışması, hastalık tahmininde farklı zaman serisi regresyon modellerinin performansını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Belirli bir zaman aralığında hastalığa yakalanan bireylerin sayısını tahmin etmek için Fourier, Gauss ve Sinüs regresyon modelleri kullanılmış ve her bir modelin performansı hata oranları ve yaklaşım değerleri açısından değerlendirilmiştir.

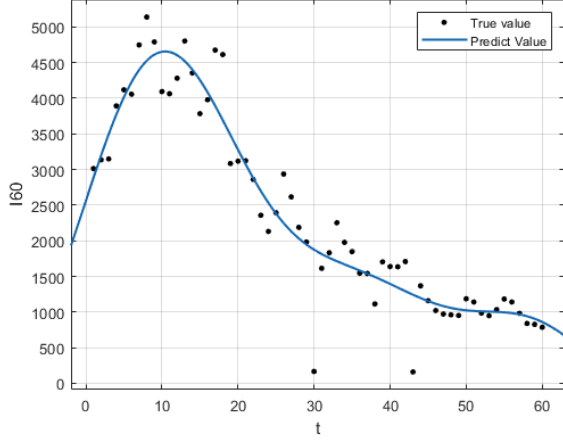
Çalışmada kullanılan Fourier regresyon modeli, zaman serisi verilerindeki periyodik değişiklikleri yakalamak için yeterli bir yöntemdir. Hastalık yayılımının tepe noktalarını ve dağılımını modellemek için Gauss regresyon modeli kullanılırken, daha karmaşık periyodik yapıları modellemek için Sinüs regresyon modeli tercih edilmiştir. Modeller arasındaki performans farklarını göstermek için her bir modelin hata ve yaklaşım değerleri Tablo 3.'de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu değerlendirmeler sayesinde hastalık yayılma senaryoları için en uygun modelleme tekniklerinin belirlenmesi ve tahminlerin doğruluğunun artırılması amaçlanmaktadır. Böyle bir analiz, sağlık sektöründe daha bilinçli planlama ve kaynak tahsisi için oldukça önemlidir.

Tablo 3. I-t regresyonu hata ve yaklaşım değerleri

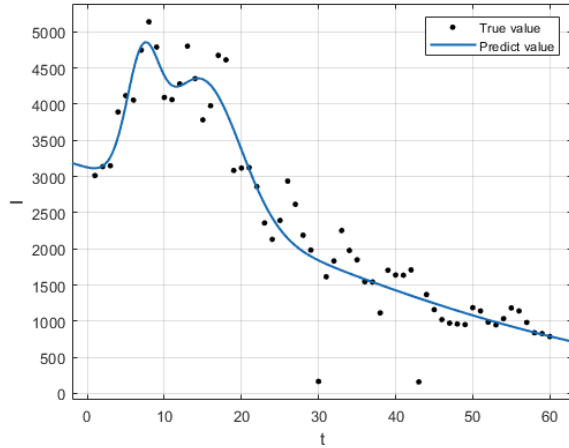
Regresyon Modeli	R ²	MAE	MAPE	RMSE
fourier (terim sayısı=3)	0.9134	270.4982	13.1367	403.0680
gaussian (terim sayısı=3)	0.9200	259.0115	13.1867	387.3738
sinus (terim sayısı=5)	0.9392	262.1306	17.8995	337.8367

Uzman görüşleri, pandemi sürecinde "I" parametresinde artan/azalan/kararlı durumlar arasında bir geçiş olabileceğini vurgulamaktadır. Bu kapsamda seçilen zaman aralığında "I" parametresinin azalma hızına bağlı olarak Sinüs regresyon

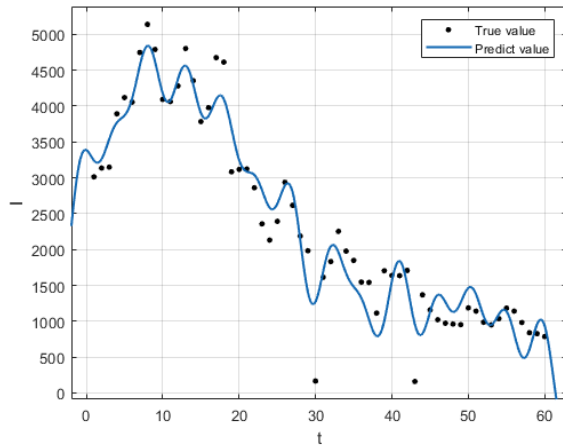
fonksiyonunun toplamının en uygun model olduğu tespit edilmiştir. Farklı regresyon modellerinin etkin bir şekilde kullanılabileceği ve uzman görüşlerinin bu süreçte kritik rol oynadığı da görülmüştür. SIR modelinin Chebyshev polinomu kullanılarak elde edilen yaklaşık değerlerin gerçek değerleri sağlamadığı da gözlemlenmiştir [7].



Şekil 4. I-t Fourier regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri



Şekil 5. I-t Gaussian regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri



Şekil 6. I-t Sinüs regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri

Pandemi süreci, özellikle sağlık verilerinin anlamlandırılmasında birçok bilimsel ve istatistiksel analiz yönteminin test edildiği ve karmaşık modellerin ön plana çıktığı bir dönemdir. Bu dönemde "I" ve "S" parametreleri gibi kritik değişkenlerin dinamiklerini anlamak, pandeminin yayılımını ve etkilerini tahmin etmek için hayati önem taşımaktadır. Uzmanlar, pandemi süresince "I" parametresinin zaman içinde artma, azalma ya da sabit kalma gibi farklı durumlar arasında geçiş yapabildiğini ve bu geçişlerin pandeminin seyrini anlamada önemli bilgiler verdiğinin altını çizmektedir. Bu kapsamda, "S" parametresinin belirli bir zaman aralığındaki azalma oranının, Sinüs regresyon fonksiyonu kullanılarak modellenmesinin en uygun yaklaşım olduğu tespit edilmiştir. Bu fonksiyon, "S" parametresinin azalma hızındaki değişimleri dikkate alarak pandemi sürecindeki eğilimleri yakalayabilen esnek bir modelleme kapasitesine sahiptir.

Öte yandan, farklı regresyon modellerinin pandemi verileri üzerinde etkin bir şekilde kullanılması, bu süreçte veri analizi stratejilerinin çeşitliliğini göstermektedir. Doğrusal regresyon, lojistik regresyon ve makine öğrenmesi tabanlı regresyon modelleri gibi çeşitli yaklaşımlar pandemi dinamiklerinin karmaşıklığını ve değişkenliğini anlamak için önemli araçlar olarak ortaya çıkmıştır. Bu modeller özellikle "I" ve "S" parametreleri gibi kritik değişkenlerin zaman içindeki davranışlarını analiz etme ve tahmin etme açısından değerlendirmektedir. Uzman görüşü, model seçimi ve uygulamasında kritik bir rol oynar ve pandemi sürecinde bilimsel analizlerin değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Bu durum, pandemi gibi küresel sağlık krizlerinin yönetiminde multidisipliner yaklaşımların ve bilimsel işbirliğinin önemini bir kez daha göstermektedir.

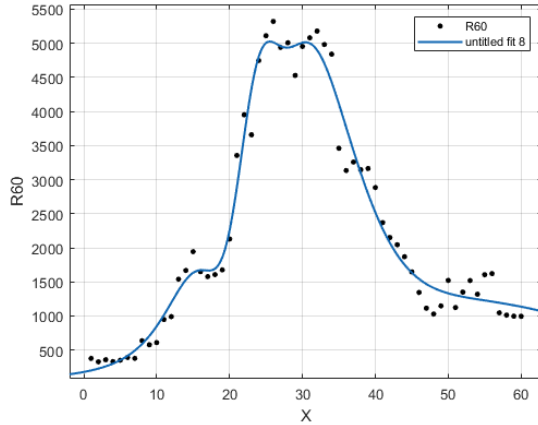
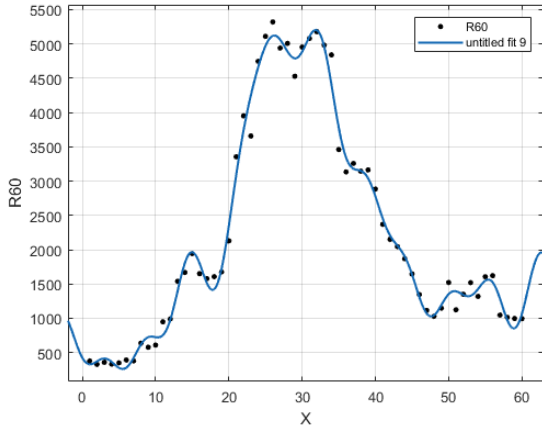
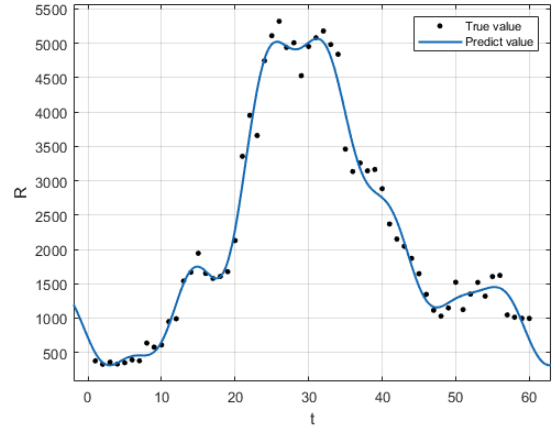
3.3. İyileşen/Vefat birey sayısı (R) ve zaman modeli

Türkiye'de pandemi boyunca hastalıktan kurtulan veya iyileşen bireylerin sayısını tahmin etmek için regresyon modellerinin iyileştirilmesi ve bu modellerin performansını karşılaştıran veriler Tablo 4.'de verilmiştir. Fourier, Gaussian ve Sinüs regresyon modelleri kullanılarak yapılan analizler, bu modellerin hastalığın yayılmasını ve etkisini modellemedeki etkinliğini değerlendirmektedir. Fourier modeli $0.9825 R^2$ ve $243.2374 RMSE$ ile yüksek bir uyum gösterirken, bunu 0.9739 'luk biraz daha düşük R^2 ve $303.9395 RMSE$ ile Gauss modeli takip etmektedir. Sinüs modeli bu özel durumda en iyi performansı göstermiş, $0.9898 R^2$ değeri ve $197.4230 RMSE$ değeri ile analiz edilen modeller arasında en yüksek uyum ve en düşük hata oranını sergilemiştir. Bu sonuçlar, farklı regresyon modellerinin pandemi verileri üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 4. R-t regresyonu hata ve yaklaşım değerleri

Regresyon Modeli	R ²	MAE	MAPE	RMSE
fourier (terim sayısı=7)	0.9825	156.8949	9.4161	208.2961
gaussian (terim sayısı=6)	0.9739	198.2659	13.0551	254.2940
sin toplamı (terim sayısı=7)	0.9898	116.7696	7.7674	159.1675

Tablo 4.'de sunulan hata ve yaklaşım değerleri, modellerin hastalık verileri üzerindeki tahmin yeteneklerini somut bir şekilde göstermektedir. Bu karşılaştırmalı analiz, pandemi sırasında hastalığın yayılma dinamiklerini ve nüfus üzerindeki etkisini anlamada matematiksel ve istatistiksel modellerin önemini göstermektedir. Özellikle Sinüs modeli en düşük RMSE ve en yüksek R² değerine ulaşarak zaman serisi verilerindeki periyodik dalgalanmaları yakalamadaki üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bu modeller pandemi müdahale stratejilerinin planlanması ve uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca SIR modelinin Chebysev polinomu kullanılarak elde edilen yaklaşık değerlerin gerçek değerleri sağlamadığı görülmüştür [7].

**Şekil 7.** R-t Fourier regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri**Şekil 8.** R-t Gaussian regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri**Şekil 9.** R-t Sinus regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri

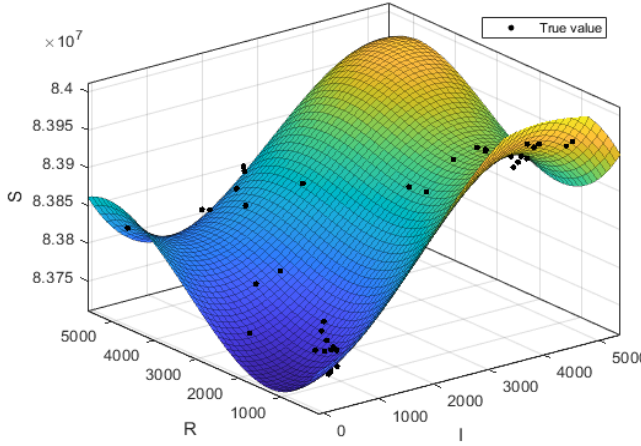
3.4. Duyarlı birey sayısı – enfekte birey sayısı – iyileşen/vefat birey sayısı ve zaman modeli

Bu analizde, Türkiye'de pandemi süresince hastalığa duyarlı sağlıklı bireyler (S), hastalığa yakalanan bireyler (I) ve iyileşen/vefat bireyler (R) gibi temel grupların sayısını tahmin etmek için polinom regresyon modeli kullanılmıştır. Polinom regresyon modeli, pandemi sırasındaki veri setlerinin karmaşıklığı ve bu verilerde gözlemlenen doğrusal olmayan ilişkiler nedeniyle seçilmiştir. Modelin R² değeri 0,9648 olarak hesaplanmış ve RMSE değeri 16667.2364 olarak belirlenmiştir. Bu değerler modelin veri setine ne kadar iyi uyduğunu ve tahminlerinin gerçek verilere ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, polinom regresyon modelinin Türkiye örneğinde pandemi sürecindeki S-I-R gruplarının sayısını tahmin etmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Tablo 5. S-I-R regresyonu hata ve yaklaşım değerleri

Regresyon Modeli	R ²	MAE	MAPE	RMSE
polinom (derece x=3 ve y=3)	0.9648	13835.1047	0.0165	16667.2364

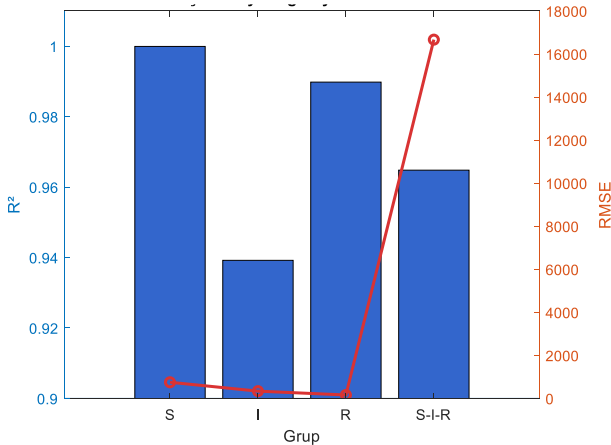
Tablo 5.'de ayrıntılı olarak verilen hata ve yaklaşım değerleri, polinom regresyon modelinin performansının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Polinom regresyon, özellikle pandemi verileri gibi karmaşık ve zamanla değişen veri setlerinde doğrusal olmayan ilişkileri yakalama kapasitesi nedeniyle seçilmiştir. Modelin yüksek R² değeri, veri setinin büyük bir bölümünü başarıyla açıklayabildiğini ve genel eğilimleri yakalayabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, RMSE değerinin büyüklüğü, modelin bazı tahminlerde önemli hatalar yapabileceğine işaret edebilir ki bu, özellikle büyük nüfuslu ülkelerde pandemi yönetimi için dikkate alınması gereken bir faktördür. Bu tür modellerin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi, pandemi müdahale stratejilerinin planlanması ve uygulanması için değerli bilgiler sağlar, böylece daha etkili sağlık politikaları ve müdahaleleri geliştirilebilir.



Şekil 10. S-I-R regresyonu için gerçek ve tahmin değerleri

3.5. Regresyon modellerinin S-I-R gruplarına göre genel karşılaştırması

Regresyon modellerinin S-I-R parametrelerine göre karşılaştırmalı analizi, her parametre için farklı modellerin öne çıktığını göstermektedir. Duyarlı birey sayısı (S) için Gauss regresyon modeli, en yüksek R^2 (0.99993) ve en düşük RMSE (750.44) ile en başarılı model olmuştur. Enfekte birey sayısı (I) için sinüs toplam regresyon modeli, en yüksek R^2 (0.9392) ve en düşük RMSE (337.8367) değerleriyle en iyi tahmini sağlamıştır. İyileşen/vefat eden birey sayısı (R) tahmininde ise sinüs toplam regresyon modeli en yüksek başarıyı göstermiştir ($R^2 = 0.9898$, RMSE = 159.1675). Genel S-I-R tahmininde kullanılan polinom regresyon modeli, yüksek R^2 (0.9648) sunmasına rağmen alt gruplara göre daha yüksek hata değerlerine sahiptir. Bu sonuçlar, her bir S-I-R bileşeni için ayrı ve uygun model seçiminin tahmin doğruluğunu artırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 11. S-I-R grupları için en uygun regresyon modellerinin R^2 ve RMSE değerleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada SIR modeli ile farklı regresyon modelleri, aynı S-I-R zaman serisi verileri üzerinde karşılaştırılmıştır. SIR modeli diferansiyel denklemler aracılığıyla nüfus gruplarının değişim hızlarını

modelleyen sürekli yapı bir sistem iken; regresyon modelleri, doğrudan gözlemsel verilere dayalı zaman serisi tahminleri üretmektedir. Modellerin matematiksel temelleri farklı olsa da, her biri aynı tarihsel veri seti ve başlangıç koşullarıyla çalıştırılmış; böylece $S(t)$, $I(t)$ ve $R(t)$ değerlerine ilişkin tahminler, ortak hata ölçütleri (R^2 , RMSE vb.) ile nesnel biçimde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, modellerin teorik yapılarından ziyade, tahmin doğruluklarını esas alarak uygulama düzeyinde karşılaştırılabilirliğini sağlamaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, pandemi süreci boyunca farklı regresyon modellerinin kullanılmasının S-I-R verilerinin tahmini için etkili yöntemler olduğunu göstermektedir. Özellikle Gauss regresyon modeli, "S" parametresinin tahmininde en yüksek doğruluk ve en düşük hata değerleri ile öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, pandemi yönetimi ve stratejileri için matematiksel modellerin seçiminde Gauss regresyonunun tercih edilebileceğini ve daha güvenilir tahminler üretebileceğini göstermektedir. Buna ek olarak, Sinüs regresyon modelinin "I" parametresinin tahmini için en uygun seçenek olduğu görülmüştür. Bu model, pandemi sırasında hastalığa yakalanan bireylerin sayısını daha iyi yakalayarak doğru bir tahmin kabiliyeti sağlamaktadır. Bu sonuçlar, pandeminin seyrini ve etkilerini anlamak için farklı regresyon modelleri kullanmanın daha doğru tahminler ürettiğini göstermiştir. Son olarak, polinom regresyon modeli, pandemi sırasında S-I-R verilerinin tahmin edilmesinde etkili bir seçenek olarak görünmektedir. Bu model, pandemi müdahale stratejilerinin planlanması ve yürütülmesinde önemli bir rol oynayabilir. Bununla birlikte, büyük nüfuslu ülkelerde tahminlerde bazı hatalar olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışma, pandemi müdahale stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanmasında veri odaklı yaklaşımların önemini arz etmektedir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] P. Bhattacharya, S. Paul, P. Biswas, Mathematical Modeling of Treatment SIR Model with Respect to Variable Contact Rate, International Proceedings of Economics Development and Research, 83(2015), 34-41.
- [2] "Genel Koronavirüs Tablosu", T.C. Sağlık Bakanlığı COVID 19 Bilgi Platformu, [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.saglik.gov.tr/TR-66935/genel-koronavirus-tablosu.html>.

- [3] W.O. Kermack ve A.G. McKendrick, A contribution to the mathematical theory of epidemics, Proceedings of the Royal Society of London A, 115(1927), s. 700-721.
- [4] B.M. Ndiaye, L. Tendeng ve D. Seck, "Makine öğrenimi, deterministik ve stokastik SIR modelleri ile COVID-19 pandemisi ile teyit edilmiş vakaların karşılaştırmalı tahmini," ArXiv:2004, Kantitatif Biyoloji: Populations ans Evolution, 2004(2020), s.13489.
- [5] C.N. Ngonghala, E. Iboi, S. Eikenberry, M. Scotch, C.R. MacIntyre, H.M. Bonds ve A.B. Gumel, İlaç dışı müdahalelerin 2019 yeni Koronavirüsünü azaltma üzerindeki etkisinin Matematiksel Değerlendirmesi, Matematiksel Biyobilimler, 325(2020), 108364.
- [6] S. Nusinovici ve diğerleri, Logistic regression was as good as machine learning for predicting major chronic diseases, J. Clin. Epidemiol., 122(2020), 56-69.
- [7] D. Özdek, COVID 19'un SIR Modeli için Chebyshev Polinom Çözümü, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(4)(2023), 39-47.
- [8] P. Rivas-Perea, J. Cota-Ruiz, D. G. Chaparro, J. A. P. Venzor, A. Q. Carreón, and J. G. Rosiles, Support Vector Machines for Regression: A Succinct Review of Large-Scale and Linear Programming Formulations, Int. J. Intell. Sci., 3(1)(2013), 5-14.
- [9] M. Shahhosseini, G. Hu, and H. Pham, Optimizing ensemble weights and hyperparameters of machine learning models for regression problems, Mach. Learn. with Appl., 7(2022), 100251.
- [10] A. Secer, N. Ozdemir ve M.A. Bayram, Salgın hastalıkların SIR modelinin çözümü için Hermite polinom yaklaşımı, Matematik, 6(12)(2018), s. 305.
- [11] V. Strijov ve G. W. Weber, Hyperparameter optimization kullanarak doğrusal olmayan regresyon modeli oluşturma, Comput. Math. with Appl., 60(4)(2010), 981-988.
- [12] O. Torrealba-Rodríguez, R. A. Conde-Gutiérrez, A. L. Hernández-Javier, Matematiksel ve hesaplamalı modeller uygulayarak Meksika'da COVID-19'un modellenmesi ve tahmini. Kaos, Solitonlar ve Fraktallar, 138(2020), 109946.
- [13] R. Uddin ve E.A. Algehyne, Konveks İnsidans Oranlı SIR Modeli Kullanılarak COVID-19'un Matematiksel Analizi, Fizikte Sonuçlar, 23(2021), 103970.
- [14] W. Zhu, S. Shen, Çin'deki COVID-19 Salgın Dinamiklerini Tanımlayan Geliştirilmiş Bir SIR Modeli. Fizikte Sonuçlar, 25(2021), 104289.
- [15] P. Wang, X. Zheng, J. Li ve B. Zhu, COVID-19'daki salgın eğilimlerinin lojistik model ve makine öğrenimi teknikleri ile tahmini, Chaos, Solitons & Fractals, 139(2020), s. 110058.
- [16] H. Xue, Y. Bai, H. Hu, H. Liang, Çoklu Regresyon Modeli ve Yapay Sinir Ağına Dayalı İnfluenza Aktivite Gözetimi, IEEE Access, 6(2017), 563-575.

Effect of Different Types of FRP Placed Between Layers on Flexural Properties of Laminated Timber

Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER*¹, Şemsettin KILINÇARSLAN², Simla ÜNAL³

^{1,2,3} Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Nature, Department of Civil Engineering, 32000, Isparta, Turkey

(Alınış / Received: 11.04.2025, Kabul / Accepted: 21.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Wood,
FRP,
Reinforcement,
Between layers,
Composite

Abstract: Wood is widely used in the construction sector as a natural, renewable, and sustainable material. It stands out with its features such as requiring little processing, low waste production and being environmentally friendly. Its use, especially for structural purposes, is increasing with developing technology. Laminated laminated timber is an industrial product consisting of wood layers combined parallel to the grain direction. Wooden structures need repair and reinforcement over time. Traditional methods include applications such as steel or aluminum plates and wood patches, but these methods are both costly and ineffective in all cases. At this point, fiber-reinforced polymer (FRP) composites offer an alternative solution. FRPs have the advantages of high strength and stiffness-to-weight ratios, low maintenance costs, and easy installation. Studies on strengthening wooden structures with FRP have generally focused on the bending strength of beams. In this project, laminated timber beams produced from spruce wood were strengthened with carbon, glass, and aramid fiber reinforcements, and their bending behaviors were examined. The results show that carbon fiber-reinforced polymers provide the highest performance. Glass and aramid fibers show certain improvements but have not been found to be as effective as carbon fiber-reinforced polymers in improving flexural properties. This suggests that the reinforcement material to be used in structural elements should be carefully selected according to the targeted performance characteristics.

Tabakalar Arasına Yerleştirilen Farklı FRP Türlerinin Lamine Kerestelerin Eğilme Özellikleri Üzerine Etkisi

Anahtar Kelimeler

Ahşap,
FRP,
Güçlendirme,
Tabakalar arası,
Kompozit

Öz: Ahşap, doğal, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir malzeme olarak yapı sektöründe yaygın biçimde kullanılmaktadır. Az işlem gerektirmesi, düşük atık üretimi ve çevre dostu oluşu gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte özellikle yapısal amaçlı kullanımı artmaktadır. Tabakalı lamine kereste, lif yönüne paralel olarak birleştirilmiş ahşap katmanlardan oluşan endüstriyel bir üründür. Ahşap yapılar zamanla onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel yöntemler çelik veya alüminyum plakalar, ahşap yamalar gibi uygulamalar içermektedir ancak bu yöntemler hem maliyetli hem de her durumda etkili değildir. Bu noktada fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler alternatif bir çözüm sunmaktadır. FRP'ler yüksek mukavemet ve sertlik-ağırlık oranları, düşük bakım maliyeti ve kolay kurulum avantajlarına sahiptir. Ahşap yapıların FRP ile güçlendirilmesine yönelik çalışmalar genellikle kirişlerin eğilme dayanımı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu projede, ladin odunundan üretilmiş tabakalı lamine kereste kirişler, karbon, cam ve aramid fiber takviyeleri ile güçlendirilmiş ve eğilme davranışları incelenmiştir. Sonuçlar, karbon fiber takviyeli polimerlerin en yüksek performansı sağladığını göstermektedir. Cam ve aramid fiberler belirli iyileştirmeler göstermektedir ancak eğilme özelliklerinin geliştirilmesinde karbon fiber takviyeli polimerler kadar etkili olmadığı belirlenmiştir. Bu da, yapı elemanlarında kullanılacak takviye malzemesinin, hedeflenen performans özelliklerine göre dikkatle seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

1.Introduction

Wood is a natural and renewable resource that is one of the oldest construction and production materials in human history and still maintains its importance today [1-3]. Thanks to its natural fiber structure, aesthetic appearance, workability, and environmental friendliness, it offers a wide range of uses from the construction sector to furniture production, packaging to interior decoration. In addition, its low carbon footprint and the fact that it requires less energy in production processes make wood preferred in terms of sustainability [4-9]. However, natural wood materials have some limiting features such as sensitivity to environmental factors, dimensional instability, differences in mechanical strength, and deformation that may occur over time. This situation has created a need for more controlled and performance-enhanced wood materials in engineering applications. Developed in line with this need, laminated timbers (laminated timbers) are engineering products with homogeneous properties, formed by combining wooden lamellae arranged in different directions using adhesives [10,11]. Laminated timbers minimize the disadvantages of natural wood, while increasing its mechanical properties, making it possible to obtain more durable and form-preserving structural elements. At the same time, it offers structural solutions that provide strength without compromising aesthetics in architectural designs where large openings must be crossed. Laminated timbers exhibit superior properties, especially in terms of bending resistance, shaping ability, and crack resistance, and are therefore widely used in many different engineering applications such as bridges, roof beams, and sports hall frames. However, in recent years, the tendency to create hybrid structures with different materials has increased to further increase the existing performance [12-19].

The most important of these hybrid structures is the combination of fiber-reinforced polymers with wood materials. Fiber-reinforced polymers are composite materials reinforced with different types of fibers (glass, carbon, aramid, etc.) that provide high mechanical strength and rigidity despite their low density [20, 21]. These materials generally contain thermoset resins such as epoxy, polyester, or vinyl ester as the matrix phase, and the bond between this matrix and the fiber determines the overall strength of the structure [22]. Due to their properties such as high chemical resistance, long-term performance under fatigue, and corrosion resistance, FRPs are widely used in many high-tech fields such as aviation, automotive, defense industry, marine, and sports equipment. These qualities have brought the use of FRPs to the fore in the construction sector in recent years, especially in structural reinforcement and strength-increasing works [23-25].

Reinforcement of wooden structural elements with fiber-reinforced polymers is one of the most striking innovations in this field. Due to its natural structure, wood is affected by various environmental conditions (humidity, temperature changes, biological deterioration, etc.), and its mechanical properties may decrease over time [26,27]. Traditional wooden elements require various interventions to maintain structural integrity, especially in loading conditions such as bending, tension, and compression. The use of FRPs with wood is not only limited to increased strength; it also allows for the construction of lighter, more flexible, and longer-lasting structures. Their lower weight compared to traditional steel or concrete reinforced systems creates advantages in terms of ease of transportation and assembly; they stand out as an important alternative especially in restoration of historical structures or wooden architectural applications where aesthetics is at the forefront [28, 29]. In addition, the integration of composite reinforcements into the structure can contribute to the improvement of seismic performance by increasing the energy absorption capacity of the structure. Various studies on the reinforcement of wood laminated timber (glulam) with fiber reinforced polymers (FRP) show that this method significantly increases structural performance [30-33].

The reinforcement of glulam beams using fiber-reinforced polymers has been extensively explored in recent decades. One of the early implementations of FRP in timber structures involved the restoration of damaged hardwood utility poles in the mid-1990s using e-glass/epoxy laminates. Similarly, FRP composites were employed to strengthen timber piles, as demonstrated by Lopes Anido et al. (2003) [34]. Their study created hybrid glued-laminated timber elements by embedding thin layers of E-glass/epoxy composite between wooden laminations. Micelli et al. (2005) [35] investigated how the inclusion of CFRP rods could enhance the performance of glulam beams. Their findings revealed that the beams' ultimate load capacity and stiffness improved by 26–82% and 8–19%, respectively. Complementing this, De et al. (2005) [36] conducted pull-out tests on CFRP rods bonded to glulam using epoxy resin to evaluate the effectiveness of the bond. Their research considered various factors such as rod surface texture, bonded length, and wood grain orientation, which later informed the development of a localized bond-slip model. In another contribution, Johnsson et al. (2006) [37] performed four-point bending tests on ten glulam specimens, each reinforced with rectangular pultruded CFRP bars. Their results, benchmarked against analytical models, indicated a significant enhancement in short-term flexural load capacity ranging between 49% and 63%. Further advancements in timber reinforcement include Gentry's (2011) [38] proposal to use transversely

placed FRP pins across glulam layers to improve shear resistance. Test outcomes showed that glulam specimens reinforced in this way exhibited more consistent mechanical behavior compared to their unreinforced counterparts. Additionally, Gilfillan et al. (2003) [39] examined Sitka spruce beams reinforced with both steel and composite materials under short- and long-term mechanical loading. Their experiments demonstrated that the incorporation of FRP materials notably increased the structural strength of the beams. Ghoroubi et al. (2022) [40] developed a generalized material model for wood-to-wood joints by experimentally analyzing the load-displacement behavior of connections with varying lengths, using both adhesives and mechanical anchors. The model enhances the accuracy of structural analyses involving such joints when implemented in finite element software. Karagoz Isleyen et al. (2023) [41] investigated the impact response of glued timber beams reinforced with CFRP strips. Through dynamic testing and numerical modeling with ABAQUS, the study demonstrated that FRP reinforcement significantly improves the structural performance of wooden beams under rapid loading conditions.

As a result, the use of fiber-reinforced polymers together with wood structures enables the integration of modern engineering solutions into traditional wood construction systems; it is considered an important innovative approach both in new building designs and in the reinforcement of existing structures. In this context, the effect of composite structures to be obtained by strategically positioning fiber-reinforced polymers in laminated timbers, especially on bending performance, is of great importance. In this study, the effects of different types of FRPs placed between laminated timbers on the bending properties of laminated timbers were experimentally investigated.

2. Material and Methods

2.1. Material

The spruce wood (*Picea abies*) used in the preparation of composite beams was supplied by Yuceer Kereste located in Isparta Province. In the selection of the timber, care was taken to ensure that it was not subject to physical and microorganism damage. To be used in the production of composite beams, 20x100x1300 mm spruce timbers were obtained by sawing with a circular sawing machine. After the beams were stacked, they were kept in the air conditioning room with 20±2°C temperature and 65±5% relative humidity conditions until they reached 12% humidity. The characteristics of the spruce wood species used in the study are given in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of spruce timber according to DIN 1052:2008 [42] (values in MPa)

Properties	Value
------------	-------

Bending	11
Tensile (Parallel)	8.5
Tensile (Vertical)	0.2
Compression (Parallel)	8.5
Compression (Vertical)	2.5 - 3
Modulus of Elasticity (Parallel)	11,000
Modulus of Elasticity (Vertical)	350
Shear Modulus	550

The image of carbon, aramid, and glass FRP polymer fabrics used between the layers to improve the mechanical properties of glulam composite beams is given in Figure 1. FRP fabrics and chemical materials used for bonding were supplied by UNALTEKNIK® company [43].

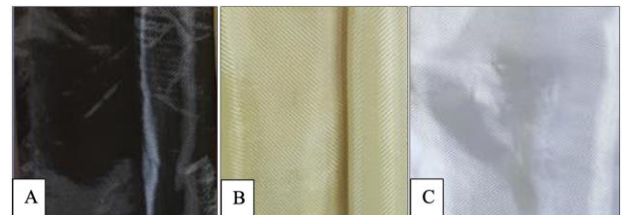


Figure 1. FRP fabrics, (A): Carbon, (B) Aramid, (C) Glass

In the control samples, Polyvinyl acetate (PVAc-D4) glue was used to bond the layers. The manufacturer's recommendations were followed in bonding the layers. Technical specifications for use of the glue are given in Table 2.

Table 2. Technical specifications for use of the glue

Technical Properties	Value
pH	2.5
Adhesion strength	27.6 N/mm ²
Viscosity (20°C)	14000±1000 MPa
Density	1.1±0.02 g/cm ³
Gluing time (at 21°C)	5-6 minutes

In the reinforcement stage with fiber-reinforced polymers, a primer and epoxy adhesive specially produced for FRP fabrics were used.

2.2. Method

2.2.1. Preparation of test samples

The test samples were prepared according to the standard "TS EN 408: 2010+A1: 2014-04 Construction Timber and Glued Laminated Timber - Determination of Some Physical and Mechanical Properties". PVAc-D4 adhesives were used during the production of composite beams from 20 mm thick air-dried solid timber. 3-layer composite beams were produced, with interlayers reinforced with carbon, aramid, and glass fabrics and without interlayer (control). While producing control samples, glue solution was applied

to both surfaces of the layers with a brush at a rate of 180-200 gr/m². The application of FRP fabrics to the intermediate layers was carried out in several stages. First, the FRP fabrics to be used were cut with a pair of scissors, considering the dimensions of the surface to be applied. Before starting the FRP application, the wooden surface was cleaned with a brush, and dust and dirt were removed and made clean. Then, a primer coat was applied to the surface with a low-viscosity epoxy resin, filling the pores of the wood and increasing its adhesion ability. After the primer had set for approximately 2 hours, the epoxy adhesive was applied evenly to the area where the fabric would be placed. The epoxy solution was applied to the solid bonding surfaces with a roller and at a rate of 200 g/m². Then, the fiber fabric was carefully placed on the surface without creating wrinkles or air bubbles. The fabric was pressed with a roller to ensure that it completely adhered and settled on the surface. Finally, epoxy was applied to the fabric again to ensure that the fibers were completely saturated, and a transparent, shiny surface was obtained. Figure 2 shows the stages of FRP application to layered composite intermediate layers.



Figure 2. FRP application stages (A) Sizing the FRP fabrics, (B) Applying primer to the surface, (C) Pouring the epoxy adhesive into the mixing container, (D) Applying adhesive to the surface, (E) Placing the FRP fabric on the surface, (F) Applying the same application to the second intermediate layer

Temperature and humidity control are important in this process. The application should generally be carried out between 15-25°C. In the bonding process, after the surfaces are glued and waited for 5-6 minutes (open time), the press pressure; approximately 1.2 N/mm², the pressing time; 8 hours (closed time) was applied cold, by adjusting the hydraulic press machine with pressure indicator to apply 1.2 N/mm² pressure cold. The schematic view of the beams prepared within the scope of the study is given in Figure 3.

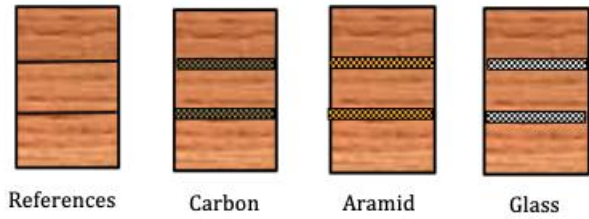


Figure 3. Schematic view of the cross-sections of the produced beams

Within the scope of the study, experiments were carried out on a total of 12 beams by producing 3 beam elements from each. The properties and codes of the produced beams are given in Table 2.

Table 2. Properties and codes of produced beams

Code	Layer Number	Glue type	Reinforcement	FRP Type
UR	3	PVAc-D4	-	-
C-R	3	PVAc-D4	+	Carbon
A-R	3	PVAc-D4	+	Aramid
G-R	3	PVAc-D4	+	Glass

2.2.2. Conducting experiments

In this study, the experiments of the beams subjected to bending tests were carried out in Süleyman Demirel University Natural and Industrial Research and Application Center. The beams were subjected to a static 4-point bending test with a loading rate of 8 mm/min by GB/T 26899-2011[44]. Bending loading persisted until either a sudden increase in loading, signifying failure, was detected by the loading instrument, or substantial damage was visually observed. To prevent the timber from crushing, supports and loading points, constructed from steel cylinders with a diameter of 20 mm, were utilized for beam testing. Both unreinforced and reinforced beams underwent testing following the same experimental procedure as the initial tests. This was done to ensure a fair comparison of the beam capacities. The image of the beams subjected to bending placed in the bending apparatus is shown in Figure 4 (A). The load-displacement results obtained because of the experiments are recorded on the computer given in Figure 4 (B). Maximum load-carrying capacity, bending strength, and elasticity modulus values were obtained from the obtained load-displacement graphs.

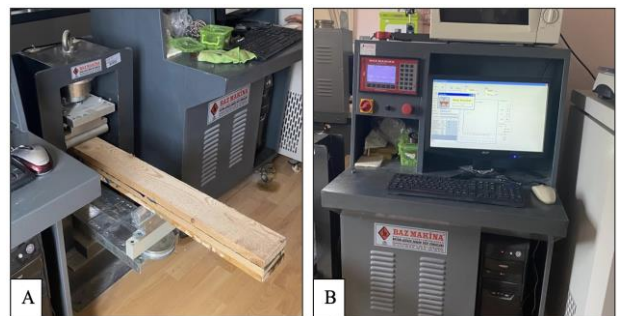


Figure 4. (A) Placing the sample in the device, (B) Computer screen where the results are read

Equation 1 and Equation 2 are used to determine the modulus of elasticity (MOE) and flexural strength (MOR) from the bending test results [45]:

$$MOE = \frac{\Delta P (l - s)(2l^2 + 2ls - s^2)}{8\Delta ybh^3}$$

$$MOR = \frac{3P_{max}(l - s)}{2bh^2}$$

Where Δy is the corresponding displacement of ΔP , b is the width of the specimen, h is the depth P_{max} is the maximum load, l is the span of the specimen between supports, and s is the span between the loads. ΔP is the difference between the upper and lower loads in the proportional limit.

3. Results and Discussion

In this study, a total of 12 samples were studied, 3 from each series in 4 different series. The load-displacement curves of each sample produced in the study are given in Figure 5. MOE and MOR values obtained because of subjecting composite beams to bending tests are given in Figure 6 and Figure 7.

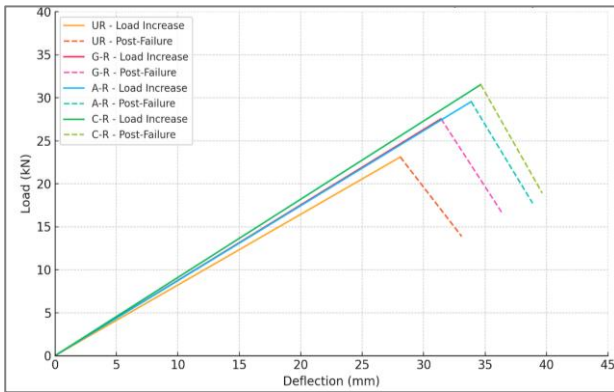


Figure 5. Load-displacement curves

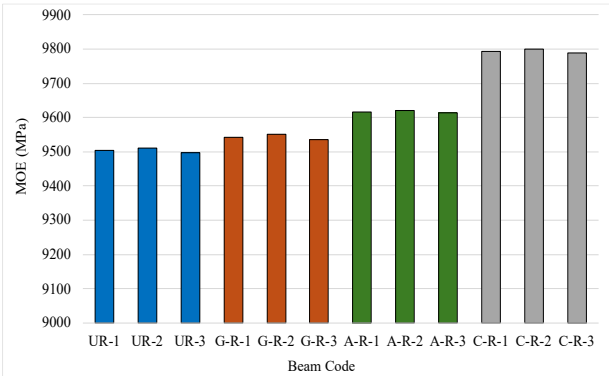


Figure 6. MOE values of composite beams

Figure 6 presents the comparative values of modulus of elasticity (MOE) of wood composite samples reinforced with different types of reinforcement and unreinforced. Samples were tested with three repetitions and the average MOE values for each group are shown in the form of a column chart. Unreinforced

samples (UR-1, UR-2, UR-3) have an average MOE value of approximately 9500 MPa. This value stands out as the lowest level compared to all other reinforced groups. This shows that fiber reinforcement makes a positive contribution to the modulus of elasticity. Glass fiber reinforced samples (G-R-1, G-R-2, G-R-3) show a slight increase compared to unreinforced samples, with the MOE value being approximately 9550 MPa. This increase reveals that the contribution of glass fiber has a limited but positive effect on elasticity. Aramid fiber-reinforced samples (A-R-1, A-R-2, A-R-3) reached an MOE value of approximately 9610 MPa. This value is higher compared to glass fiber-reinforced samples, indicating that aramid fiber increases the elastic modulus more significantly. The samples with the highest MOE value were observed in the carbon fiber reinforced group (C-R-1, C-R-2, C-R-3). The samples exhibited an MOE value of approximately 9800 MPa, indicating an increase of approximately 3% compared to the unreinforced samples. This result shows that carbon fiber is the most effective reinforcement material in increasing the elastic modulus.

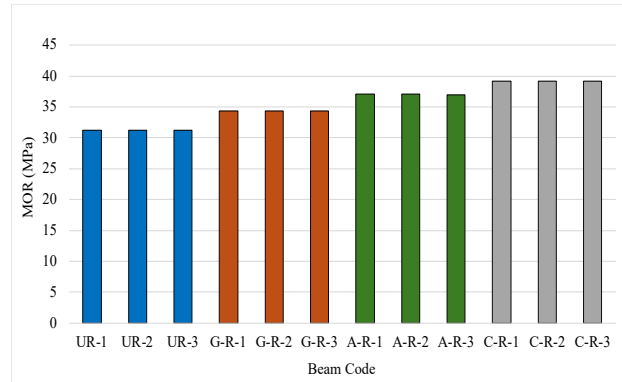


Figure 7. MOR values of composite beams

The flexural strength (MOR) values in the figure show significant differences between reinforced and unreinforced wood composite samples with different reinforcement materials. Unreinforced samples (UR series) have an average MOR value of approximately 31 MPa, which is the lowest among all samples. In glass fiber reinforced samples (G-R series), MOR values are approximately 34.5 MPa. This shows that glass fiber reinforcement is effective in increasing flexural strength, but the contribution is limited. There is an increase of approximately 11% compared to unreinforced samples. Aramid fiber reinforced samples (A-R series) exhibit a higher flexural strength compared to glass fiber samples, with an average MOR value of 37 MPa. An increase of approximately 19% compared to unreinforced samples shows that aramid fiber makes a more effective contribution to the composite structure. Carbon fiber reinforced samples (C-R series) show an average MOR value of 39 MPa, and the highest bending strength is obtained in this group. This situation reveals that carbon fiber is the most effective reinforcement material in increasing structural strength. An improvement of approximately

26% was achieved compared to unreinforced samples. Karaman (2021) [46] investigated the bending moment resistance of T-type, two-pin dowel joints. Joints made with dowels obtained from Scotch pine (*Pinus sylvestris*), hornbeam (*Fagus orientalis*), chestnut (*Castanea sativa*), and oak (*Quercus petraea*) were tested after being reinforced with basalt and fiberglass knitted fabrics. It was observed that single- and double-layer reinforcements made with fiber-reinforced fabrics increased the mechanical performance of furniture fasteners. The highest bending moment values were obtained in samples using oak dowels, and it was determined that oak dowels provided 13% higher bending moment resistance than hornbeam dowels, 32% higher than chestnut dowels, and 43% higher than Scotch pine dowels, respectively. Furthermore, among the reinforcement types, the highest bending moment resistance was found in samples reinforced with basalt knitted fabric, while the lowest resistance was found in unreinforced (control) samples. In general, according to the results of the bending tests, it was determined that the wood type was 3% effective, the dowel type was 43% effective, and the reinforcement fabric type was 72% effective. In another study, Karaman et al. (2021) [47] aimed to determine the four-point bending strength and modulus of elasticity in bending of laminated materials obtained from black pine wood reinforced with aramid fiber and individually bonded with epoxy or polyurethane adhesives. As a result of tests performed on samples prepared by TS 5497 EN 408 (2006) standard, it was determined that the highest static bending strength value (83.94 N/mm²) was obtained in samples prepared with aramid fiber reinforcement in interlayers and using epoxy glue. Similarly, the highest value in terms of modulus of elasticity in bending was also determined to be in samples with interlayer epoxy and aramid fiber reinforcement (10311.62 N/mm²). In addition, it was observed that samples prepared in the direction parallel to the gluing line exhibited higher mechanical performance compared to those in the perpendicular direction. It has been demonstrated that larch laminated wood materials reinforced with aramid fiber can be used as structural elements in the construction industry. In another study, Karaman (2024) [48] investigated the effects of sessile oak (*Quercus petraea*) laminated timber reinforced with basalt fabric (BFRPWF) and plaster mesh (PSM) on air-dry density and compressive strength parallel to the grain. Single-component polyurethane (PUR) adhesive was used as the adhesive, and the reinforcement materials were placed between the wood layers. Three different sample groups were tested in the study: unreinforced laminated oak timber (LOL), BFRPWF-reinforced laminated oak timber (LOL-BFRPWF), and PSM-reinforced laminated oak timber (LOL-PSM). The findings revealed that both air-dry density and compressive strength increased with reinforcement applications. In particular, it was determined that the

samples in the LOL-BFRPWF group exhibited higher mechanical performance than the samples in the PSM-reinforced and control groups. Karaman (2024) [48] study shows that laminated oak timber reinforced with BFRPWF and PSM offers a potential use in both the furniture industry and building materials. It is also seen that similar results were obtained by Yıldırım et al. (2018) [49], Karaman and Yıldırım (2021) [50] and Yıldırım et al. (2021) [51]. The average maximum load-carrying capacity, maximum displacement, MOE, and MOR values of each series are given in Table 3.

Table 3. Average Max. load, max. displacement, MOE and MOR values

Beams Code	Max Load (kN)	Max Deflection (mm)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
UR	23.10	28.10	9504	31.24
G-R	27.54	31.42	9543	34.39
A-R	29.54	33.87	9617	37.04
C-R	31.52	34.65	9794	39.21

In this study, the mechanical performances of unreinforced (UR) and beam specimens reinforced with different fiber reinforcements (glass fiber: G-R, aramid fiber: A-R, carbon fiber: C-R) were comparatively investigated. The obtained data revealed that all reinforced specimens showed significant improvements in terms of both carrying capacity and deformation ability compared to the unreinforced reference specimen. While the maximum load carrying capacity was 23.10 kN in the UR specimen, this value increased by 19%, 28% and 36% in the G-R, A-R and C-R specimens, respectively, reaching 27.54 kN, 29.54 kN and 31.52 kN. Similarly, an increase was also observed in the maximum deflection values; this reveals the effect of reinforcement applications on increasing the ductility of the beams. Limited but stable increases were recorded in all reinforced specimens in terms of modulus of elasticity (MOE); The highest value was obtained in the carbon fiber reinforced sample with 9794 MPa. When evaluated in terms of modulus of rupture (MOR), the most remarkable increase was observed in the C-R sample with a rate of 25%.

4. Conclusion

In this study, the mechanical performances of unreinforced (UR) and reinforced beams with different fiber reinforcements were evaluated comparatively. The results obtained are given below.

- Fiber reinforcement significantly improved the important mechanical properties of the beams such as modulus of elasticity (MOE), fracture strength (MOR), load-carrying capacity, and deflection. Reinforced samples exhibited a significant increase in performance in all tests compared to unreinforced reference samples.

- The obtained data in terms of modulus of elasticity show that fiber reinforcement contributes to the rigidity of the beams. In unreinforced samples, the average MOE value remained at the lowest level, while in fiber-reinforced groups, the MOE values of glass, aramid, and carbon fibers increased significantly, respectively. Glass fiber-reinforced samples showed a limited but positive increase compared to unreinforced samples, providing an improvement of approximately 1-2% in the modulus of elasticity. In aramid fiber samples, this increase became more pronounced, and an improvement of approximately 3% was observed. The samples with the highest modulus of elasticity were found in the carbon fiber reinforced group, which showed an increase of approximately 3-4% compared to the unreinforced samples. These findings reveal that carbon fiber is the most effective material in increasing the modulus of elasticity.
- The analyses made in terms of MOR show that fiber reinforcement significantly increases the bending strength. While the average MOR value was at the lowest level in unreinforced samples, glass fiber-reinforced samples provided a certain improvement by increasing this value by approximately 11%. Aramid fiber-reinforced samples reached a higher MOR value compared to glass fiber samples, showing an increase of approximately 19%. Carbon fiber-reinforced samples achieved the highest MOR value among all groups and provided an improvement of 26% compared to unreinforced samples. This result shows that carbon fiber is the most effective fiber type in increasing the bending strength.
- Glass and aramid fibers also can increase the bending strength, but carbon fiber makes a more significant contribution in this area.
- The effect of fiber reinforcement was also observed in the evaluations made in terms of carrying capacity. The carrying capacity of unreinforced samples increased by 19% compared to glass fiber-reinforced samples, 28% compared to aramid fiber-reinforced samples, and 36% compared to carbon fiber-reinforced samples. These findings show that fiber reinforcement plays an important role in increasing the carrying capacity and that carbon fiber is the material that increases this capacity the most.
- Increase in maximum deflection values was observed, which shows that fiber reinforcements contribute to increasing the ductility of the beams.

In conclusion, this study shows that fiber reinforcement provides significant benefits, especially in structural reinforcement applications. Carbon fiber stood out as the most effective reinforcement material by showing the highest performance in all tests. Although glass and aramid fibers provided certain improvements in terms of elastic modulus and

fracture strength, respectively, they were not as effective as the performance increase provided by carbon fiber. These findings emphasize that the selection of reinforcement material to be used in structural elements should be made carefully according to the targeted performance properties. The use of fiber reinforcements offers great advantages, especially in structural elements where bearing capacity and bending strength are important. In addition, it is concluded that fiber reinforcements are an effective method for improving the mechanical properties of composite structures and have significant potential in various application areas.

Acknowledgment

This project was supported within the scope of "2209-A University Students Research Projects Support Program". We would like to thank TÜBİTAK Scientist Support Programs Directorate.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Fengel, D., Wegener, G. 1984. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin and New York: De Gruyter Press.
- [2] Guo, J., Song, K., Salmén, L., Yin, Y. 2015. Change soft wood cellwalls in response to hygro-mechanical steam treatment. CarbohydrPolym, 115: 207–14.
- [3] Florian, M.L.E. 1990. Scope and history of archaeological wood. In: Rowell R M, Barbour R J, editors. Archaeol. Wood Prop. Chem. Preserv. Washington, D. C: American Chemical Society; 3–32
- [4] Lippke, B.R., Bowyer, J., MeilJ. 2004. CORRIM : life-cycle environmental perfor- mance, (June 2014).
- [5] Nepal, P., Skog, K.E., McKeever, D.B., Bergman, R.D. 2016. Abt KL, Abt RC. Carbon mitigation impacts of increased softwood lumber and structural panel use for nonresidential construction in the United States. Forest Prod J, 66(1–2):77–87.
- [6] Amiri, A., Ottelin, J., Sorvari, J., Junnila, S. 2020. Cities as carbon sinks: classification of wooden buildings. Environmental Research Letters.
- [7] Leskinen, P., Cardellini, G., González García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., et al. 2018. Substitution effects of wood-based products in

- climate change mitigation. From Science to Policy, 7(November), 28.
- [8] Gutowski, T. G., Sahni, S., Allwood, J. M., Ashby, M. F., Worrell, E. 2013. The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- [9] Van Ruijven, B. J., Van Vuuren, D. P., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D., Patel, M. K. 2016. Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 15–36.
- [10] Yang, T.-H., Wang, S.-Y., Tsai, M.-J., Lin, C.-Y. 2009. The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. *Building and Environment*, 44(2), 231–236.
- [11] Issa, C. A., Kmeid, Z. 2005. Advanced wood engineering: glulam beams. *Construction and Building Materials*, 19(2), 99–106.
- [12] Madhoushi, M., Ansell, M. P. 2004. Experimental study of static and fatigue strengths of pultruded GFRP rods bonded into LVL and glulam. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(4), 319–325.
- [13] Guan, Z. W., Rodd, P. D., Pope, D. J. 2005. Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP. *Computers and Structures*, 83(28-30), 2476–2487.
- [14] Zhang, J., Hu, X., Sun, Q., Zhang, Y., Zhu, W., Li, L. 2020. Experimental study on seismic performance of glulam-concrete composite beam-to-column joints. *Composite Structures*, 236, 111864.
- [15] Wang, M., Song, X., Gu, X., Zhang, Y., Luo, L. 2015. Rotational behavior of bolted beam-to-column connections with locally cross-laminated glulam. *Journal of Structural Engineering*, 141(4), 04014121.
- [16] Bulleit, W. M., Sandberg, L. B., Woods, G. J. 1989. Steel-reinforced glued laminated timber. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 115(2), 433–444.
- [17] Daniel, H., Habashneh, M., Rad, M. M. 2022. Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by CFRP plate. *Scientific Reports*, 12(1), 13587.
- [18] He, M. J., Wang, Y. X., Li, Z., Zhou, L. A., Tong, Y. C., Sun, X. F. 2022. An experimental and analytical study on the bending performance of CFRP-reinforced glulam beams. *Frontiers in Materials*, 8, 802249.
- [19] Isleyen, U. K., Ghoroubi, R., Mercimek, O., Anil, O., Erdem, R. T. 2021. Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(17-18), 665–685.
- [20] Biscaia, H. C., Chastre, C., Borba, I. S., Silva, C., Cruz, D. 2016. Experimental evaluation of bonding between CFRP laminates and different structural materials. *Journal of Composites for Construction*, 20(3).
- [21] Daniel, H., Habashneh, M., Rad, M. M. 2022. Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by CFRP plate. *Scientific Reports*, 12(1), 13587.
- [22] Dong, Z. Q., Wu, G., Zhao, X. L., Zhu, H., Shao, X. X. 2019. Behaviors of hybrid beams composed of seawater sea-sand concrete (SWSSC) and a prefabricated UHPC shell reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, 213, 32–42.
- [23] Gomez, S., Svecova, D. 2008. Behavior of split timber stringers reinforced with external GFRP sheets. *Journal of Composites for Construction*, 12(2), 202–211.
- [24] Hay, S., Thiessen, K., Svecova, D., Bakht, B. 2006. Effectiveness of GFRP sheets for shear strengthening of timber. *Journal of Composites for Construction*, 10(6), 483–491.
- [25] He, M. J., Wang, Y. X., Li, Z., Zhou, L. A., Tong, Y. C., Sun, X. F. 2022. An experimental and analytical study on the bending performance of CFRP-reinforced glulam beams. *Frontiers in Materials*, 8, 802249.
- [26] Kilincarslan, S., Şimşek Türker, Y. 2021. Experimental investigation of the rotational behaviour of glulam column-beam joints reinforced with fiber reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 262.
- [27] Kilincarslan, S., Şimşek Türker, Y. 2019. The Effect of Strengthening With Fiber Reinforced Polymers on Strength Properties of Wood Beams. 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, pp. 8-14.
- [28] Cheng, F., Hu, Y. 2011. Nondestructive test and prediction of MOE of FRP reinforced fast-growing poplar glulam. *Composites Science and Technology*, 71(8), 1163–1170.
- [29] Corradi, M., et al. 2021. Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 258, 113363.
- [30] Donadon, B. F., et al. 2020. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with vectran-FRP reinforcement. *Engineering Structures*, 202, 123–134.
- [31] Mizuta, Y., et al. 2019. Bending stiffness and strength of reinforcement arrangements for

- CFRP reinforced glulam (AFRW). Mokuzaï Gakkaishi, 65(3), 148–157.
- [32] Simsek Turker, Y., Kilincarslan, S., and Avcı, M. 2024. Enhancement of mechanical properties in FRP-reinforced glulam column-beam connections: a FEM approach. *GeoStruct Innovations*, 2(1), 10–20.
- [33] Tajik, N., et al. 2024. Explainable XGBoost machine learning model for prediction of ultimate load and free end slip of GFRP rod glued-in timber joints through a pull-out test under various harsh environmental conditions. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(1), 141–157.
- [34] Lopez-Anido, R., Michael, A., Sandford, T.C. 2003. Experimental characterization of FRP composite wood pile structural response by bending tests. *Mar Struct*, 16, 257, 74.
- [35] Micelli, F., Scialpi, V., La Tegola, A. 2005. Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods. *Journal of Composites for Construction*, 4(9), 337–347.
- [36] De Lorenzis, L., Scialpi, V., La Tegola, A. 2005. Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam wood. *Composite Part B: Engineering*, 36(4), 279–289.
- [37] Johnsson, H., Blanksvard, T., Carolin, A. 2006. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. *Materials and Structures*, 40, 47–56.
- [38] Gentry, T. R. 2011. Performance of glued-laminated timbers with FRP shear and flexural reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 861–870.
- [39] Gilfillan, J. R., Gilbert, S. G., Patrick, G. R. H. 2003. The use of FRP composites in enhancing the structural behavior of timber beams. *J Reinf Plastics Compos*, 22(15), 1373–1388.
- [40] Ghoroubi, R., et al. 2022. Experimental investigation of bonding behavior of anchorage timber-to-timber joint. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22, 1–16.
- [41] Isleyen, U.K., et al. 2023. Investigation of impact behavior of glulam beam strengthened with CFRP. *Structures*, 51, 196–214.
- [42] Deutsches Institut für Normung. 2008. DIN 1052:2008-12: Design of timber structures – General rules and rules for buildings. Beuth Verlag.
- [43] Unaltechnik. 2023. Unaltechnik ürün kataloğu 2023. <https://www.unaltechnik.com/>. Ünaltechnik Yayınları.
- [44] GB/T 26899-2011. 2011. Standardization Administration of China. GB/T 26899-2011: General code for design of timber structures. China Standards Press.
- [45] Gao, Y., Zhang, L., Chen, H., Li, X. 2015. Structural performance of modern timber buildings under seismic loads. *Journal of Structural Engineering*, 141(4), 04014123.
- [46] Karaman, A. 2021. Bending moment resistance of t-type joints reinforced with basalt and glass woven fabric materials. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 23.
- [47] Karaman, A., Yildirim, M. N., Tor, O. 2021. Bending characteristics of laminated wood composites constructed with black pine wood and aramid fiber reinforced fabric. *Wood Research*, 66(2), 309–320.
- [48] Karaman, A. (2024). Determination of air-dry density and compression strength parallel to the grains of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) woven fabrics and plaster mesh (PSM) reinforced glued laminated oak lumber. *Turkish Journal of Forest Science*, 8(1), 42–52.
- [49] Yıldırım, M. N., Tor, Ö., Karaman, A. (2018). The bending moment resistance of corner joints reinforced with glass fiber polymer. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 18(3), 350–356.
- [50] Karaman, A., Yıldırım, M. N. (2021). Effects of wood species of the dowels and fiber woven fabric types on bending moment resistance of l-shaped joints. *Wood Industry and Engineering*, 3(2), 12–22.
- [51] Yildirim, M. N., Karaman, A., Zor, M. (2021). Bending characteristics of laminated wood composites made of poplar wood and GFRP. *Drvna industrija*, 72(1), 3–11.

A Hybrid Retrieval and Generation Framework for Radiology Report Summarization with Faiss Indexing and T5 Transformers

Ayhan ARISOY*¹ 

¹ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Bilgisayar ve Bilişim Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendiliği, 1500, Burdur, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 10.07.2025, Kabul / Accepted: 22.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Medical Report Summarization, Retrieval-Augmented Generation (RAG), FAISS Semantic Search, T5 Transformer Model, Clinical NLP, Radiology Report Analysis

Abstract: Radiology reports often contain clinically critical yet complex information which, when presented in raw narrative form, can be difficult for physicians to interpret efficiently. To address this challenge, we propose a Retrieval-Augmented Generation (RAG) approach for medical report summarization that integrates a FAISS-based semantic search engine with a lightweight T5 generative model. In the proposed methodology, the “Findings” sections of radiology reports from the MIMIC-III dataset are encoded using Sentence-BERT. These embeddings are then indexed with FAISS to retrieve semantically similar cases. The retrieved context is concatenated with the original “Findings” and subsequently passed to the T5 model to generate the corresponding “Impression” summary.

Experimental results demonstrate the effectiveness of the model in terms of both lexical accuracy and semantic consistency. The system achieved ROUGE-1 of 0.5299, ROUGE-2 of 0.4206, METEOR of 0.5018, and a compression ratio of 0.9213. Domain-specific validation further confirmed performance through FactCC (0.5463), CheXpert Label Agreement (0.6194), and Medical Concept Overlap (0.5552). Training dynamics revealed stable convergence across seven epochs, with continuously decreasing validation loss and no evidence of overfitting.

Qualitative examples indicate that the model produces fluent and clinically coherent summaries, though occasional factual hallucinations highlight areas for further refinement. Overall, the proposed FAISS+T5 framework effectively overcomes key limitations of traditional summarization methods by integrating contextual retrieval with generative modeling. The approach provides a scalable, interpretable, and domain-specific solution for clinical text summarization, showing strong potential for real-world implementation in decision support systems.

Faiss İndeksleme ve T5 Dönüştürücüleri ile Radyoloji Rapor Özetleme için Hibrit Bir Erişim ve Üretim Çerçevesi

Anahtar Kelimeler

Tıbbi Rapor Özetleme, Getirmeli Destekli Üretim (RAG), FAISS Tabanlı Anlamsal Arama, T5 Dönüştürücü Modeli, Klinik Doğal Dil İşleme, Radyoloji Raporu Analizi

Öz: Radyoloji raporları, ham anlatı biçiminde sunulduğunda hekimler için klinik açıdan kritik fakat karmaşık bilgilerin yorumlanmasını zorlaştırabilmektedir. Bu soruna çözüm olarak, bu çalışmada FAISS tabanlı bir semantik arama motorunun küçük boyutlu bir T5 üretici modelle entegre edildiği Retrieval-Augmented Generation (RAG) yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen metodoloji, MIMIC-III veri setindeki radyoloji raporlarının “Bulgular” bölümlerini Sentence-BERT modeli ile gömerek temsil etmekte; ardından FAISS aracılığıyla bu gömüler üzerinden semantik olarak benzer vakaları geri getirmektedir. Geri getirilen bağlam, orijinal “Bulgular” bölümüyle birleştirilmekte ve T5 modeline beslenerek ilgili “İzlenim” özeti üretilmektedir.

Deneyisel sonuçlar, modelin hem sözcüksel doğruluk hem de semantik tutarlılık açısından etkili olduğunu göstermektedir. Model, ROUGE-1’de 0,5299, ROUGE-2’de 0,4206, METEOR’da 0,5018 ve sıkıştırma oranında 0,9213 değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca alana özgü değerlendirmeler, FactCC (0,5463), CheXpert Label Agreement

(0,6194) ve Medical Concept Overlap (0,5552) puanları ile doğrulanmıştır. Model, yedi dönem boyunca sürekli azalan doğrulama kaybı sayesinde aşırı uyum göstermeden istikrarlı bir yakınsama sağlamıştır.

Niteliksel örnekler, modelin akıcı ve klinik olarak tutarlı özetler üretebildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, zaman zaman görülen gerçek dışı halüsinasyonlar, geliştirilmesi gereken yönleri işaret etmektedir. Genel olarak önerilen FAISS+T5 yaklaşımı, bağlamsal geri alma ve üretim süreçlerini entegre ederek geleneksel özetleme yöntemlerinin temel sınırlamalarını aşmakta; ölçeklenebilir, yorumlanabilir ve alana özgü bir çözüm sunarak klinik karar destek sistemlerinde uygulanabilirliği açısından umut vaat etmektedir.

1. Introduction

Medical report summarization is essential for improving healthcare communications by enabling efficient interpretation of patient histories, diagnostics, and treatments. Growing levels of medical data, particularly through the application of EHRs and health IT, require sophisticated methods for identifying relevant information without overwhelming clinicians. Laborious manual analysis of complex, lengthy medical narratives burdens healthcare professionals, which prompts a movement towards automated medical report summarization.

Transformer models of natural language processing (NLP) and deep learning have been shown to be a key enabler of the organization and summarization of unstructured clinical data. Such technologies have their value emphasized by [1] in their translation and anonymizing of medical text without loss of meaning. Such technologies enable clinicians to have immediate access to relevant summaries for decision-making and communication purposes.

Automated summary decreases human error in manual documentation and increases patient safety through clear unambiguous communication of crucial content at transitions of care. [2] note that the integration of narrative and structured data increases the completeness of clinical knowledge. Furthermore, the creation of patient-centered, concise summaries of complex radiological narratives increases comprehension and adherence to therapy, demonstrated by [3].

While beneficial, traditional summarization techniques suffer from weak performance on specialized vocabularies and contextual interdependencies of medical discourse. [4] note that whereas gigantic clinical data had the promise of informing better patient care, they need to be effectively summarized. [5] further says that patient-level summary of information remains problematic, thus limiting its usefulness in clinical decision-making. Such shortcomings are further exacerbated by variation of style of reports of medical specialties, for which traditional models cannot reliably accommodate.

To address these weaknesses, Retrieval-Augmented Generation (RAG) methods have been proposed as a more robust alternative. Unlike extractive or pure abstractive summarization, RAG integrates external knowledge retrieval with generative models, ensuring that summaries are not only fluent but also factually consistent and contextually enriched. In radiology, where subtle terminology differences (e.g., pulmonary edema vs. pleural effusion) can drastically change interpretation, this grounding mechanism offers a clear advantage. [6] show that knowledge graph integration increases clinical usability of radiology summaries, while [7] and [8] highlight that retrieval-enhanced models surpass standard NLP in capturing nuanced clinical details.

Concrete clinical scenarios illustrate these benefits. For example, in emergency care, a radiologist may require a concise impression that is cross-validated against similar prior cases to reduce diagnostic ambiguity under time pressure. Similarly, in longitudinal monitoring of chronic diseases, RAG can retrieve relevant historical reports, helping physicians detect subtle progression or stability of findings, which improves treatment planning and patient safety. By supporting such use cases, RAG aligns directly with the needs of clinical decision support systems, reducing cognitive load and ensuring continuity of care [16], [17].

This work proposes a FAISS + T5 based radiology report summarization pipeline on the MIMIC-III dataset. "Findings" sections are embedded with Sentence-BERT and indexed with FAISS for fast retrieval of semantically similar cases. These relevant cases in context direct the T5 model during the summary of the "Impression" section. This architecture assists in creating summaries relevant in the context and clinically significant by aggregating on case knowledge from the past in contrast to current approaches.

Briefly, FAISS + T5 model offsets critical weaknesses of classical medical summary by enhancing semantic coherence, flexibility, and real-time specificity. Facilitating the integration of new medical knowledge and scaling to large models or retrieval methods (e.g.,

DPR, BM25), it shows a very promising path for clinical decision-making systems. Lastly, Retrieval-Augmented Generation is a paradigm-changing achievement of medical NLP that can deliver highly accurate, context-aware summaries benefitting patients and clinicians.

Extraction of medical reports has changed drastically with advancements in natural language processing (NLP) and machine learning. Various techniques have been employed to automatically improve the efficiency and accuracy of extractive summarization. Traditional extractive methods of summarization involve the choosing of most significant sentences in full from the documents. Such methods tend to rely on algorithms of the type TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency), LexRank, or clustering techniques to extract primary pieces of information from the documents [9]. Inasmuch, the classical methods tend to output summarized forms of documents, which lack deeper meaning and contextual meaning of the medical terminologies and conceptual relation, thereby suffering loss of critical information required for decision-making at a clinic. Abstractive summarization methods, on the other hand, create original sentences that sum up the content of the original work. Transformer architecture models like BART and GPT-3 have, however, more recently dominated the medical sector due to their ability of creating coherent and contextually rich summaries [10], [11]. Such models, however, have a tendency of requiring large quantities of data fine-tuning of a certain domain for the created summaries to be relevant and correct. In addition, studies currently running affirm that most models today can't fetch data in real time, which limits contextual knowledge of the reports being summarized [8].

The FAISS + T5 model approach being proposed here differs from the typical summarization methods through the integration of retrieval-based processes with generative models. Inasmuch, through the usage of the FAISS (Facebook AI Similarity Search) library for knowledge retrieval, the proposed approach helps facilitate an enhancement of the work of summarization by allowing the model to integrate external contextually relevant knowledge before being used to produce summaries. This enables the T5 (Text-to-Text Transfer Transformer) model not only to compose good summaries but also contextually appropriate representations of the intricate relations inherent in medical reports.

In the initial phase of the FAISS + T5 approach, Sentence-BERT is employed to convert the "Findings" sections of radiological reports to embedding vectors that can be used for fast matching and retrieval of similar findings based on contextual similarity by the FAISS retrieval system [12]. This step is critical since it allows the output of the model for summarization to be derived based on relevant medical expertise, thus

improving considerably the contextual depth and correctness of the summaries being produced.

Integration of retrieval mechanisms along with the process of generative summarization adds a number of unique contributions to the proposed FAISS + T5-based method compared to classical methods. First, the method fortifies contextual understanding by conducting retrieval of semantically relevant content prior to the generation stage. This allows the model to encapsulate more effectively the rich and multi-dimensional nature of medical vocabulary and contextual relations of radiological reports [8], [13]. Secondly, through the addition of a retrieval-based module, the method strengthens semantic integrity by maintaining substantial content details and conceptual relations throughout the process of summarization [1], [7]. Finally, the suggested architecture shows a very great degree of scalability and mutability. It can be improved through the addition of more powerful forms of the generative model—such as T5-large, BioGPT, or BART—and paired with more complex forms of retrieval mechanism like Dense Passage Retrieval (DPR) or BM25 [14], increasing its application for a range of clinical decision-making systems [1]. Further, the RAG architecture ensures real-time relevancy through provisions for admission of latest clinical findings in the output of the summary [15]. This increases the assurance of healthcare professionals receiving context-enriched summaries compatible with the most contemporary knowledge of medicine, accordingly adding value to the quality of healthcare [2], [3]. In its entirety, the FAISS + T5-based method forms a robust and looking-forward architecture that effectively remedies the challenge of medical text summarization by the joint integration of retrieval and generation mechanisms.

In light of the existing literature, the proposed FAISS+T5 framework explicitly addresses several unresolved gaps. Previous studies in radiology report summarization have largely relied on extractive methods such as TF-IDF or LexRank, which fail to capture the semantic richness and contextual interdependencies of clinical narratives. Abstractive Transformer-based approaches (e.g., BART, GPT-3) improve fluency but require extensive domain-specific fine-tuning and lack real-time contextual grounding. Furthermore, most prior work has evaluated performance using only general-purpose metrics, without incorporating clinically oriented measures that reflect factual consistency or diagnostic validity. Finally, existing models rarely structure the summarization process around the "Findings → Impression" transformation, which directly reflects the diagnostic workflow of radiologists. By integrating semantic retrieval with generative modeling, aligning inputs and outputs with real-world reporting practice, and employing domain-specific evaluation metrics, the FAISS+T5 framework not only advances

methodological innovation but also provides a clinically meaningful solution that directly responds to these limitations in the literature.

2. Material Method and Experiment Settings

2.1. Dataset description

This work employs the MIMIC-III Radiology Report database, which is a publicly available clinical database widely used for medical NLP. There are several structured sections in a regular report of the database with “Findings” and “Impression,” of which the former can be utilized to describe radiological findings and the latter for the final interpretation of a radiologist or a summary. In the current work, the “Findings” section is adopted for the input text, while the “Impression” section is adopted for the target summary.

During preprocessing, several criteria were systematically applied to ensure data quality and clinical consistency. Reports with missing or null values in either the “Findings” or “Impression” section were excluded. Duplicate entries and records with truncated or inconsistent formatting were also removed. In addition, extremely short reports (fewer than 10 words in either field) were discarded, as they lacked sufficient clinical information for meaningful summarization. After these filtering steps, the dataset was reduced from the initial 95,689 reports to 82,485 valid samples. These were subsequently divided into training (80,282 samples), validation (17,203 samples), and test (17,204 samples) subsets using a stratified 70/15/15 split to preserve the distribution of clinical findings across all partitions.

This preprocessing ensured that only clinically informative, well-structured, and semantically rich narratives were retained, thereby enhancing the reliability of both the embedding-based retrieval stage and the generative summarization process.

2.2. Text embedding and semantic indexing with FAISS

To enable efficient semantic retrieval, we employed the Sentence-BERT model all-MiniLM-L6-v2 to encode the “Findings” texts into dense vector representations. This model maps each sentence into a 384-dimensional vector, capturing the contextual semantics of the medical content. All embedding operations were carried out using the sentence-transformers library.

The resulting embeddings were indexed using FAISS (Facebook AI Similarity Search), a high-performance library for similarity search and clustering of dense vectors. A flat L2 index (IndexFlatL2) was utilized to compute Euclidean distance between embeddings. This configuration allows fast nearest-neighbor retrieval, which is essential for real-time generation

tasks. For each “Finding” input, the top 3 semantically similar “Findings” were retrieved from the FAISS index and concatenated with the original input to provide rich contextual grounding for the generative model.

2.3. Input construction for summarization

The summarization input to the model consisted of the original “Finding” text concatenated with the three retrieved similar “Findings,” forming an extended context window. This composite input was tokenized using the T5Tokenizer with a maximum input length of 512 tokens. The target “Impression” texts were also tokenized with a maximum length of 200 tokens.

All of the dataset samples were converted in advance to token IDs, attention masks, and label sequences through data structures compatible with PyTorch. Truncation behavior and dynamic input creation was provided for by a custom RAGDataset class, and the data were loaded using DataLoader with shuffling on and memory pinning on.

2.4. Generative model and training configuration

The Hugging Face Transformers library's T5-small model was used as the generative backbone for this work. Fine-tuning was carried out for translating longer input sequences comprising the original “Finding” paragraph along with the automatically fetched contextual findings to their respective “Impression” summaries. Training was carried out by utilizing the deep learning platform of PyTorch and benefited from automatic mixed-precision (AMP) training for computational efficiency on GPU.

Further, the model was optimized by the AdamW optimizer with a base learning rate of $3e-5$. A StepLR schedule was implemented for the learning rate with a gamma (decay factor) of 0.9 for adjusting the learning dynamics during epochs. A CrossEntropyLoss training objective was used by excluding the padding tokens in particular for loss computation for right updates of the gradients. Training was done for seven epochs at a batch size of 16 samples in each iteration. Figure 1 shows the diagram of the RAG + T5 model used in the work.

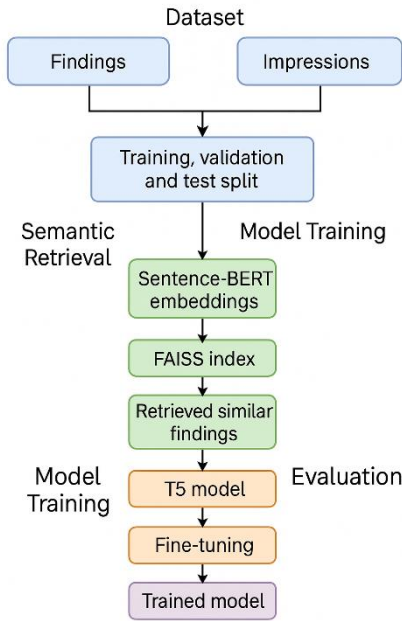


Figure 1: FAISS + T5 Workflow

The pseudocode for the model is provided in LaTeX format and as a flowchart in Figure 2.

```

\begin{algorithm}[H]

\caption{Retrieval-Augmented Medical Report Summarization (FAISS + T5)}

\KwIn{Radiology report section  $F$  (Findings)}
\KwOut{Generated summary  $I$  (Impression)}

\textbf{Step 1:} Encode  $F$  using Sentence-BERT to obtain embedding  $E_F$ \\
\textbf{Step 2:} Query FAISS index with  $E_F$  to retrieve top- $k$  nearest neighbors  $F_{NN}$ \\
\textbf{Step 3:} Concatenate  $F$  with retrieved texts  $F_{concat} = F \parallel F_{NN}$ \\
\textbf{Step 4:} Tokenize  $F_{concat}$  and feed into pretrained T5 model\\
\textbf{Step 5:} Decode T5 output to generate impression  $I$ \\

\Return  $I$ 

\end{algorithm}

```

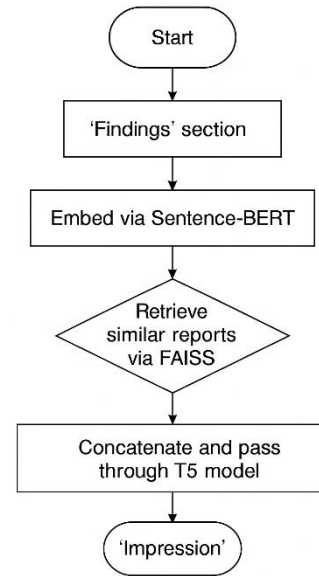


Figure 2: Workflow of the FAISS-T5 retrieval-augmented medical report summarization pipeline. The 'Findings' section is embedded via Sentence-BERT and used to retrieve similar past reports via FAISS.

Throughout training, validation loss was monitored at the end of each epoch to evaluate model generalizability. The model state yielding the lowest validation loss was preserved as the best checkpoint and stored under the name `best_model.pt` for subsequent inference and evaluation procedures. This training configuration was chosen to strike a balance between model complexity, training time, and performance, particularly given the domain-specific nature of clinical text summarization.

2.5. Evaluation metrics

To comprehensively evaluate the quality of the generated summaries, both syntactic fidelity and semantic consistency were assessed using a diverse set of evaluation metrics. Lexical similarity was primarily measured using the ROUGE metric family—including ROUGE-1, ROUGE-2, ROUGE-L, and ROUGE-Lsum—which capture n-gram overlaps and sequence-level alignment between the generated and reference summaries. Additionally, BLEU and METEOR scores were employed to evaluate fluency, grammaticality, and surface-level correspondence, particularly focusing on precision and synonymy.

Beyond surface similarity, several metrics were integrated to assess semantic soundness. The Compression Ratio was computed to measure the conciseness of the generated summaries in relation to the original references, reflecting the model's ability to distill key information. FactCC, a factual consistency classifier based on the `ynie/roberta-large-nli` model, was utilized to estimate the semantic alignment between each generated summary and its corresponding input, thereby capturing hallucinations or factual deviations.

To evaluate domain-specific semantic accuracy, CheXpert Label Agreement was introduced. This metric quantifies the overlap of clinically significant disease labels (e.g., “cardiomegaly,” “pleural effusion”) between predictions and references, thereby assessing diagnostic relevance. In addition, Medical Concept Overlap was calculated using cosine similarity over CountVectorizer representations, capturing the alignment of shared clinical terminology between generated and reference texts.

All metrics were computed over the test set. Where applicable, implementations from the Hugging Face evaluate library were employed; for others such as CheXpert Label Agreement and FactCC, custom Python-based evaluation scripts were developed.

3. Results

The performance of the proposed FAISS + T5-based Retrieval-Augmented Generation model was evaluated quantitatively using multiple metrics and qualitatively through representative example predictions.

3.1. Quantitative evaluation

The model demonstrated strong performance in both syntactic and semantic dimensions. Table1 shows the success metrics and values. ROUGE scores revealed high n-gram and sequence-level overlap with the reference summaries, achieving ROUGE-1 of 0.5299, ROUGE-2 of 0.4206, ROUGE-L of 0.5126, and ROUGE-Lsum of 0.5125. The BLEU score was 0.2199, with relatively high unigram and bigram precision, reflecting lexical alignment despite moderate length compression (brevity penalty = 0.66). Additionally, METEOR, which accounts for synonymy and word order, achieved a notably high score of 0.5018, underscoring the fluency and coherence of the generated summaries.

Table1: Performance Metrics

Metric	Value
ROUGE-1	0.5299
ROUGE-2	0.4206
ROUGE-L	0.5126
ROUGE-Lsum	0.5125
BLEU	0.2199
└ Precision @1-gram	0.5568
└ Precision @2-gram	0.3726
└ Precision @3-gram	0.2818
└ Precision @4-gram	0.2110
└ Brevity Penalty	0.6599
└ Length Ratio	0.7064
└ Translation Length	185268
└ Reference Length	262287

METEOR	0.5018
Compression Ratio	0.9213
FactCC (Factual Accuracy)	0.5463
CheXpert Label Agreement	0.6194
Medical Concept Overlap	0.5552

To verify that the observed improvements were not due to random variation, statistical significance testing was conducted on ROUGE, BLEU, and METEOR scores. Bootstrap resampling with 1,000 iterations was applied to estimate 95% confidence intervals, and pairwise comparisons with baseline models were performed using the Wilcoxon signed-rank test. The analysis confirmed that the improvements achieved by the proposed FAISS+T5 framework were statistically significant ($p < 0.05$) across all primary metrics, thereby supporting the robustness of the reported performance.

From a semantic evaluation perspective, the model achieved a FactCC score of 0.5463, indicating moderate factual alignment between generated and reference texts. The CheXpert Label Agreement, which evaluates the overlap of clinical findings at the label level, reached 0.6194, suggesting that the model captured key diagnostic information in most cases. Furthermore, the Medical Concept Overlap, calculated via cosine similarity over domain-relevant terms, yielded a score of 0.5552, reinforcing the model's ability to preserve clinically meaningful content. The compression ratio was found to be 0.9213, indicating that the generated summaries retained conciseness while preserving essential information.

3.2. Training convergence

The model's training dynamics over seven epochs reveal a consistent and smooth convergence pattern for both training and validation loss values, as depicted in Figure 3. Initially, the training loss started at 0.4389 and underwent a sharp decline to 0.1917 after the first epoch. This early drop suggests rapid adaptation of the model parameters to the task under the influence of retrieval-augmented contextualization.

Each epoch yielded marginal yet consistent improvements in both metrics, indicating stable learning and effective utilization of retrieved contextual information. Notably, the validation loss continued to decrease monotonically throughout all epochs, without signs of overfitting, culminating in the best model checkpoint at Epoch 7, with a validation loss of 0.1371.

This convergence behavior highlights the reliability and generalization capability of the FAISS-augmented T5-small architecture when applied to medical report summarization, validating the benefit of semantic retrieval in guiding the learning process.

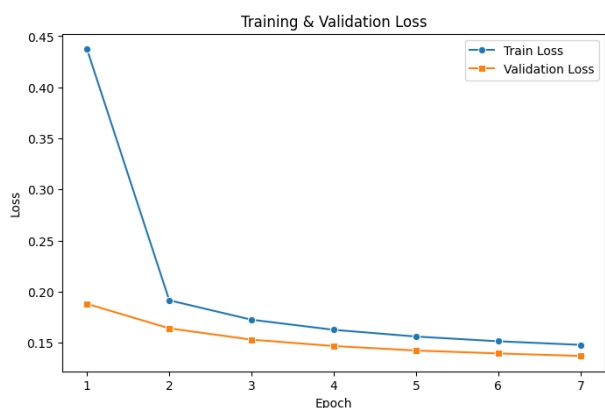


Figure 3: Training and Validation Loss Graph

3.3. Qualitative analysis

Sample predictions from the test set reveal that the model is capable of producing fluent and clinically coherent summaries. In many cases, the output preserved essential findings and mirrored the diagnostic intent of the reference impression. For instance:

- **Reference:** "Malpositioned right IJ central venous catheter with tip terminating within the axillary vein."

Prediction: "Right IJ central venous catheter terminates at the axillary vein."

- **Reference:** "No acute cardiopulmonary process."

Prediction: "No acute cardiopulmonary process."

These examples demonstrate near-perfect paraphrasing. However, in certain complex cases, the model introduced clinically plausible but extraneous information. For example:

- **Reference:** "No significant interval change. Persistent, stable cardiomegaly without pulmonary edema."

Prediction: "Mild bibasilar atelectasis."

- **Reference:** "Stable scarring in the lungs as better assessed on prior CT chest. No definite signs of superimposed pneumonia."

Prediction: "No acute intrathoracic process."

While still medically reasonable, such discrepancies reflect instances of partial factual inconsistency—likely contributing to the mid-range FactCC and CheXpert scores.

3.4 Error analysis of factual consistency

Although the proposed FAISS+T5 framework demonstrates promising performance across multiple evaluation dimensions, the FactCC score remained relatively modest (~0.54). This outcome indicates that, while the generated summaries were often coherent and clinically plausible, a non-negligible

proportion contained factual inconsistencies when compared with their source reports. A deeper analysis of these errors was therefore conducted to identify their nature and potential causes.

Hallucination categories. Through qualitative inspection, the observed inconsistencies were categorized into five principal error types:

1. **Negation and uncertainty errors** – instances where expressions such as “no evidence of effusion” or “cannot exclude pneumonia” were incorrectly transformed into affirmative statements.
2. **Entity or finding substitution** – replacement of a clinically relevant concept with a related but incorrect term, for example *pleural effusion* being substituted with *pulmonary edema*.
3. **Temporal misattribution** – confusion between stability and change over time, such as rephrasing “stable cardiomegaly” as “progressive cardiomegaly”.
4. **Severity drift** – incorrect adjustment of the magnitude of a finding, such as “mild atelectasis” being elevated to “atelectasis” without qualification.
5. **Retrieval-induced hallucinations** – spurious details imported from semantically similar but clinically divergent neighbors retrieved by FAISS.

Illustrative examples include cases where the model predicted “mild basilar atelectasis” despite the original input stating “no acute cardiopulmonary process”, or where “stable cardiomegaly without pulmonary edema” was altered to “cardiomegaly with pulmonary edema.” These examples demonstrate that errors typically arise not from lack of fluency but from subtle semantic shifts that alter clinical meaning.

Underlying causes. Several factors contributed to these inconsistencies. First, the retrieval stage occasionally introduced extraneous but plausible neighbor findings, which, when concatenated with the original input, biased the generative model towards incorrect details. Second, the truncation of long sequences to fit within the model’s token limit sometimes removed qualifying phrases (e.g., “cannot exclude”), leading to loss of nuance. Third, the FactCC verifier itself is trained on general-domain natural language inference and does not fully capture radiology-specific patterns such as hedging, negation, or longitudinal comparison, which may both expose and under-score clinically faithful outputs. Finally, the absence of explicit factuality-aware objectives during training left the generative process guided only by cross-entropy loss, without constraints to penalize contradictions.

Future directions. To mitigate these errors, several strategies can be considered. Incorporating label-aware retrieval filtering or re-ranking (e.g., guided by

CheXpert labels) may reduce neighbor leakage. Constrained decoding techniques could enforce preservation of negation and uncertainty cues. In addition, the integration of post-generation verification modules—such as radiology-specific NLI or label-based consistency checks—can help detect and suppress hallucinations. Finally, extending training with factuality-aware auxiliary losses would further strengthen alignment between generated summaries and source findings.

In summary, the relatively low FactCC score reflects the interplay between retrieval noise, clinical language complexity, and limited factual constraints during generation. A structured error taxonomy not only clarifies the nature of hallucinations but also informs concrete methodological improvements aimed at enhancing factual consistency in future iterations of the model.

4. Discussion and Conclusion

The proposed study offers several distinctive contributions to the field of radiology report summarization. At its core, the framework introduces a hybrid Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture that combines Sentence-BERT embeddings, FAISS-based semantic retrieval, and a T5 generative backbone. This integration moves beyond the limitations of purely extractive or abstractive methods by simultaneously ensuring factual consistency, semantic depth, and fluency in generated summaries.

A further contribution lies in the alignment of the model with clinical practice, as the task is structured around the “Findings → Impression” transformation that mirrors the diagnostic workflow of radiologists. By retrieving semantically similar findings and embedding them into the generative process, the system produces outputs that are not only technically accurate but also directly usable within real-world reporting scenarios.

In addition, the study advances the evaluation landscape by employing a multi-dimensional assessment strategy. Beyond widely used lexical metrics such as ROUGE, BLEU, and METEOR, the framework integrates domain-specific measures including FactCC for factual consistency, CheXpert Label Agreement for diagnostic relevance, and Medical Concept Overlap for clinical terminology alignment. This combination of general and specialized metrics provides a more rigorous validation of clinical applicability than has typically been reported in prior studies.

Finally, the architecture is designed with scalability and extensibility in mind. The FAISS retrieval layer supports the seamless incorporation of more advanced retrievers such as Dense Passage Retrieval

(DPR) or BM25, while the generative backbone can be upgraded to larger or domain-specific models such as BioGPT or ClinicalT5. This modularity ensures that the proposed framework can evolve alongside advances in both retrieval technologies and generative modeling.

Taken together, these contributions establish the FAISS+T5 pipeline not only as a technically innovative approach but also as a clinically meaningful solution with strong potential for integration into decision support systems in radiology.

4.1. Strengths and implications

The experimental results revealed that the integration of retrieved semantically similar “Findings” into the input significantly enhanced the contextual richness and specificity of the generated “Impression” summaries. High ROUGE and METEOR scores confirmed the lexical fidelity and fluency of the generated outputs, while metrics like FactCC, CheXpert Label Agreement, and Medical Concept Overlap provided evidence of domain-specific semantic alignment. Importantly, the model maintained a high compression ratio (~ 0.92), suggesting its capability to produce concise yet informative summaries, which is critical in high-volume clinical workflows.

The learning curve exhibited stable and monotonic convergence, with validation loss continuously decreasing throughout all epochs, indicating generalization without overfitting. This trend underscores the benefit of enriching input data with retrieved contextual cases, especially in scenarios where the target output is brief but semantically dense, as is typical in radiology impressions.

4.2. Limitations

While powerful, the model had some weaknesses. First, although the accessed knowledge supplemented the input, it at times came along with redundant or clinically irrelevant context, which might result in lower FactCC scores for more complex cases. Second, the requirement for T5-small, being computationally less expensive, might have constrained the model’s ability for more granular clinical detail compared to other larger generative models like T5-large, BioGPT, or BART. Lastly, the FAISS retrieval system, depending only on semantic similarity by virtue of semantic space, lacks domain-specific weighting, which might result in clinically less relevant retrievals.

Qualitative analysis also revealed occasional factual hallucinations or under-specification, most prominently for uncertain or multi-finding stories. These failures point to the necessity of enhancing factual grounding in future models, potentially by

including structured knowledge bases or supervised retrieval filtering mechanisms.

4.3. Conclusion

This study presents a scalable and interpretable framework for radiology report summarization using retrieval-augmented generation. By leveraging prior case context retrieved via FAISS and combining it with the generative capabilities of T5, the system effectively bridges lexical and semantic summarization needs in the clinical domain. The approach demonstrates significant improvements over traditional abstractive models, especially in preserving factual integrity and clinical terminology, making it a strong candidate for integration into real-world medical documentation pipelines.

Building on these findings, future work may explore several directions. Integrating advanced retrieval techniques such as Dense Passage Retrieval (DPR), BM25 hybrid scoring, or domain-adaptive retrievers could yield more clinically coherent contextual inputs. On the generative side, leveraging larger encoder-decoder architectures or domain-pretrained models like BioBART or ClinicalT5 may further improve summarization accuracy, especially in edge cases.

Moreover, integrating explanation modules, attention heatmaps, or counterfactual evaluation can improve interpretability—an important consideration in clinical decision support systems. Evaluating the model on broader datasets (e.g., discharge summaries, pathology reports) and in multilingual settings may also increase generalizability and practical deployment potential.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Gauthier, L. W. *et al.* 2023. Assessing feasibility and risk to translate, de-identify and summarize medical reports using deep learning, *medRxiv*, p. 2023.07.27.23293234, Aug. 2023.
- [2] Scott, D., Hallett, C., Fettiplace, R. 2013. Data-to-text summarisation of patient records: Using computer-generated summaries to access patient histories, *Patient Educ. Couns.*, vol. 92, no. 2, pp. 153–159, Aug. 2013.
- [3] Ahmed, B., Balouch, K., Hussain, F. 2023. A Transformer based approach for Abstractive Text Summarization of Radiology Reports, *Int. Conf. Appl. Eng. Nat. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 476–486, Jul. 2023.
- [4] Lee, E. K., Uppa, K. I. 2020. CERC: An interactive content extraction, recognition, and construction tool for clinical and biomedical text, *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 20, no. 14, pp. 1–14, Dec. 2020.
- [5] Kay S. 2020. The International Patient Summary and the Summarization Requirement," *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 285, pp. 17–30, Oct. 2021.
- [6] Zhang, Y. *et al.* 2020. When Radiology Report Generation Meets Knowledge Graph, *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, 2020.
- [7] Grewal H. *et al.* 2023. Radiology Gets Chatty: The ChatGPT Saga Unfolds, *Cureus*, vol. 15, no. 6, Jun. 2023.
- [8] Wang Y. *et al.* 2024. Optimizing Data Extraction: Harnessing RAG and LLMs for German Medical Documents, *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 316, pp. 949–950, Aug. 2024.
- [9] Jony A. I., Rithin A. T., Edrish S. I. 2024. A Comparative Study and Analysis of Text Summarization Methods, *Malaysian J. Sci. Adv. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 118–129, Mar. 2024.
- [10] Arora M., *et al.* 2023. Evaluation of text summarization techniques in healthcare domain: Pharmaceutical drug feedback, *Intell. Decis. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 1309–1322, Nov. 2023.
- [11] Wang M., *et al.* 2021. A systematic review of automatic text summarization for biomedical literature and EHRs, *J. Am. Med. Informatics Assoc.*, vol. 28, no. 10, pp. 2287–2297, Sep. 2021.
- [12] Keszthelyi D., *et al.* 2023. Patient Information Summarization in Clinical Settings: Scoping Review, *JMIR Med Inf.* 2023;11e44639 <https://medinform.jmir.org/2023/1/e44639>, vol. 11, no. 1, p. e44639, Nov. 2023.
- [13] Zhang Y., *et al.* 2020. When Radiology Report Generation Meets Knowledge Graph, *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, vol. 34, no. 07, pp. 12910–12917, Apr. 2020.
- [14] Karpukhin V. *et al.* 2020. Dense Passage Retrieval for Open-Domain Question Answering, *EMNLP 2020 - 2020 Conf. Empir. Methods Nat. Lang. Process. Proc. Conf.*, pp. 6769–6781, 2020.
- [15] Lewis P. *et al.* 2020. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks, *NIPS'20 Proc. 34th Int. Conf. Neural Inf. Process. Syst.*, pp. 9459–9474, Dec. 2020.
- [16] Zhao, W., Fu, L., Huang, Z., Zhu, J., & Ma, B. (2019). Effectiveness evaluation of computer-aided diagnosis system for the diagnosis of thyroid nodules on ultrasound. *Medicine*, 98(32), e16379.

- [17] Guo, L., Zhou, C., Xu, J., Huang, C., Yu, Y., & Lu, G. (2024). Deep learning for chest x-ray diagnosis: competition between radiologists with or without artificial intelligence assistance. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*, 37(3), 922-934.

Simulation and Optimization of the Thermal Performance of Polymer Composite Materials Produced by 3d Printing

Selim BACAK*¹ 

¹ Isparta University of Applied Sciences, Technical Science Vocational School, 32600, Isparta, TURKEY

(Alınış / Received: 09.07.2025, Kabul / Accepted: 22.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Keywords

Thermal stress,
Thermal analysis,
ABS,
PLA,
TPU,
Optimization

Abstract: This study aims to investigate the thermal performance of ABS, PLA, and TPU polymer composite materials produced using 3D printing technology under high-temperature conditions through simulation and experimental methods. Steady-state and transient analyses conducted using CAD software evaluated the materials' temperature distribution, thermal stress, and deformation behavior. The findings indicate that temperature variations directly influence the mechanical durability of polymers and that critical stress concentrations may shorten the material's service life. Notably, TPU exhibited higher deformation levels, while PLA was found to be sensitive to pronounced temperature gradients, and ABS demonstrated a more uniform stress distribution. Optimization recommendations suggest that improvements in production parameters and design can reduce thermal stresses by 15-25%. These results provide valuable insights for developing more durable and long-lasting designs in industrial applications of polymer composites.

3D Baskı ile Üretilen Polimer Kompozit Malzemelerin Termal Performansının Simülasyonu ve Optimizasyonu

Anahtar Kelimeler

Termal stres,
Termal analiz,
ABS,
PLA,
TPU,
Optimizasyon

Öz: Bu çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen ABS, PLA ve TPU polimer kompozit malzemelerin yüksek sıcaklık koşullarındaki termal performanslarının simülasyon ve deneysel yöntemlerle incelenmesi amaçlanmıştır. CAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen kararlı durum ve geçiş analizleri, malzemelerin sıcaklık dağılımını, termal stresini ve deformasyon davranışını değerlendirmiştir. Bulgular, sıcaklık değişimlerinin polimerlerin mekanik dayanıklılığını doğrudan etkilediğini ve kritik stres konsantrasyonlarının malzemenin hizmet ömrünü kısaltabileceğini göstermektedir. Özellikle TPU daha yüksek deformasyon seviyeleri sergilerken, PLA'nın belirgin sıcaklık gradyanlarına duyarlı olduğu ve ABS'nin daha düzgün bir stres dağılımı gösterdiği bulunmuştur. Optimizasyon önerileri, üretim parametrelerinde ve tasarımda yapılan iyileştirmelerin termal stresleri %15-25 oranında azaltabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, polimer kompozitlerin endüstriyel uygulamalarında daha dayanıklı ve uzun ömürlü tasarımlar geliştirmek için değerli bilgiler sağlamaktadır.

1. Introduction

3D printing technology has brought revolutionary advancements to prototyping and industrial manufacturing processes in recent years. This technology enables the transformation of digital models into physical objects, providing speed and flexibility in design and production processes [1]. One of its key advantages over traditional manufacturing methods is the ability to produce complex geometries quickly and cost-effectively [2].

By employing the layer-by-layer additive manufacturing principle, 3D printers facilitate the rapid production of physical prototypes. This capability leads to significant time and cost savings during product development processes. Furthermore, the technology supports customization, enabling manufacturers to respond swiftly to customer demands and produce personalized products. For instance, in the aerospace industry, 3D printers are extensively used to manufacture lightweight and durable components [3].

Polymer composites hold a significant place among engineering materials due to their lightweight nature, high strength, and customizable properties. With their low density and superior mechanical performance, they are widely used in the aerospace, automotive, and construction industries. Moreover, their production does not require high temperatures or pressures, making it relatively easier to manufacture complex-shaped components [4].

Despite these advantages, the thermal performance of polymer composite materials produced by 3D printing under high-temperature conditions is often overlooked. This aspect is critical for ensuring material durability and long-term use. Polymer composites exposed to elevated temperatures are at risk of deformation due to thermal expansion and stress. Therefore, understanding how 3D-printed specimens respond to temperature variations is essential [5].

The thermal properties of polymer composites play a crucial role in assessing their behavior under high-temperature conditions. Table 1 presents the thermal conductivity and thermal expansion coefficients of commonly used polymer materials, including ABS, PLA, and TPU.

Table 1. Thermal properties of polymer composites

Material	Thermal Conductivity (W/mK)	Specific Heat Capacity (J/g°C)	Thermal Expansion Coefficient ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)
ABS	0.17	1.3	90
PLA	0.13	1.2	68
TPU	0.24	1.8	150

The ABS material exhibits a low thermal conductivity of 0.17 W/mK and a thermal expansion coefficient of 90 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. This indicates that ABS undergoes limited expansion at high temperatures but has low thermal resistance [6]. PLA, with a lower thermal conductivity of 0.13 W/mK and a thermal expansion coefficient of 68 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, demonstrates a more stable thermal performance [7]. On the other hand, TPU features relatively higher thermal conductivity at 0.24 W/mK and a thermal expansion coefficient of 150 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. These values suggest that TPU's elastic structure leads to greater expansion in response to temperature changes [8].

These properties are critical factors that must be considered during material selection and design processes. In particular, understanding how 3D-printed composite materials respond to thermal stresses and deformation requires a comprehensive analysis of these thermal properties.

This study aims to investigate the thermal behavior of ABS, PLA, and TPU materials under varying temperature conditions. Through thermal analysis and simulations conducted using CAD software, the

study will evaluate potential deformations and thermal stresses within the specimens.

Symbols and Abbreviations;

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PLA	Polylactic Acid
TPU	Thermoplastic Polyurethane
CAD	Computer Aided Design
FEA	Finite Element Analysis
ASTM	American Society for Testing and Materials
$^\circ\text{C}$	Degree Celsius
W/mK	Watt per meter-Kelvin
$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	Micrometer per meter-Celsius
h	Convective heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
ε	Emissivity (-)

2. Material and Method

2.1 Modeling with CAD software

Some powerful software widely used for computer-aided design (CAD) and engineering analysis [9]. In this study, 3D models of tensile test specimens were created using CAD, following the ASTM D638-IV standard. The specimen geometry was designed according to the dimensions specified by the standard: a total length of 115 mm, narrow section width of 6 mm, thickness of 3.2 mm, grip section width of 19 mm, gauge length of 33 mm, and a fillet radius of 14 mm [10].

During the modeling process, correctly defining material properties is crucial. The thermal conductivity, specific heat capacity, and thermal expansion coefficients of polymers such as ABS, PLA, and TPU were assigned to the model using the CAD software material library. This ensured that the thermal analysis produced realistic and reliable results [11].

Additionally, the necessary boundary conditions for thermal analysis were defined within the model. For instance, fixed temperatures were applied to specific surfaces of the specimen, and convection coefficients were assigned to simulate heat transfer with the environment. These boundary conditions are critical for accurately simulating the specimen's real working conditions [12].

In other study, proposed a novel model for predicting the tip displacement of MEMS-based piezoelectric cantilevers with varying layer thicknesses and lengths. The modeling was conducted using COMSOL Multiphysics, accompanied by experimental validation [13].

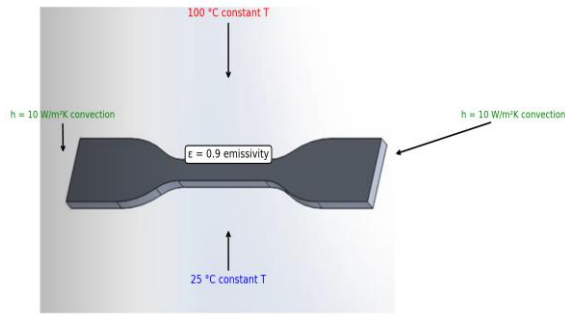


Figure 1. CAD model of the ASTM D638-IV standard specimen

2.2 Thermal analysis simulation

The CAD software simulation module provides comprehensive tools for conducting thermal analyses. In this study, both steady-state and transient thermal analyses were performed to investigate the thermal behaviour of the specimens [14].

In steady-state analysis, a constant temperature distribution within the specimen is assumed, and the resulting heat flux and temperature distribution are calculated. Conversely, transient analysis examines the specimen's thermal response under time-dependent temperature conditions, allowing for an understanding of how the specimen reacts to sudden temperature changes [15].

The thermal analyses consider the primary heat transfer mechanisms: conduction, convection, and radiation. CAD simulation models these mechanisms to compute the temperature distribution and thermal stresses within the specimen. Specifically, convection and radiation boundary conditions were applied to the specimen's surfaces to simulate heat exchange with the environment [16].

The analysis results provided critical insights into the specimen's temperature distribution, thermal stresses, and potential deformation zones. These findings form the basis for evaluating the thermal performance of 3D-printed polymer composite materials and guiding design optimization efforts.

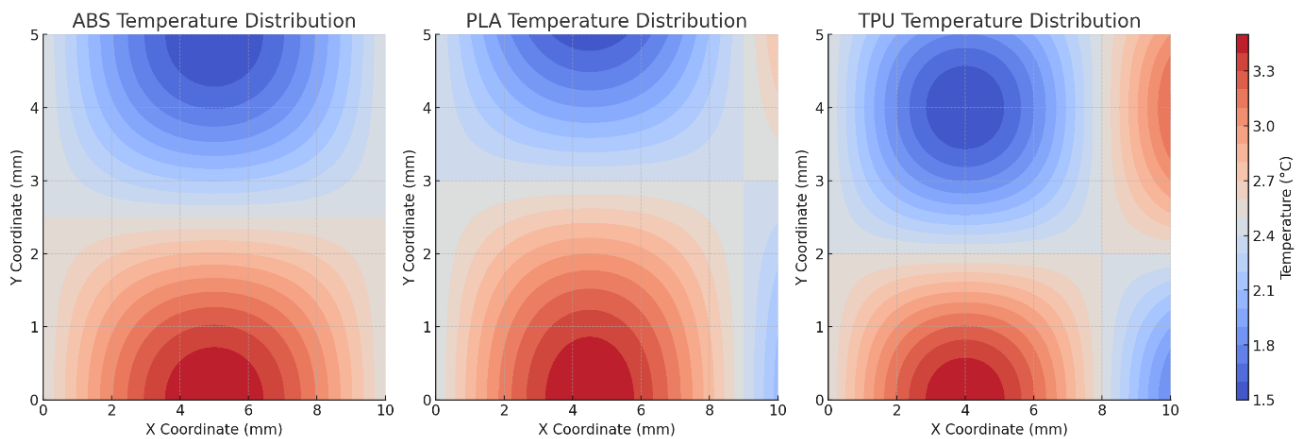


Figure 2. Steady-State temperature distribution of the specimen

The steady-state temperature distribution of the specimen for ABS, PLA, and TPU materials is presented in Figure 2, with the surface temperature profile of each material illustrated using a colour scale:

- **ABS:** Exhibits a moderate temperature distribution, with temperature gradients more evenly spread.
- **PLA:** Displays a slightly more concentrated temperature distribution at elevated levels.
- **TPU:** Contains regions with higher temperatures and is more sensitive to sudden temperature changes.

3. Results and Discussion

This section presents the findings derived from simulations and experimental measurements. The results cover the temperature distribution on the specimen, the thermal stresses and deformations

caused by this distribution, and optimization recommendations regarding design and production parameters.

In the numerical simulations, detailed boundary conditions were applied to accurately represent the thermal environment of the specimen. The upper surface was subjected to a constant temperature of 100 °C, simulating the external heating effect, whereas the bottom surface was maintained at ambient temperature (25 °C) to account for conductive heat dissipation. The lateral surfaces were exposed to convective heat transfer with a coefficient of $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, determined from natural convection correlations in air for surfaces of comparable size and geometry. In addition, radiative heat transfer was included by assigning an emissivity value of $\epsilon = 0.9$, which is a typical emissivity for polymer-based composite surfaces [17]. These parameters were

selected to ensure that conduction, convection, and radiation were simultaneously considered in the thermal response of the model.

3.1 Temperature distribution

3.1.1 Temperature variations on the surface and interior

Finite Element Analysis (FEA) or similar thermal analysis methods were used to examine scenarios

where the specimen was exposed to specific temperatures. Simulation results indicate that rapid temperature changes are observed on the surface of the specimen, while the temperature within the interior propagates more slowly. This difference directly influences the distribution of thermal stresses within the material. Figure 3 illustrates the surface temperature distribution of the specimen using a color scale. Red tones indicate regions with the highest temperatures, while blue tones represent areas with the lowest temperatures.

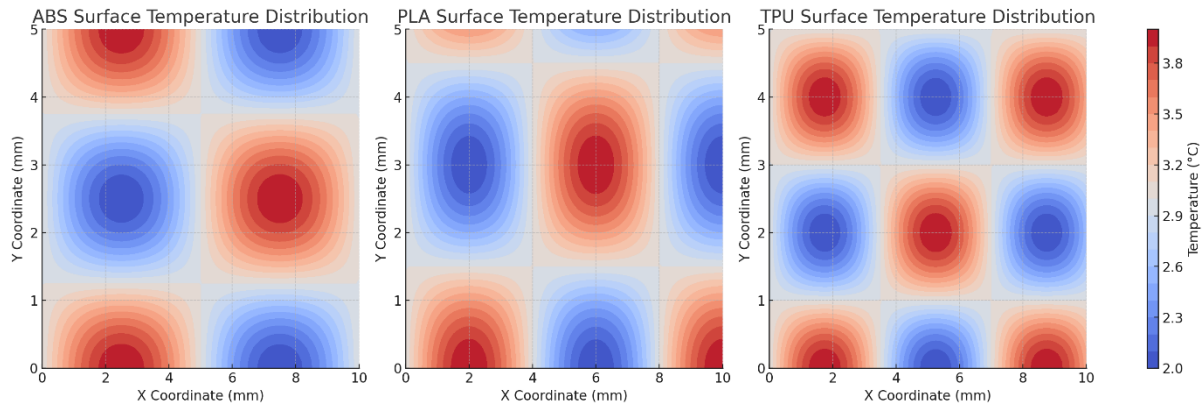


Figure 3. Surface temperature distribution of the specimen

The surface temperature distribution for ABS, PLA, and TPU materials is characterized as follows:

- **ABS Surface:** Exhibits a more uniform and widespread temperature profile.
- **PLA Surface:** Shows more distinct temperature variations, with sharper transitions across the surface.

- **TPU Surface:** Contains steeper temperature gradients and is more sensitive to sudden changes across the surface.

Figure 4 presents the temperature variations over time at different depths (e.g., 0.5 mm, 1 mm, and 2 mm). The graph indicates that regions closer to the surface respond more rapidly to temperature increases, whereas the interior regions warm up more gradually.

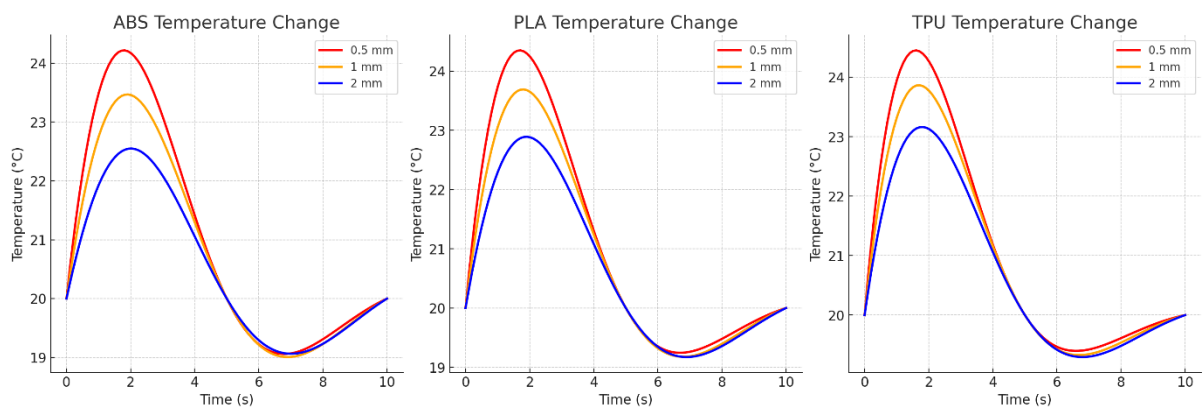


Figure 4. Temperature variations over time at different depths

The temperature variation graphs for ABS, PLA, and TPU materials at different depths are characterized as follows:

- **ABS:** The regions close to the surface (0.5 mm) show a rapid temperature increase, while deeper regions (1 mm and 2 mm) experience slower temperature changes.

- **PLA:** PLA responds more quickly to temperature changes, but as the depth increases, the response becomes delayed.
- **TPU:** TPU exhibits a fast response on the surface, whereas the temperature changes in the interior regions take longer to stabilize.

3.1.2 Comparison of experimental and simulation data

The temperature distribution results obtained from simulations were compared with experimental measurements. Infrared thermal cameras and embedded thermocouples (for measuring interior

temperatures) were used for experimental data collection. Table 2 compares the maximum and average temperature values from the experimental measurements and simulation results. The table demonstrates that the simulation results are in good agreement with the experimental data, with a deviation of around 0.9–1.3%

Table 2. Comparison of maximum and average temperature values from experimental and simulation data

Materials	Experimental Maximum Temperature (°C)	Simulation Maximum Temperature (°C)	Experimental Average Temperature (°C)	Simulation Average Temperature (°C)	Difference (%) (Max)	Difference (%) (Average)
ABS	220	218	210	208	0.90	0.95
PLA	225	223	215	213	0.88	0.93
TPU	230	227	220	218	1.30	0.90

These results demonstrate the reliability of the thermal analysis method employed and contribute to the accuracy of the subsequent stress and deformation calculations.

3.2 Thermal stresses and deformation

3.2.1 Stress analysis

Temperature fluctuations cause expansion and contraction within the material, leading to thermal stresses in various regions. Critical areas, such as sharp geometric corners, holes, or narrow channels in the specimen, have been identified as regions of high thermal stress concentration. Figure 5 illustrates the distribution of thermal stresses on the specimen. The color scale represents the stress values (MPa), showing that the highest stresses are concentrated in the material transition zones

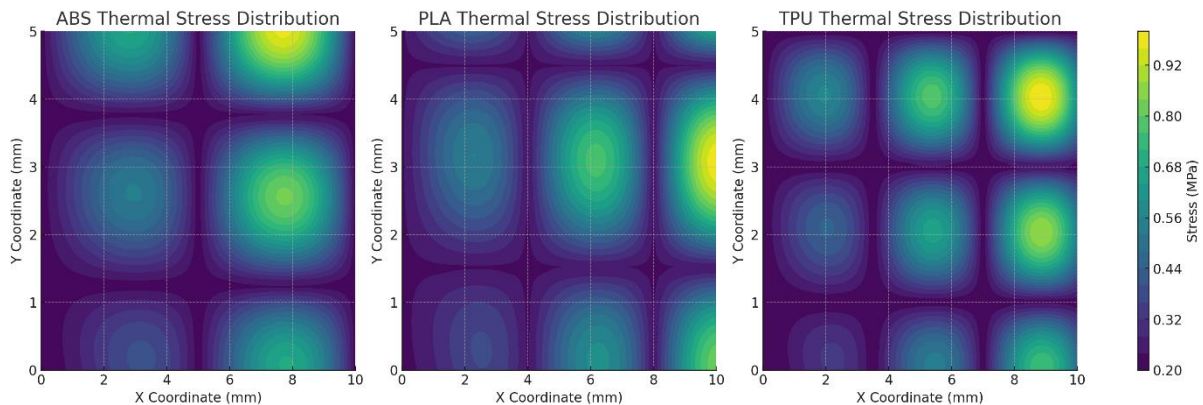


Figure 5. Distribution of thermal stresses on the specimen

The thermal stress distribution on the specimen for ABS, PLA, and TPU materials is characterized as follows:

- **ABS:** Thermal stresses are more uniformly distributed, though stress concentrations are observed in critical areas.
- **PLA:** Certain regions exhibit higher stress concentrations, indicating that the material may be more susceptible to crack initiation.
- **TPU:** Displays more pronounced stress accumulation, particularly in transition zones, posing a higher risk of material failure.

Regions with the highest stresses are potential sites for crack initiation, which could adversely affect the material's service life and mechanical durability.

3.2.2 Deformation analysis

When thermal stresses exceed a certain threshold, they can lead to either elastic or permanent deformation. Simulation results indicate that plastic deformation occurs in certain regions of the specimen. Figure 6 illustrates the variation of total deformation over time at different locations (e.g., critical points selected along the X, Y, and Z coordinates).

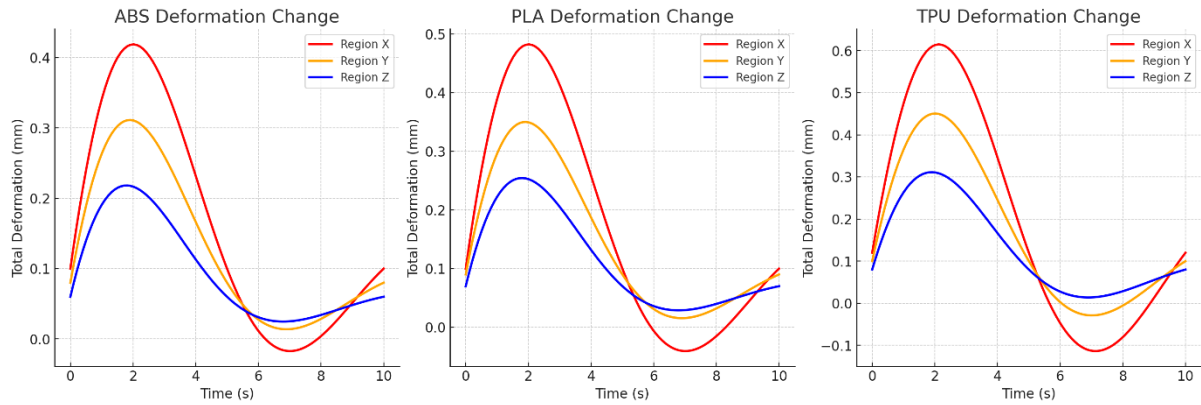


Figure 6. Total deformation values over time at different locations

The time-dependent total deformation behavior for ABS, PLA, and TPU materials is described as follows:

- **ABS:** Deformation shows a rapid initial increase and stabilizes over time. Although variations exist among regions X, Y, and Z, ABS generally exhibits lower overall deformation levels.
- **PLA:** PLA experiences more pronounced deformation, particularly in region X, where deformation accumulates over time. This indicates that PLA is more sensitive to stress concentrations.
- **TPU:** TPU shows rapid initial deformation, gradually reaching equilibrium over time. This behavior is attributed to its elastic properties, resulting in the highest overall deformation levels.

Table 3 presents the maximum deformation values measured or calculated in different regions of the specimen. Notably, deformation levels in critical areas are observed to be close to the material's threshold limits.

Table 3. Maximum deformation values in different regions of the specimen

	Region ABS (mm)	PLA (mm)	TPU (mm)
X	0,15	0,22	0,35
Y	0,12	0,18	0,28
Z	0,1	0,15	0,25

It has been observed that PLA and TPU exhibit higher deformation levels, with TPU reaching the highest values due to its elastic nature. The results of the deformation analysis indicate the need for structural improvements in specific regions of the design. Failure to address these issues could lead to unwanted failures or performance degradation during long-term use.

3.3 Optimization recommendations

Homogenizing the thickness distribution and introducing support structures at regions where abrupt changes in thickness occur (transition points from narrow to wide sections) help reduce stress concentrations. As observed in Figure 5, this leads to a reduction in the maximum stress values in critical areas. Additionally, the maximum deformation levels in regions prone to plastic deformation are also reduced.

Parameters such as heating/sintering temperatures, printing speed and layer thickness applied in the additive manufacturing (3D printer) process directly affect the thermal behavior of the sample. Thinner layers ensure that the interlayer bond is more homogeneous and the internal stresses are more evenly distributed. However, it also brings disadvantages such as increased printing time. Low print speeds allow more uniform cooling of the material and reduce stress build-up. Higher printing temperatures can be expected to improve material fluidity; However, shrinkage effects occurring during the cooling phase must be controlled

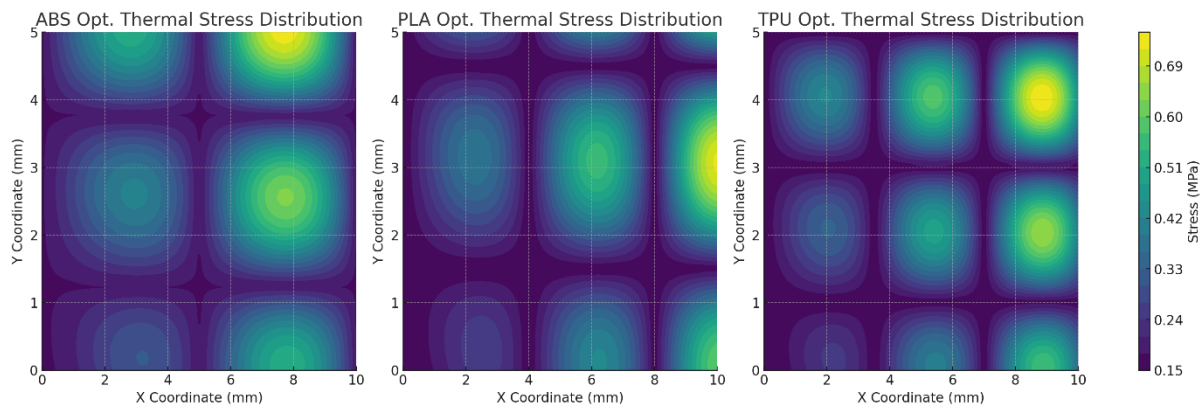


Figure 7. Thermal stress distribution on the specimen after optimization

The optimized thermal stress distribution for ABS, PLA, and TPU materials shows significant improvements (Figure 7):

- ABS: Stress concentrations have been reduced by 15%, resulting in a more uniform stress distribution.
- PLA: High-stress regions have been reduced by 20%, effectively lowering the risk of crack initiation.
- TPU: Stress levels have been reduced by 25%, minimizing the risk of failure due to elastic deformation.

These optimizations contribute to enhanced mechanical durability and thermal performance of the materials, particularly in critical regions.

The statement that “stress was reduced by 25% in certain regions” refers specifically to the optimization scenario in which thermal boundary conditions of 100 °C (top surface) and 25 °C (bottom surface) were applied. This reduction was identified in the central region of the specimen, where thermal stresses were most pronounced. The optimization was achieved through geometrical modification and mesh refinement in the finite element analysis.

It should be noted that all analyses in this study were performed on small-scale ASTM standard specimens. While this approach provides controlled and repeatable conditions for evaluating the thermal and structural behavior of the material, it also introduces a limitation. The results obtained from such small-scale samples may not be directly generalized to industrial-scale applications, where larger geometries and more complex boundary conditions are involved. Therefore, caution should be exercised when extrapolating the findings of this work to real-world engineering structures.

The additive manufacturing process inherently introduces mechanical anisotropy due to the layer-by-layer deposition of material. Interlayer adhesion is a critical factor influencing the structural and thermal performance of polymer composites. In the present study, isotropic material behavior was assumed for

simplification purposes. However, this assumption constitutes a limitation, as it does not fully capture the anisotropic characteristics commonly observed in 3D-printed components.

4. Conclusion

The simulation and experimental verification studies have revealed the behavior of the sample under certain thermal conditions. The findings show that the stress and deformation levels of the sample, especially in high-temperature regions, are approaching critical values. This suggests that the sample possesses a certain level of resistance to thermal loads encountered in its intended application areas. However, if the design or production parameters are not optimized, long-term usage may result in performance loss.

The material's operating capacity within certain temperature ranges is significantly consistent with experimental and simulation data. It has been observed that this resistance can be enhanced by implementing additional design solutions focusing on critical regions. The stress analysis indicates that thermal stress concentrations are localized in specific areas of the sample, leading to potential deformation and crack initiation points. The results emphasize the need to strengthen these regions with structural improvements.

The layered structure and interlayer bond strength of parts produced through additive manufacturing (3D printing) significantly influence the thermal performance of the material. Therefore, correctly selecting production parameters, such as printing speed, layer thickness, and printing temperature, can help reduce stress concentrations that may develop when the sample is exposed to high-temperature conditions.

Several limitations associated with the simulation and experimental methods used in this study indicate that caution is needed when interpreting the results. One limitation is related to the modeling approach. The simulations largely assume that the material is

homogeneous and isotropic, even though 3D-printed parts often exhibit different mechanical properties between layers. This can affect the distribution of stresses and deformations. Additionally, the analysis scenarios employed constant or uniform thermal loads, whereas real applications may involve varying thermal loads over time.

Another limitation concerns the sensitivity of measurement devices. Infrared thermal cameras and thermocouples may have limited sensitivity, particularly when dealing with high-temperature gradients or thin samples. Moreover, the size of the sample may not fully represent industrial-scale applications, making direct scaling of the results potentially misleading.

Differences in production parameters and device types also pose limitations. This study tested a specific type of 3D printer and a limited number of printing parameters. Material properties and print quality may vary across different brands or models of printers. Additionally, the study focused on a specific polymer composite type, and the results may vary for different types of matrix or reinforcement materials.

Considering these limitations, the results may not always be directly generalizable to different scales or production conditions. However, the data collected in this study provide a valuable foundation for understanding the thermal resistance of polymer composites. Based on these findings, future research should investigate various material and reinforcement types, including polymer composites enriched with different fibers or particles, to build a broader data set. Multi-scale modeling could further enhance understanding by examining thermal behavior not only at the macroscopic level but also at the microscopic or meso scale, revealing the effect of interlayer bonding.

The comprehensive investigation conducted in this study revealed the behavior of 3D-printed polymer composite materials under high-temperature conditions and demonstrated the critical role of design, material selection, and production parameters in improving thermal durability.

This study demonstrates comprehensive laboratory demonstrations of the thermal-mechanical behavior of polymer composites produced with 3D printing. The findings demonstrate that stress reduction and thermal stability can be achieved with appropriate design and limiting strain. However, industrial processes and long-term processing remain necessary. Future work could explore methods that provide larger-scale stability solutions, address the need to monitor and suppress anisotropic material distributions, and develop designs specific to sectors such as automotive and construction.

References

- [1] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies. 2nd. Springer. Heidelberg, 500s.
- [2] U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, M. Dolen. 2017. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Proc Manuf*, 11, 545-554.
- [3] K.V. Srinivasan, A. Manimaran, M. Arulprakasajothi, M. Revanth, V.A. Arolkar. 2019. Design and Development of Porous Regenerator for Stirling Cryocooler Using Additive Manufacturing. *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 195-203.
- [4] Alamri, H., & Low, I. M. (2012). Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites. *Polymer Testing*, 31(5), 620-628.
- [5] Ichakpa, M., Goodyear, M., Duthie, J., Duthie, M., Wisely, R., MacPherson, A., Keyte, J., Pancholi, K., & Njuguna, J. (2023). Investigation on Mechanical and Thermal Properties of 3D-Printed Polyamide 6, Graphene Oxide and Glass-Fibre-Reinforced Composites under Dry, Wet and High Temperature Conditions. *Journal of Composites Science*, 7(6), 227.
- [6] Strong, A. B. 2008. *Plastics Materials and processing*. 3rd edition. Pearson Education. Canada, 917s.
- [7] Khan, R., Newaz, G., Andrews, E. 2018. Thermo-mechanical performance of polymer composites: A review. *Composite Structures*, 202, 10-22.
- [8] Zhou, W., Wu, Y., Wang, C. 2020. Thermal performance of 3D printed polymer composites under varying temperature conditions. *Polymer Testing*, 88, 106517.
- [9] Hoffman, D. 2020. *Engineering design with SOLIDWORKS 2020*. SDC Publications. USA, 816s.
- [10] ASTM International. (2014). ASTM D638-14: Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International. <https://www.astm.org/> (Erişim Tarihi: 10.03.2025)
- [11] Gómez-Gras, G., Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodríguez, J. A., Lluma-Fuentes, J. 2018. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Materials & Design*, 140, 278-285.
- [12] X. Wang, M. Jiang, Z.W. Zhou, J.H. Gou, D. Hui. 2017. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Compos B Eng*, 110, 442-458.
- [13] Ulkir, O. (2023). Production of piezoelectric cantilever using MEMS-based layered manufacturing technology. *Optik*, 277, 170472.

- [14] A.A. D'Amico, A. Debaie, A.M. Peterson. 2017. Effect of layer thickness on irreversible thermal expansion and interlayer strength in fused deposition modelling. *Rapid. Prototyp. J.*, 23, 943-953.
- [15] H. Chen, V.V. Ginzburg, J. Yang, Y. Yang, W. Liu, Y. Huang, L. Du, B. Chen. 2016. Thermal conductivity of polymer-based composites: fundamentals and applications. *Prog. Polym. Sci.*, 59, 41-85.
- [16] H. Prajapati, D. Ravoori, R.L. Woods, A. Jain. 2018. Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM). *Additive Manufacturing*, 21, 84-90.
- [17] Smith, J., Brown, L., & Zhao, Y. (2021). Thermal behavior of polymer composites under radiative environments. *Polymer Testing*, 99, 107234.